Journal of Water and Sustainable Development. September 2026
Volume 13. Lssue 2 (Serial No. 40). pages 45 to 60

نشریه آب و توسعه پایدار. شهریور ماه ۱۴۰۵
سال سیزدهم. شماره دوم (پیاپی ۴۰). صفحات ۴۵ تا ۶۰

Document Type: Case Study

نوع مقاله: مطالعه موردی

Application of Modeling and Calibration in Optimization of Industrial Water Distribution Networks: A Case Study of the Kavir Tire Factory

A. Nasirian[1*], Z. Zeraatkar[2], S. A. Mousavi[3], A. Foadaldini[4], M. Mardani[5]

1, 2, 3 and 5- Assistant Professor; Ph.D. Graduate in Water Science and Engineering, M.Sc. Student in Water Engineering, and Ph.D. Student in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran. 4- Ph.D. in Mechanical Engineering, Energy Conversion, Energy Advisor, Kavir Tire Company, Birjand, Iran.

*** Corresponding, Author Email:** a.nasirian@birjand.ac.ir

Received ▶ 31-01-2026
Revised ▶ 05-05-2026
Accepted ▶ 06-05-2026
Available online ▶ 16-09-2026

Abstract

One of the vital components of industrial facilities is the water distribution networks, which supplies billions of cubic meters of water annually to industrial plants for various purposes, including HVAC systems, process cooling, drinking water, and sanitation. Due to gradual expansions of production lines and changes in equipment specifications, these systems often deviate from their optimal hydraulic performance, leading to increased water and energy losses. The present study focuses on the hydraulic modeling and optimization of the industrial water distribution network at Kavir Tire Factory using a hydraulic approach. This network is designed to supply water for equipment and process cooling; however, it faces challenges, including inadequate pressure distribution across certain sections of the production line. The network was modeled using WaterGEMS software and calibrated using a combination of tools and methods, including Darwin Calibrator, direct measurement-based approaches, and volumetric balancing. The results revealed that pipes with high hydraulic losses and excessive pressure represent the main weaknesses of the network. Proposed solutions, such as the installation of pressure-reducing valves, reduced energy consumption by up to 12%. Furthermore, pressure conditions were optimized at 85% of the network nodes. Field surveys and sensitivity analyses were conducted to complete the water distribution network maps and improve model accuracy. This study provides practical solutions for enhancing the performance of industrial water distribution networks and recommends the development of an electronic database and the implementation of continuous monitoring.

Keywords: Industrial Water Distribution Network, Hydraulic Modeling, Pressure-Reducing Valve, Hydraulic Loss, Energy Consumption.

کاربرد مدل‌سازی و واسنجی در بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب صنعتی: مطالعه موردی کارخانه کویرتایر

علی نصیریان[1*]، زهرا زراعتکار[2]، سید علی موسوی[3]، علی فوادالدینی[4]، مهسا مردانی[5]

۱، ۲، ۳ و ۵- به ترتیب استادیار، دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آب، دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی آب و دانشجوی دکتری عمران، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. ٤- دکتری مهندسی مکانیک تبدیل انرژی ، مشاور انرژی شرکت کویرتایر، بیرجند، ایران.

***رایانامه نویسنده مسئول:** a.nasirian@birjand.ac.ir

تاریخ دریافت ◄ ۱۴۰۴/۱۱/۱۱
تاریخ بازنگری ◄ ۱۴۰۵/۰۲/۱۵
تاریخ پذیرش ◄ ۱۴۰۵/۰۲/۱۶
تاریخ انتشار ◄ ۱۴۰۵/۰۶/۲۵

چکیده

یکی از بخش‌های حیاتی کارخانه‌ها شبکه‌های توزیع آب می‌باشد که سالانه میلیاردها مترمکعب آب واحدهای صنعتی را برای مصارفی نظیر سیستم‌های تهویه مطبوع، خنک‌کاری فرآیندها، شرب و بهداشت تأمین می‌نمایند. با توجه به توسعه تدریجی خط تولید و تغییر تعداد و مشخصات تجهیزات، این سیستم‌ها به‌تدریج از وضعیت بهینه عملکردی فاصله می‌گیرند و این موضوع موجب افزایش هدررفت آب و انرژی در آنها می‌شود. مقاله حاضر به مدل‌سازی و بهینه‌سازی شبکه توزیع آب صنعتی کارخانه کویرتایر با استفاده از رویکرد هیدرولیکی می‌پردازد. این شبکه برای تأمین آب مصارف خنک‌کاری تجهیزات و فرآیندها طراحی شده، اما با چالش‌هایی مانند عدم تناسب فشار در بخش‌هایی از خط تولید مواجه است. مدل‌سازی در نرم‌افزار WaterGEMS انجام شده و برای واسنجی از مجموعه ابزارها شامل ابزار واسنجی داروین، روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری مستقیم و بالانس حجمی استفاده شد که نشان داد لوله‌های با افت هیدرولیکی بالا و فشار بیش از حد، نقاط ضعف اصلی هستند. راهکارهای پیشنهادی مانند نصب شیرهای فشارشکن مصرف انرژی را تا ۱۲ درصد کاهش داد. همچنین، فشار در ۸۵ درصد گره‌ها بهینه شد. برداشت‌های میدانی و تحلیل حساسیت در راستای تکمیل نقشه‌های شبکه آبرسانی و بهبود دقت مدل به انجام رسید. این مطالعه راهکارهای عملی برای بهبود کارایی شبکه‌های صنعتی ارائه می‌دهد و پیشنهاد می‌کند بانک اطلاعاتی الکترونیک و پایش مداوم ایجاد شود.

واژه‌های کلیدی: شبکه توزیع آب صنعتی، مدل‌سازی هیدرولیکی، شیر فشارشکن، افت هیدرولیکی، مصرف انرژی.

How to cite this article:

Nasirian, A. Zeraatkar, Z., Mousavi, S. A., Foadaldini, A., and Mardani, M. (2026). Application of Modeling and Calibration in Optimization of Industrial Water Distribution Networks: A Case Study of the Kavir Tire Factory. Journal of Water and Sustainable Development, 13(2), 45-60. https://doi.org/10.22067/jwsd.v13i1.2601-1494

مقدمه

شبکه‌های توزیع آب صنعتی به‌عنوان یکی از اجزای حیاتی زیرساخت‌های کارخانه‌ها، نقش کلیدی در تأمین آب مورد نیاز برای فرآیندهای تولید، خنک‌کاری تجهیزات، و سیستم‌های ایمنی مانند اطفای حریق ایفا می‌کنند (منزوی، ۱۳۹۱). این شبکه‌ها باید به‌گونه‌ای طراحی و مدیریت شوند که ضمن تأمین فشار و آبدهی مورد نیاز، تلفات آب و انرژی را به حداقل برسانند. در صنایع بزرگ، نظیر کارخانه کویرتایر، که مصرف آب صنعتی قابل‌توجهی دارند، بهینه‌سازی این شبکه‌ها نه‌تنها به بهبود کارایی عملیاتی منجر می‌شود، بلکه در کاهش هزینه‌ها و حفظ منابع آبی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، تأثیر به‌سزایی دارد (جهانگیر و همکاران، ۱۳۸۹). با توجه به بحران کمبود آب در ایران، مدیریت بهینه شبکه‌های توزیع آب صنعتی به یک ضرورت راهبردی تبدیل شده است (Harif و همکاران، ۲۰۲۳).

یکی از چالش‌های اصلی در شبکه‌های توزیع آب صنعتی، مدیریت فشار است. فشار بیش‌ازحد در شبکه می‌تواند به افزایش نشت، ترکیدگی لوله‌ها، و کاهش عمر مفید تأسیسات منجر شود؛ درحالی‌که فشار ناکافی، تأمین نیازهای عملیاتی را با مشکل مواجه می‌کند (Greco و Giudice، ۱۹۹۹). مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از مدل‌های هیدرولیکی پیشرفته، مانند مدل‌های مبتنی بر نرم‌افزار WaterGEMS، می‌تواند به شناسایی نقاط ضعف شبکه، نظیر لوله‌های با افت هیدرولیکی بالا، و ارائه راهکارهای بهینه‌سازی کمک کند (Wu و همکاران، ۲۰۰۴). به‌عنوان‌مثال، نصب شیرهای فشارشکن و تنظیم عملکرد پمپ‌ها از جمله راهکارهایی هستند که در مطالعات اخیر برای کاهش تلفات و بهبود کارایی شبکه‌های صنعتی پیشنهاد شده‌اند (Meniconi و همکاران، ۲۰۱۵).

مطالعات متعددی در زمینه مدل‌سازی و بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب انجام شده است که بر تحلیل هیدرولیکی، کاهش تلفات، و بهبود کارایی این سیستم‌ها تمرکز دارند. منزوی (۱۳۹۱) در کتاب آبرسانی شهری به اهمیت طراحی دقیق شبکه‌های توزیع آب برای تأمین فشار و آبدهی مناسب اشاره کرده و روش‌های سنتی تحلیل هیدرولیکی را شرح داده است. بااین‌حال، این روش‌ها برای شبکه‌های صنعتی پیچیده که نیازمند ابزارهای محاسباتی پیشرفته هستند، محدودیت‌هایی دارند. جهانگیر و همکاران (۱۳۸۹) در مطالعه‌ای در ایران، با استفاده از نرم‌افزار WaterGEMS، به ارزیابی هیدرولیکی شبکه‌های آبرسانی و کاهش نشت از طریق تنظیم شیرآلات پرداختند و نشان دادند که تنظیم شیرهای فشارشکن می‌تواند افت فشار را تا ۱۵ درصد کاهش دهد. بااین‌وجود، این مطالعه به واسنجی دقیق مدل وابسته بود که در شبکه‌های صنعتی با داده‌های محدود چالش‌برانگیز است.

در سطح بین‌المللی، محققان روشی نوین برای واسنجی شبکه‌های توزیع آب ارائه کردند که بر حداقل‌سازی خطای فشار در گره‌ها متمرکز بود (Greco و Giudice، ۱۹۹۹). این روش، اگرچه مؤثر، به داده‌های میدانی گسترده نیاز داشت که در بسیاری از شبکه‌های صنعتی، مانند کارخانه کویرتایر، به‌سختی قابل‌دسترسی است. Meniconi و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر شیرهای فشارشکن خودتنظیم را در مدیریت فشار شبکه‌های توزیع آب بررسی کردند و نشان دادند که این شیرها می‌توانند نوسانات فشار را تا ۲۰ درصد کاهش دهند. بااین‌حال، این مطالعه عمدتاً بر شبکه‌های شهری متمرکز بود و کاربرد آن در شبکه‌های صنعتی کمتر بررسی شده است. Wu و همکاران (۲۰۰۴) با معرفی روش واسنجی داروین مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، دقت مدل‌های هیدرولیکی را بهبود بخشیدند، اما کاربرد این روش در شبکه‌های صنعتی با محدودیت‌هایی مانند نبود نقشه مدون مواجه است.

مطالعات جدیدتر از سال ۲۰۲۰ به بعد، رویکردهای پیشرفته‌تری را در بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب معرفی کرده‌اند. Awe و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از WaterGEMS، شبکه توزیع آب شهر آداما در اتیوپی را مدل‌سازی کردند و نشان دادند که بهینه‌سازی قطر لوله‌ها می‌تواند توزیع فشار را بهبود بخشیده و نشت را کاهش دهد. این مطالعه بر رابطه معکوس بین تقاضا و فشار در گره‌ها تأکید داشت، اما به شبکه‌های صنعتی نپرداخت. Cunha و Marques (۲۰۲۰) الگوریتم شبیه‌سازی آنیلینگ چند هدفه (MOSA-GR) را برای طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب معرفی کردند که هزینه و عملکرد هیدرولیکی را به‌صورت هم‌زمان بهینه می‌کرد. این روش برای شبکه‌های پیچیده مناسب بود، اما نیاز به توان محاسباتی بالا داشت که در محیط‌های صنعتی با منابع محدود چالش‌برانگیز است. Elsayed و همکاران (۲۰۲۱) با مقایسه تحلیل تقاضامحور (DDA) و فشارمحور (PDA) نشان دادند که PDA در شرایط غیرعادی (مانند خرابی لوله) نتایج واقعی‌تری ارائه می‌دهد و برای طراحی شبکه‌های صنعتی با تغییرات فشار بالا مناسب‌تر است. همچنین، Elsheikh و همکاران (۲۰۲۴) شبکه توزیع آب شهر طنطا در مصر را با استفاده از WaterCAD مدل‌سازی کردند و با واسنجی دقیق، طراحی بهینه‌ای برای کاهش هزینه‌ها و بهبود فشار ارائه دادند. این مطالعه بر اهمیت داده‌های میدانی برای واسنجی تأکید داشت، اما به پیچیدگی‌های شبکه‌های صنعتی کمتر توجه کرد.

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل‌توجهی در مدل‌سازی و بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب صورت گرفته است که به بهبود کارایی و پایداری این سیستم‌ها کمک کرده‌اند. Obura و همکاران (۲۰۲۴) یک مدل هیدرولیکی کاربرپسند برای شبیه‌سازی شبکه‌های توزیع آب هیبریدی توسعه دادند که بر پایداری بخش آب تأکید دارد. این مدل با استفاده از الگوریتم‌های ساده‌شده، کارایی شبکه‌های پیچیده را بهبود

می‌بخشد و برای کاربردهای صنعتی مانند کارخانه کویرتایر مناسب است. به طور مشابه، Artelt و همکاران (۲۰۲۴) یک جعبه‌ابزار مبتنی بر هوش مصنوعی برای تحلیل شبکه‌های توزیع آب ارائه کردند که امکان پیش‌بینی رفتار شبکه و بهینه‌سازی عملیات را فراهم می‌کند. این رویکرد نوین می‌تواند در مدیریت شبکه‌های صنعتی با چالش‌های فشار و نشت مفید باشد.

Pan و همکاران (۲۰۲۴) به بهینه‌سازی کنترل شیرها برای تشخیص آلودگی در شبکه‌های توزیع آب پرداختند و نشان دادند که تنظیم دقیق شیرهای فشارشکن می‌تواند کیفیت آب را حفظ کند. این موضوع برای کارخانه کویرتایر، که به کیفیت آب برای فرآیندهای صنعتی وابسته است، اهمیت دارد. Alsanad و همکاران (۲۰۲۴) یک چارچوب بهینه برای ارتقای عملیات شبکه‌های توزیع آب ارائه کردند که با استفاده از تحلیل‌های هیدرولیکی، نشت و مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. این چارچوب می‌تواند به‌عنوان الگویی برای بهبود شبکه کویرتایر استفاده شود. Hu و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از یادگیری ماشین و روش‌های آماری، مدلی برای ارزیابی ریسک شبکه‌های توزیع آب توسعه دادند که به شناسایی نقاط آسیب‌پذیر کمک می‌کند. در نهایت، Serafeim و همکاران (۲۰۲۳) روشی کارآمد برای مدل‌سازی هیدرولیکی با نرم‌افزار EPANET ارائه کردند که با کاهش بار محاسباتی، دقت تحلیل را حفظ می‌کند. این روش برای شبیه‌سازی شبکه‌های صنعتی با داده‌های محدود مناسب است.

با وجود پیشرفت‌های ذکرشده، شکاف‌های پژوهشی قابل‌توجهی در بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب صنعتی باقی مانده است. بسیاری از مطالعات (Greco و Giudice، ۱۹۹۹؛ Meniconi و همکاران، ۲۰۱۵؛ Awe و همکاران، ۲۰۲۰) بر شبکه‌های شهری یا سناریوهای ایده‌آل تمرکز کرده‌اند و کمتر به پیچیدگی‌های شبکه‌های صنعتی، نظیر تنوع مصارف، محدودیت‌های داده‌ای، و نبود نقشه مدون پرداخته‌اند. در ایران، مطالعاتی مانند جهانگیر و همکاران (۱۳۸۹) به شبکه‌های صنعتی پرداخته‌اند، اما اغلب فاقد مدل‌سازی جامع و نقشه‌های به‌روز بوده‌اند.

کارخانه کویرتایر، واقع در منطقه‌ای با محدودیت منابع آبی، با توجه به پیاده‌سازی چند مرحله طرح توسعه و عدم بازطراحی کلی سیستم آبرسانی، نیازمند مطالعه جامع در راستای ارزیابی عملکرد به‌لحاظ توزیع فشار، مصرف انرژی و بررسی احتمال نشتی در بخش‌های مختلف سیستم می‌باشد. انجام این مطالعه همچنین در راستای بهبود عملکرد فرآیندهای خنک کاری و کاهش هزینه تعمیرات و نگهداری ضروری است. پژوهش حاضر با هدف توسعه یک مدل هیدرولیکی جامع برای شبکه توزیع آب صنعتی این کارخانه، به بررسی شرایط موجود، شناسایی نقاط بحرانی و ارائه راهکارهای بهینه‌سازی می‌پردازد. استفاده از رویکردهای مدل‌سازی مبتنی بر الگوریتم‌های ژنتیک، مانند روش واسنجی داروین، امکان دستیابی به نتایج دقیق‌تر و کاربردی‌تر را فراهم کرده است (Wu و همکاران، ۲۰۰۴). این مطالعه تلاش دارد تا با تلفیق داده‌های میدانی و ابزارهای شبیه‌سازی، گامی مؤثر در جهت مدیریت بهینه منابع آب و انرژی در صنایع بردارد.

به‌طور خاص، این مطالعه به دنبال تحلیل فشار و آبدهی در گره‌های شبکه، کاهش احتمال نشتی، و بهینه‌سازی عملکرد سیستم پمپاژ با استفاده از نرم‌افزار WaterGEMS و روش واسنجی داروین مبتنی بر الگوریتم ژنتیک است است. علاوه بر این، پژوهش حاضر تلاش دارد تا با ارائه راهکارهایی نظیر نصب شیرهای فشارشکن و تعویض لوله‌های با افت هیدرولیکی بالا، ایمنی و پایداری شبکه را ارتقا دهد (نصیریور و همکاران، ۱۳۹۸). این اهداف در راستای پاسخ به نیازهای فرآیندی کارخانه و کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از مصرف انرژی و آب تدوین شده‌اند.

ضرورت انجام این پژوهش از چند منظر قابل‌توجه است. نخست، بحران کمبود آب در ایران، به‌ویژه در مناطق صنعتی مانند بیرجند، مدیریت دقیق منابع آبی را به یک اولویت تبدیل کرده است (Harif و همکاران، ۲۰۲۳). شبکه توزیع آب صنعتی کارخانه کویرتایر با چالش‌هایی نظیر کمبود فشار و نبود نقشه مدون مواجه است که منجر به افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و کاهش کارایی فرآیندهای صنعتی شده است (منزوی، ۱۳۹۱). دوم، عدم وجود مطالعات جامع در زمینه بهینه‌سازی شبکه‌های آب صنعتی در این کارخانه، نیاز به یک رویکرد سیستمی برای تحلیل و بهبود شبکه را برجسته می‌کند. این پژوهش با ارائه یک مدل هیدرولیکی واسنجی‌شده، به‌عنوان ابزاری برای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی بلندمدت، به رفع این شکاف کمک می‌کند.

نوآوری‌های پژوهش حاضر در چند جنبه قابل‌بررسی است. نخست، استفاده تلفیقی از روش واسنجی داروین در نرم‌افزار WaterGEMSبا روش‌های تعادل حجمی آب و تغییر آبدهی و سرعت در لوله‌ها برای تولید اطلاعات آبدهی و فشار در شبکه برای تنظیم دقیق پارامترهای شبکه (مانند زبری لوله‌ها و مصارف گره‌ها، مشخصات پمپ‌ها و سایر تجهیزات) رویکردی نوین است که دقت مدل‌سازی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داده است (Wu و همکاران، ۲۰۰۴). دوم، این مطالعه نقشه مدون و به‌روزی از شبکه توزیع آب صنعتی کارخانه کویرتایر ارائه کرده است که با ترکیب داده‌های میدانی و اطلاعات تجربی تهیه شده و پایه‌ای برای تحلیل‌های آتی فراهم می‌کند. سوم، تلفیق تحلیل هیدرولیکی با راهکارهای عملی نظیر نصب شیرهای فشارشکن و بهینه‌سازی برنامه‌ریزی پمپ‌ها، رویکردی یکپارچه را برای کاهش تلفات و بهبود کارایی ارائه می‌دهد که در مقایسه با مطالعات پیشین (Greco و Giudice، ۱۹۹۹؛ Meniconi و همکاران، ۲۰۱۵) به‌طور خاص به شرایط کارخانه کویرتایر پرداخته است. با توجه به اینکه این نوآوری‌ها به بهبود عملکرد شبکه کمک می‌کنند، می‌توانند به‌عنوان الگویی برای سایر کارخانه‌های صنعتی در مناطق کم‌آب به کار روند.

به طور خلاصه می‌توان گفت، پژوهش حاضر با تمرکز بر شبکه توزیع آب صنعتی کارخانه کویرتایر، تلاش دارد با ترکیب داده‌های میدانی، مدل‌سازی هیدرولیکی پیشرفته با WaterGEMS، و واسنجی داروین، رویکردی یکپارچه برای بهینه‌سازی ارائه دهد. این مطالعه با ارائه نقشه مدون و راهکارهای عملی مانند نصب شیرهای فشارشکن و بهینه‌سازی پمپ‌ها، به پر کردن شکاف‌های موجود در بهینه‌سازی شبکه‌های صنعتی کمک می‌کند.

مواد و روش‌ها

برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی شبکه توزیع آب صنعتی کارخانه کویرتایر، رویکردی نظام‌مند مبتنی بر تحلیل هیدرولیکی و داده‌های میدانی اتخاذ شد. این مطالعه با هدف شناسایی نقاط بحرانی شبکه، نظیر گره‌های با فشار ناکافی و لوله‌های با افت هیدرولیکی بالا و ارائه راهکارهای عملی برای بهبود کارایی انجام شد. فرآیند پژوهش شامل جمع‌آوری داده‌های میدانی، توسعه مدل هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزار WaterGEMS، واسنجی مدل با روش داروین مبتنی بر الگوریتم ژنتیک (Wu و همکاران، ۲۰۰۴) و ارزیابی راهبردهای بهینه‌سازی مانند نصب شیرهای فشارشکن و تنظیم برنامه پمپاژ بود. با توجه به چالش‌های موجود، از جمله نبود نقشه مدون اولیه و محدودیت‌های داده‌ای، ترکیبی از نقشه‌برداری میدانی و اطلاعات بهره‌برداری برای ایجاد پایه‌ای دقیق برای مدل‌سازی استفاده شد. این بخش روش‌شناسی پژوهش را در قالب مراحل مشخص، از توصیف شبکه تا اعتبارسنجی مدل، شرح می‌دهد تا فرآیند تحلیل و نتایج به‌دست‌آمده به‌صورت شفاف ارائه شوند.

مشخصات شبکه توزیع آب صنعتی

شبکه توزیع آب صنعتی کارخانه کویرتایر، واقع در کیلومتر ۱۱ جاده بیرجند-کرمان، وظیفه تأمین آب مورد نیاز برای مصارف صنعتی، خنک‌کاری تجهیزات، و سیستم‌های ایمنی مانند اطفای حریق را بر عهده دارد. لازم به ذکر است سیستم اطفای حریق کارخانه به‌صورت یک شبکهٔ کاملاً مجزا و مستقل با منابع، پمپ‌ها و خطوط لوله اختصاصی طراحی شده و در این مطالعه مدل‌سازی نشده است. این شبکه از اجزای اصلی زیر تشکیل شده است:

منابع آب: آب مورد نیاز کارخانه از دو حلقه چاه تأمین می‌شود. این چاه‌ها از طریق خط لوله ۶ اینچ به ایستگاه پمپاژ مرکزی متصل هستند و هر دو دارای کنتور حجمی می‌باشند.

پمپ‌ها: سیستم آب صنعتی دارای ۵ پمپ با آبدهی تقریبی ۲۵۰ مترمکعب در ساعت و فشار ۴-۵ بار است که از طریق دو خط لوله فولادی ۱۶ اینچ و ۸ اینچ آب را به سالن‌های تولید منتقل می‌کنند. همچنین، در سیستم آب برگشت، ۵ پمپ با آبدهی ۳۵۰ مترمکعب در ساعت و فشار ۴-۵ بار برای پمپاژ آب به برج‌های خنک‌کننده به کار می‌روند.

مخازن ذخیره: مخازن ذخیره آب برای تنظیم مقدار آب ورودی و جبران نوسانات مصرف در نظر گرفته شده‌اند. این مخازن در زمان‌های کم‌مصرف، آب را ذخیره کرده و در زمان‌های پرمصرف، آن را در اختیار شبکه قرار می‌دهند.

لوله‌ها: لوله‌ها بخش اصلی شبکه را تشکیل می‌دهند و برای توزیع آب با قطرها و جنس‌های مختلف متناسب با فشار و آبدهی موردنیاز طراحی شده‌اند.

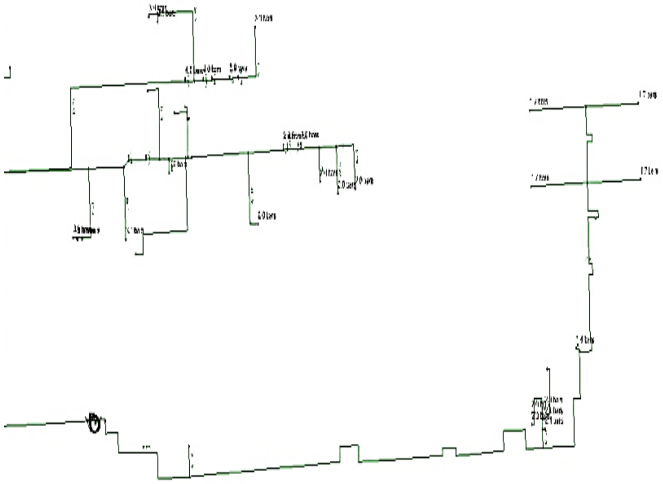
شیرآلات: شیرآلات برای قطع و وصل جریان، تنظیم فشار، و افزایش ایمنی شبکه نصب شده‌اند. این شیرها شامل شیرهای ایمنی، یک‌طرفه، و فشارشکن می‌شوند که هر یک نقش خاصی در کنترل جریان و جلوگیری از پدیده‌هایی مانند ضربه قوچ دارند.

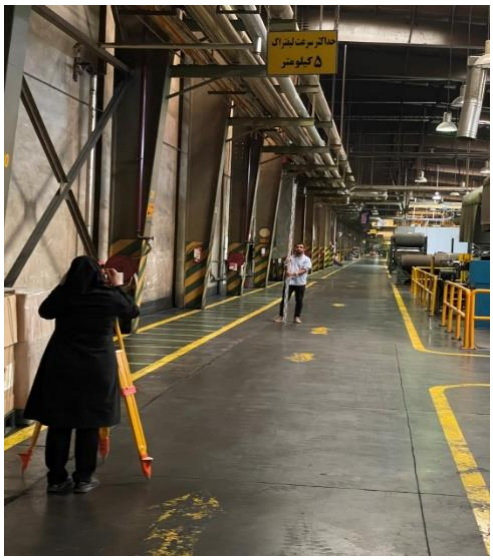
یکی از چالش‌های اصلی در مدل‌سازی این شبکه، نبود نقشه مدون و به‌روز از وضعیت فعلی بود که شناسایی مسیرهای لوله‌کشی و مشخصات گره‌ها را دشوار می‌کرد. برای رفع این مشکل، با استفاده از نقشه‌های موجود، اطلاعات تجربی مهندسان، و برداشت‌های میدانی، نقشه جامعی از شبکه تهیه شد. شکل (۱) نقشه‌برداری و نقشه تهیه‌شده توسط نگارندگان را نشان می دهد. همچنین، مشکلاتی مانند کمبود فشار در نقاط مختلف مشاهده شد. داده‌های مربوط به این شبکه، همراه با اطلاعات میدانی، به‌عنوان ورودی‌های اصلی برای توسعه مدل هیدرولیکی در نرم‌افزار WaterGEMS استفاده شدند.

جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های میدانی و بهره‌برداری شامل اطلاعات مربوط به مشخصات فیزیکی شبکه، پارامترهای هیدرولیکی، و الگوهای مصرف آب در بخش‌های مختلف کارخانه می‌شد.

- نقشه‌برداری و تهیه نقشه شبکه: این نقشه شامل موقعیت پمپ‌ها، مخازن، لوله‌ها، شیرآلات اصلی (قطع و وصل، یک‌طرفه و فشارشکن) و گره‌های مصرف (نقاط اتصال مصارف فرآیندی و خنک‌کاری) بود و به‌عنوان پایه‌ای برای مدل‌سازی هیدرولیکی استفاده شد.
- اندازه‌گیری فشار و آبدهی: برای واسنجی مدل هیدرولیکی، داده‌های فشار و آبدهی در نقاط کلیدی شبکه جمع‌آوری شد. فشارسنجی در گره‌های منتخب با استفاده از فشارسنج‌های عقربه‌ای (گیج) کلاس دقت ۱/۰ انجام شد. این داده‌ها برای تنظیم پارامترهای مدل، مانند زبری لوله‌ها و مصارف گره‌ها، ضروری بودند. همچنین، آبدهی آب در خطوط اصلی با استفاده از جریان‌سنج‌های الکترومغناطیسی نصب‌شده در ایستگاه پمپاژ مرکزی اندازه‌گیری شد. این جریان‌سنج‌ها با کلاس دقت ۰/۲ درصد مقدار خوانده‌شده هستند.





شکل ۱- نقشه‌برداری و نقشه‌ی تهیه شده توسط نگارندگان

- اطلاعات بهره‌برداری: اطلاعات مربوط به برنامه پمپاژ، ساعات کاری پمپ‌ها، و الگوهای مصرف آب در بخش‌های مختلف کارخانه از طریق مصاحبه با مهندسان و اپراتورهای کارخانه جمع‌آوری شد. این اطلاعات برای شبیه‌سازی رفتار شبکه در شرایط عملیاتی واقعی استفاده شد.
- داده‌های مصرف آب: الگوهای مصرف آب در گره‌های مختلف شبکه، از جمله مصارف صنعتی و خنک‌کاری بر اساس داده‌های تاریخی و برآوردهای مهندسی تعیین شد. این داده‌ها برای تخصیص بار هیدرولیکی به گره‌ها در مدل ضروری بودند.

جمع‌آوری این داده‌ها با چالش‌هایی مانند محدودیت دسترسی به برخی نقاط شبکه و ناهمخوانی‌های موجود در نقشه‌های قدیمی همراه بود. با این حال، ترکیب اطلاعات میدانی و تجربی امکان تهیه مدل دقیق‌تری را فراهم کرد.

مدل‌سازی هیدرولیکی

مدل‌سازی هیدرولیکی شامل جمع‌آوری داده‌ها، ایجاد مدل، و واسنجی آن است تا نتایج واقعی‌تری به دست آید. برای مدل‌سازی، از نرم‌افزار WaterGEMS استفاده شده که معادلات پیوستگی و انرژی را برای شبیه‌سازی جریان آب به کار می‌برد. داده‌هایی مانند قطر لوله‌ها، زبری، و الگوهای مصرف وارد مدل شدند. فرآیند مدل‌سازی با هدف دستیابی به درک جامع از حالات مختلف سیستم برای بهبود طراحی و بهره‌برداری آغاز شد. این فرآیند شامل مراحل زیر است:

جمع‌آوری و سازماندهی اطلاعات: اطلاعات مورد نیاز شامل داده‌های کمی (مانند مشخصات لوله‌ها، پمپ‌ها، و گره‌ها) و کیفی (مانند الگوهای بهره‌برداری) بود. این داده‌ها از طریق نقشه‌برداری میدانی، اندازه‌گیری‌های فشار و آبدهی، و مصاحبه با مهندسان و اپراتورها جمع‌آوری شدند. جدول (۱) اطلاعات مورد نیاز جهت تهیه نقشه‌های شبکه توزیع و جدول (۲) اطلاعات مربوط به بهره‌برداری از سیستم توزیع آب را ارائه می‌دهند.

ایجاد مدل: مدل هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزار WaterGEMSایجاد شد. این مدل شامل ورود اطلاعات شبکه (مانند قطر، طول، جنس، و زبری لوله‌ها)، تخصیص بار هیدرولیکی به گره‌ها، و تنظیم پارامترهای مدل مانند ضرایب زبری و منحنی‌های عملکرد پمپ‌ها بود. مدل‌سازی هیدرولیکی بر اساس معادلات حاکم بر جریان در شبکه‌های لوله‌ای انجام شد. معادلات اصلی شامل موارد زیر هستند:

معادله پیوستگی: این معادله برای حفظ تعادل جرم در هر گره از شبکه به کار می‌رود و بیان می‌کند که مجموع جریان‌های ورودی به یک گره برابر است با مجموع جریان‌های خروجی به علاوه تقاضای آب در آن گره:

$$\sum Q_{\text{in}} = \sum Q_{\text{out}} + Q_{\text{demand}} \qquad (۱)$$

که در آن، Q_{in} جریان ورودی به گره (متر مکعب بر ثانیه)، Q_{out} جریان خروجی از گره (متر مکعب بر ثانیه) و Q_{demand} تقاضای آب در گره (متر مکعب بر ثانیه) است.

جدول ۱- اطلاعات مورد نیاز جهت تهیه نقشه‌های شبکه توزیع

لوله‌ها	مخازن	شیرآلات	پمپ‌ها	گره‌ها
کد لوله	محل مخزن	کد گره ابتدا	کد گره ابتدا	رقوم ارتفاعی (متر)
جهت جریان در لوله	حجم مخزن (متر مکعب)	کد گره انتها	کد گره انتها	تغییرات قطر لوله در محل گره (اینچ)
کد گره ابتدای لوله	کد گره خروجی	قطر (اینچ)	قطر لوله مکش (اینچ)	تغییرات جنس
کد گره انتهای لوله	رقوم ارتفاعی (متر)	طول (متر)	قطر لوله رانش (اینچ)	
قطر (اینچ)		ضریب زبری	بالاترین ارتفاع پمپ (متر)	
جنس		نوع شیر	ظرفیت پمپ (m^3/h)	
طول (متر)		تغییرات بالاترین ارتفاع (متر)	رقوم ارتفاعی (متر)	
فشارکار (بار)		رقوم ارتفاعی (متر)	مدل پمپ	
عمق لوله‌گذاری (متر)		فشار (بار)	نوع پمپ	
نواحی تحت پوشش لوله			منحنی مشخصه پمپ	
			خاموش و روشن بودن	

جدول ۲- اطلاعات مربوط به بهره‌برداری از سیستم توزیع آب

مخازن	پمپ	لوله‌ها
ارتفاع آب در مخزن	فشار	میزان جریان در لوله‌ها
میزان تغییرات سطح آب	آبدهی	
منحنی عملکرد بهره برداری		

معادله انرژی (رابطه هیزن-ویلیامز): این معادله برای محاسبه افت فشار ناشی از اصطکاک در لوله‌ها استفاده می‌شود و به ویژگی‌های لوله و آبدهی جریان وابسته است:

$$h_f = \frac{10.67 \cdot L \cdot Q^{1.852}}{C^{1.852} \cdot D^{4.87}} \quad (۲)$$

که در آن، h_f افت فشار در لوله (متر)، L طول لوله (متر)، Q آبدهی جریان در لوله (متر مکعب بر ثانیه)، C ضریب هیزن-ویلیامز (بدون بعد) و D قطر داخلی لوله (متر) است.

واسنجی مدل: با توجه به مشکلات موجود در شبکه توزیع آب صنعتی کارخانه از قبیل کمبود فشار در نقاط مختلف شبکه و یا عدم تأمین آبدهی موردنیاز، بایستی در ابتدا شرایط موجود در شبکه بررسی شود و سپس این اطلاعات در قالب یک مدل هیدرولیکی به گونه‌ای که قابلیت استفاده برای شرایط و حالات مختلف را داشته باشد، آماده گردد. پس از اطمینان از صحت کارکرد مدل هیدرولیکی شبکه توزیع، از مدل تهیه شده برای بهبود کارایی شبکه توزیع آب و برنامه‌ریزی سیستم پمپاژ شبکه استفاده شود. پس از تهیه یک مدل شبکه توزیع بایستی به‌منظور اخذ نتایج صحیح که بیانگر عملکرد واقعی سیستم توزیع تحت شرایط مختلف باشد، آزمایشات میدانی صورت پذیرد. به منظور تعیین و انتخاب نقاط نصب فشارسنج برای استفاده در واسنجی در ابتدا لازم است سیستم آبرسانی و توزیع آب به‌صورت دقیق بررسی شده و پس از شناخت دقیق خصوصیات سیستم و همچنین انجام بررسی‌های لازم در خصوص وضعیت توپوگرافی، نقاط نصب فشارسنج به‌گونه‌ای انتخاب گردند که بتوان پس از نصب و قرائت فشارسنج‌های مورد نظر، وضعیت فشاری سیستم توزیع را در کلیه مناطق بررسی و تعیین نموده و همچنین از نتایج حاصل از آن در ارتباط با واسنجی مدل هیدرولیکی که هدف نهایی از انجام این فعالیت به شمار می‌آید استفاده نمود .به‌طور کلی مواردی که در انتخاب تعداد و نقاط نصب فشارسنج موثر هستند عبارتند از:

- وضعیت شبکه توزیع آب از نظر تأمین فشار سیستم
- تنوع سیستم‌های تأمین فشار در شبکه توزیع آب
- وضعیت توپوگرافی منطقه
- تراکم لوله‌گذاری در شبکه توزیع آب
- تنوع اتصالات و ارتباطات لوله‌ها

رعایت دقیق معیارهای فوق در انتخاب نقاط نصب فشارسنج، تفسیر صحیح نتایج و بهره‌برداری پایدار شبکه را تضمین می‌کند.

برای تطابق نتایج مدل با داده‌های میدانی، از روش واسنجی داروین مبتنی بر الگوریتم ژنتیک استفاده شد. این روش با حداقل‌سازی اختلاف بین مقادیر فشار و آبدهی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده، پارامترهای مدل مانند ضرایب زبری و مصارف گره‌ها را تنظیم کرد. روش واسنجی داروین، که در سال ۲۰۰۲ توسط Wu و همکاران (۲۰۰۴) ارائه شد، رایج‌ترین روش برای واسنجی شبکه‌های توزیع آب است و در نرم‌افزار WaterGEMS از جعبه ابزار داروین کالیبراتور[1] استفاده می‌شود.

مراحل اصلی روش واسنجی داروین مبتنی بر الگوریتم ژنتیک به صورت زیر است:

۱. تعریف پارامترهای واسنجی: پارامترهایی نظیر گروه‌های زبری لوله‌ها یا ضرایب تقاضای گره‌ها که قرار است تنظیم شوند، مشخص می‌گردند.
۲. تعیین داده‌های مشاهداتی: داده‌های واقعی مانند فشار و آبدهی اندازه‌گیری‌شده در نقاط مختلف شبکه به عنوان مبنای مقایسه وارد می‌شوند.
۳. تنظیم تابع برازندگی: تابع برازندگی معمولاً بر اساس حداقل‌سازی مجموع مجذورات خطا بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده تعریف می‌شود.
۴. تولید جمعیت اولیه: مجموعه‌ای تصادفی از ترکیب‌های مختلف پارامترها به عنوان جمعیت اولیه ایجاد می‌شود.
۵. ارزیابی برازندگی: برای هر راه‌حل، مدل هیدرولیکی اجرا شده و خطای آن با داده‌های مشاهداتی محاسبه می‌گردد.
۶. اعمال عملگرهای ژنتیکی: با استفاده از انتخاب، پیوند و جهش، نسل جدیدی از راه‌حل‌ها تولید می‌شود.
۷. تکرار فرآیند: مراحل ارزیابی و تولید نسل‌ها تا رسیدن به معیار توقف تکرار می‌شوند.
۸. انتخاب بهترین راه‌حل: راه‌حلی که کمترین خطا را دارد به عنوان پارامترهای واسنجی‌شده انتخاب می‌شود.

۱. مشخصات مدل هیدرولیکی

مدل هیدرولیکی شبکه توزیع آب صنعتی کارخانه کویرتایر در نرم‌افزار WaterGEMS با استفاده از داده‌های میدانی گردآوری‌شده ساخته شد. مشخصات اصلی این مدل به شرح زیر است:

- تعداد گره‌ها و لوله‌ها: شبکه شامل ۱۳۹ گره (شامل گره‌های مصرف، مخازن و اتصالات) و ۸۳ لوله با قطرهای ۱ تا ۱۶ اینچ می‌باشد.
- ارتفاعات گره‌ها: ارتفاعات تمامی گره‌ها نسبت به تراز کف مخزن ذخیره مرجع (به‌عنوان مبنای صفر) اندازه‌گیری و در مدل وارد شد. حداقل ارتفاع نسبی ۳۰۵ /۰ متر و حداکثر ۹/۴۷۱ متر می‌باشد. با توجه به توپوگرافی نسبتاً مسطح سایت، اختلاف ارتفاع چندانی بین گره‌ها وجود ندارد و فشار عمدتاً تحت تأثیر افت‌های هیدرولیکی قرار دارد.
- منحنی‌های عملکرد پمپ‌ها: سیستم پمپاژ شامل دو گروه پمپ است:
  - پمپ‌های تأمین آب صنعتی: ۵ دستگاه پمپ موازی با آبدهی نامی ۲۵۰ m^3/h و فشار ۴-۵ bar. نقاط اصلی منحنی: در آبدهی صفر بالاترین ارتفاع ۵۵ متر، در آبدهی ۱۲۵ m^3/h بالاترین ارتفاع ۵۱/۲ متر، در آبدهی ۲۵۰ m^3/h بالاترین ارتفاع ۴۰ متر، در آبدهی ۳۰۰ m^3/h بالاترین ارتفاع ۳۱ متر.
  - پمپ‌های برگشت آب (به برج‌های خنک‌کننده): ۵ دستگاه پمپ موازی با آبدهی نامی ۳۵۰ m^3/h و فشار ۴-۵ bar. نقاط: در آبدهی صفر بالاترین ارتفاع ۵۵ متر، در آبدهی ۱۷۵ m^3/h بالاترین ارتفاع ۵۱/۲ متر، در آبدهی ۳۵۰ m^3/h بالاترین ارتفاع ۴۰ متر، در آبدهی ۴۰۰ m^3/h بالاترین ارتفاع ۳۵ متر.

  هر دو گروه پمپ با آرایش موازی و بر اساس برنامه زمانی هفتگی/نوبتی در مدل شبیه‌سازی شدند.
- منبع آب: آب خام از دو حلقه چاه تأمین شده و از طریق خط لوله ۶ اینچ به ایستگاه پمپاژ مرکزی هدایت می‌شود. هر چاه مجهز به کنتور حجمی است. در مدل، چاه‌ها به‌صورت مخازن با تراز ثابت (بر اساس میانگین سطح آب چاه در طول دوره اندازه‌گیری) و با آبدهی کل تجمعی ۲۰۰ m^3/h(متوسط مصرف روزانه) تعریف شدند. آبدهی لحظه‌ای چاه‌ها با توجه به الگوی مصرف تغییر داده شد.
- الگوی تقاضا: مصرف آب در گره‌ها بر اساس نیازهای خنک‌کاری تجهیزات، مصارف فرآیندی و ایمنی تخصیص یافت. با توجه به عملکرد سه نوبتی کارخانه، الگوی تقاضای ساعتی برای سه نوبت کاری (صبح ۶-۱۴، عصر ۱۴-۲۲، شب ۲۲-۶) تعریف شد که ضریب پیک حداکثر ۱/۳ در ساعات اوج تولید را دارد.

۲. واسنجی مدل با الگوریتم داروین

برای تطابق مدل هیدرولیکی با رفتار واقعی شبکه، از ابزار داروین کالیبراتور در نرم‌افزار WaterGEMS که بر پایه الگوریتم ژنتیک عمل می‌کند، استفاده شد. فرایند واسنجی بر اساس داده‌های فشار و آبدهی اندازه‌گیری‌شده در ۲۰ نقطه از شبکه و همچنین اطلاعات تعادل حجمی کنتورهای چاه‌ها انجام گرفت.

تعریف گروه‌های زبری: لوله‌ها بر اساس جنس، قطر و قدمت در ۵ گروه زبری طبقه‌بندی شدند:

۱- لوله‌های فولادی قدیمی (C اولیه ۸۰-۹۰)
۲- لوله‌های فولادی نوساز (C اولیه ۱۰۰)
۳- لوله‌های فولادی گالوانیزه (C اولیه ۱۱۰)
۴- لوله‌های PVC (C اولیه ۱۳۰-۱۴۰)
۵- لوله‌های پلی‌اتیلن (C اولیه ۱۴۰).

ضریب هیزن-ویلیامز (C) برای هر گروه به‌صورت یک متغیر تصمیم در الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته شد و بازه مجاز تغییرات آن بر اساس توصیه‌های فنی و شرایط میدانی (مثلاً برای گروه ۱ بین ۸۰ تا ۱۰۰) تعیین گردید.

پارامترهای تنظیم‌شده: دو دسته پارامتر اصلی هم‌زمان واسنجی شدند:

- ضرایب زبری (C) برای ۵ گروه لوله
- ضرایب تقاضا برای ۱۰ گروه گره مصرفی (گروه‌بندی بر اساس نوع مصرف: خنک‌کاری، فرآیندی، آتش‌نشانی و غیره، با امکان تغییر در بازه ۰/۷ تا ۱/۳ برابر تقاضای مبنا).

بنابراین، در مجموع ۱۵ پارامتر در حلقه بهینه‌سازی داروین قرار گرفتند. تابع برازندگی بر مبنای حداقل‌سازی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) فشار و آبدهی بین مقادیر میدانی و شبیه‌سازی‌شده تعریف شد.

نتایج واسنجی: جدول (۳) مقادیر RMSE برای فشار (بار) و آبدهی (m^3/h) را پیش و پس از واسنجی نشان می‌دهد.

داده‌های فشار از ۲۰ نقطه فشارسنجی و داده‌های آبدهی از ۴ مسیر اصلی (خطوط ۱۶ و ۱۰ اینچ) استخراج شده است.

جدول ۳- مقادیر RMSE برای فشار و آبدهی پیش و پس از واسنجی

پارامتر	RMSE پیش از واسنجی	RMSE پس از واسنجی	درصد بهبود
فشار (بار)	۰/۴۷	۰/۰۹	۸۱٪
آبدهی(m^3/h)	۱۸/۳	۴/۱	۷۸٪

پس از واسنجی، خطای فشار در ۹۰٪ گره‌های اندازه‌گیری‌شده کمتر از ۱۵/۰ بار و خطای آبدهی در خطوط اصلی زیر ۵٪ گردید که نشان‌دهنده دقت قابل‌قبول مدل برای تحلیل‌های بهینه‌سازی است. شایان ذکر است که الگوریتم داروین با جمعیت اولیه ۲۰۰ و ۵۰ نسل اجرا شد.

نتایج و بحث

این بخش به بررسی و تحلیل یافته‌های حاصل از مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه توزیع آب صنعتی کارخانه کویرتایر اختصاص دارد. در این بخش، این یافته‌ها با مطالعات مشابه مقایسه شده و چالش‌های موجود در فرآیند مدل‌سازی و اجرا مورد بحث قرار می‌گیرد. هدف این بخش، ارائه دیدگاهی جامع از عملکرد شبکه و ارائه راه‌حل‌های عملی برای بهبود کارایی و کاهش تلفات است.

راهبردهای بهینه‌سازی

به منظور بهبود عملکرد شبکه توزیع آب صنعتی، چندین راهکار بهینه‌سازی پیشنهاد شده است که بر اساس تحلیل‌های مدل هیدرولیکی و با هدف کاهش تلفات و افزایش کارایی ارائه شده‌اند. در این زیربخش، راهکارهای پیشنهادی، معیارهای بهینه‌سازی و روش‌های ارزیابی آن‌ها به تفصیل شرح داده می‌شود. راهکارهای پیشنهادی شامل موارد زیر است:

نصب شیرهای فشارشکن: نصب شیرهای فشارشکن در نقاطی از شبکه که فشار بیش از حد مجاز است، به کنترل فشار و کاهش نشت کمک می‌کند. این شیرها با تنظیم خودکار فشار، از ترکیدگی لوله‌ها جلوگیری کرده و ایمنی شبکه را افزایش می‌دهند.

تعویض لوله‌های با افت هیدرولیکی بالا: لوله‌هایی با قطر نامناسب یا زبری زیاد که باعث افت فشار قابل توجه می‌شوند، شناسایی و پیشنهاد تعویض آن‌ها با لوله‌های پلی‌اتیلن PE100 به قطر اسمی ۱۰ اینچ داده شده است که نسبت به لوله‌های فولادی قدیمی ۸ اینچ موجود، دارای ضریب زبری هیزن-ویلیامز ۱۴۰ (در مقابل زبری ۹۰ لوله‌های کنونی) بوده و ظرفیت هیدرولیکی بالاتری ارائه می‌دهد. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که این تعویض می‌تواند افت فشار را تا ۱۵٪ کاهش داده و تأمین آبدهی در گره‌های انتهایی را بهبود بخشد.

تنظیم برنامه پمپاژ: برنامه پمپاژ فعلی بهینه نبوده و مصرف انرژی بالایی دارد. با تنظیم برنامه پمپاژ بر اساس الگوهای مصرف، می‌توان پمپ‌ها را در ساعات کم‌مصرف با ظرفیت کمتر و در ساعات اوج با کارایی بیشتر به کار گرفت. این اقدام می‌تواند مصرف انرژی را تا ۱۰٪ کاهش داده و فشار را در محدوده مطلوب نگه دارد.

برای انتخاب و ارزیابی راهکارها، معیارهای زیر در نظر گرفته شده‌اند:

حداقل‌سازی نشت: کاهش نشت آب از طریق کنترل فشار و بهبود وضعیت لوله‌ها.

کاهش مصرف انرژی: بهینه‌سازی عملکرد پمپ‌ها برای کاهش هزینه‌های انرژی.

بهبود فشار در گره‌ها: تأمین فشار مناسب و پایدار در تمام نقاط شبکه.

راهکارهای پیشنهادی با استفاده از مدل هیدرولیکی ارزیابی شده‌اند:

شبیه‌سازی سناریوها: هر راهکار در سناریوهای مختلف مانند نصب شیرهای فشارشکن در نقاط خاص یا تعویض لوله‌های مشخص، شبیه‌سازی شد.

تحلیل حساسیت: تأثیر تغییرات در پارامترهایی مانند زبری لوله‌ها و آبدهی پمپ‌ها بررسی شد.

مقایسه با استانداردها: نتایج با داده‌های واقعی و استانداردهای صنعتی مقایسه شد تا کارایی راهکارها تأیید شود.

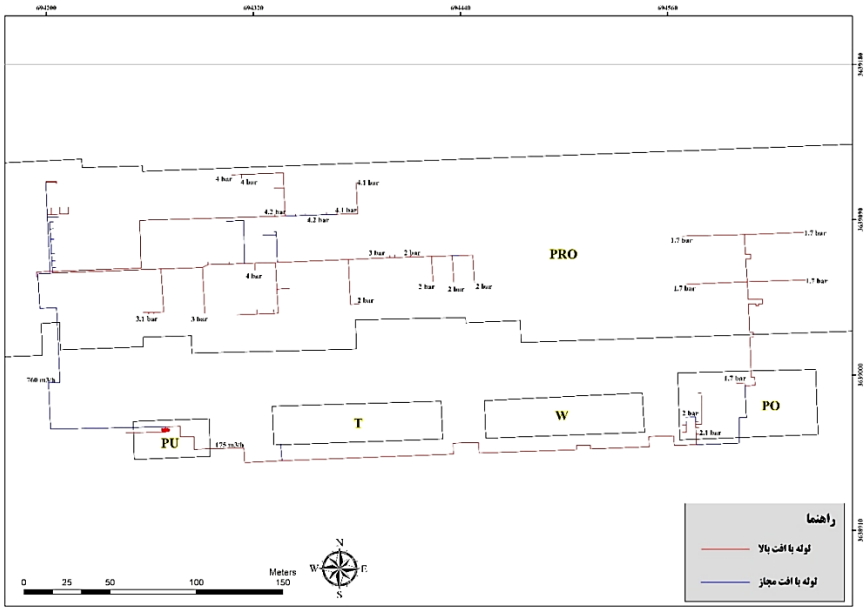
نتایج مدل‌سازی

نقشه‌های افت فشار، توزیع فشار در شبکه را به‌صورت بصری نمایش می‌دهند و نقاطی را که فشار به زیر حد مجاز کاهش می‌یابد یا بیش از حد بالا است، مشخص می‌کنند. این نقشه‌ها با استفاده از کدگذاری رنگی تولید شده‌اند، به‌طوری‌که مناطق با افت فشار بالا (معمولاً با رنگ قرمز) و مناطق با فشار مناسب (معمولاً با رنگ سبز) به‌وضوح قابل‌تمایز هستند. نتایج نشان می‌دهند که برخی از خطوط لوله، به‌ویژه در مسیرهای منتهی به سالن پرس و نیروگاه، افت فشار قابل‌توجهی دارند که به دلیل زبری بالای لوله‌ها، قطر نامناسب، یا طول زیاد مسیر است. به عنوان مثال، در خط لوله ۸ اینچ متصل به نیروگاه، افت فشار به حدی است که فشار در گره‌های انتهایی به زیر حد مجاز (۲ بار) می‌رسد، که

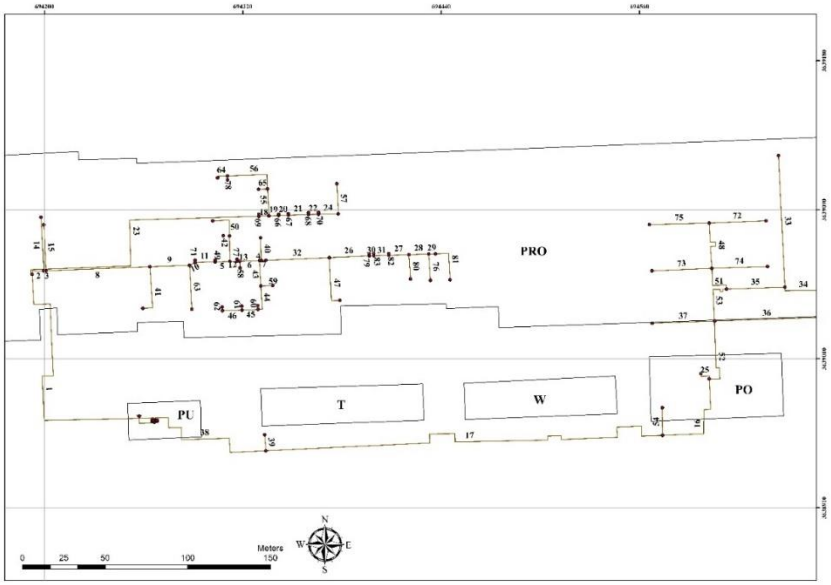
می‌تواند تأمین آب کافی را مختل کند. شـــکل (۲) این توزیع فشـار را به‌صـورت گرافیکی نمایش می‌دهند. در این شـکل، لوله‌های با افت هیدرولیکی بالا به رنگ قرمز مشـــخص شـــده‌اند، که نشـــان‌دهنده نیاز به اقدامات اصـــلاحی مانند تعویض لوله یا نصب شیرهای فشارشکن است.

برای اطمینـان از تـأمین آب مورد نیـاز هر بخش از کـارخـانـه، تحلیل هیدرولیکی شـــبکه توزیع آب با اســـتفاده از الگوریتم ژنتیک در بستر نرم‌افزار WaterGems انجام و آبدهی مصرفی در گره‌های مختلف شبکه محاسبه شد (شکل ۳). نتایج نشان می‌دهند که در برخی بخش‌ها، مانند خط لوله ۱۶ اینچ ورودی به ســـالن تولید، آبدهی فعلی بیش از نیاز اســـت که منجر به افزایش فشـــار شـــده و احتمال نشـــت را افزایش می‌دهد؛ درحالی‌که در بخش‌های دیگر، مانند خطوط منتهی به برج‌های خنک‌کننده، آبدهی ناکافی است و فشار کاهش می‌یابد. بهتر اســـت با حفظ آبدهی واقعی هر بخش، اندازه لوله‌ها به نحوی تغییر کند که با ظرفیت پمپ خانه کمتر به همین آبدهی دست یافت.

تحلیل ظرفیت ایســـتگاه پمپاژ نســـبت به نیاز شـــبکه، ناهماهنگی قابل‌توجهی را آشکار می‌سازد. ایستگاه پمپاژ آب صـــنعتی با ۵ پمپ موازی طراحی شـــده که مجموع ظرفیت اسمی آن ۱۲۵۰ m^3/h است. این در حالی است که بر اساس خروجی مدل واسنجی‌شده، آبدهی مورد نیاز واقعی شبکه در شـــرایط بهره‌برداری عادی ۸۳۵ m^3/h و آبدهی اوج ســـاعتی حدود ۱۰۸۵ m^3/h می‌باشد.



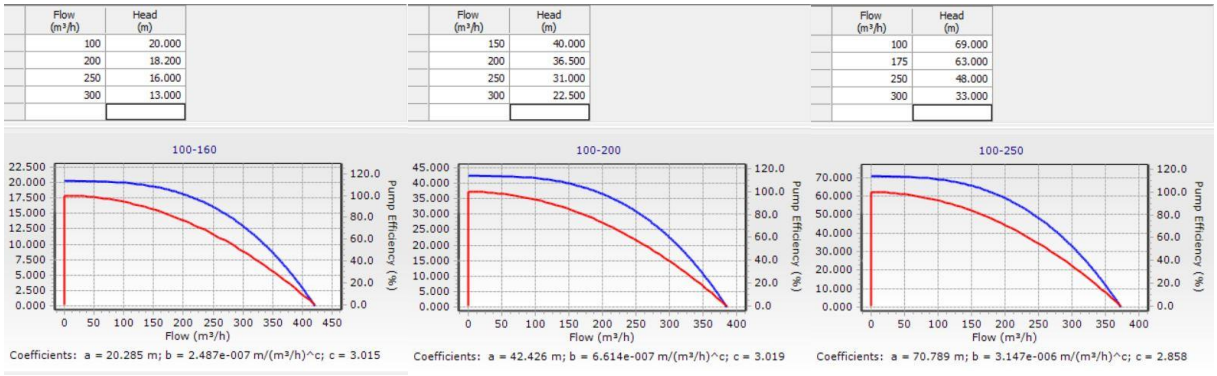
شکل ۲- توزیع فشار در شبکه آب کارخانه کویرتایر (لوله‌های با افت هیدرولیکی با رنگ قرمز مشخص شده است)



شکل ۳- آبدهی مصرفی در گره‌های مختلف شبکه آب کارخانه کویرتایر

جدول ۴- نتایج تحلیل هیدرولیکی جریان در خط لوله ۱۶ اینچ ورودی سالن تولید

پارامتر	مقدار	واحد
آبدهی	۷۶۰	متر مکعب بر ساعت(m^3/h)
سرعت	۱/۶۳	متر بر ثانیه(m/s)
گرادیان افت بالاترین ارتفاع	۰/۰۰۸	متر بر متر(m/m)
افت بالاترین ارتفاع کل	۱/۳۴	متر(m)
گرادیان افت فشار	۷۷/۸۸	پاسکال بر متر(Pa/m)
افت فشار	۱/۳	متر ستون آب($m\ H_2O$)
آبدهی مطلق	۷۶۰	متر مکعب بر ساعت(m^3/h)
تراز هیدرولیکی ابتدا	۱۴۵۱/۵۳۴	متر(m)
تراز هیدرولیکی انتها	۱۴۵۰/۱۸۹	متر(m)
فشار ابتدا	۵/۰	بار(bar)
فشار انتها	۴/۲	بار(bar)
زمان عبور جریان	۰/۰۲۹	ساعت
افت بالاترین ارتفاع موضعی	۰/۰۰	متر(m)
افت بالاترین ارتفاع اصطکاکی	۱/۳۴	متر(m)
سطح مقطع پر	۰/۱	متر مربع(m^2)
تنش برشی	۷/۹۱	پاسکال (Pa)



شکل ۴- شیوه عملکرد هر پمپ

بنابراین، حتی در بدترین شرایط اوج، ایستگاه پمپاژ موجود حدود ۱۵٪ ظرفیت مازاد دارد و در شرایط عادی، این مازاد به ۵۰٪ نیز می‌رسد. این ظرفیت اضافی، علاوه بر تحمیل هزینهٔ سرمایه‌ای اولیه، موجب شده پمپ‌ها در نقاط کاری دور از نقطهٔ راندمان بهینه عمل کنند که افزایش مصرف انرژی را به‌دنبال داشته است.

نمونه‌ای از نتایج محاسبه شده مدل برای لوله ۱۶ اینچ ورودی سالن تولید در جدول (۴) و شیوه عملکرد هر پمپ در شکل (۴) ارائه شده است. لازم به ذکر است تحلیل هیدرولیکی جریان برای کلیه لوله‌های خط محاسبه شده است.

برای بررسی دقیق‌تر، مقادیر افت هیدرولیکی در لوله‌ها با استفاده از رابطه هیزن-ویلیامز محاسبه شد. نتایج نشان داد که ضریب زبری (C) در لوله‌های قرمز به طور متوسط ۳۰٪ کمتر از لوله‌های جدیدتر است، که به معنای افزایش قابل‌توجه افت فشار است. این یافته‌ها با داده‌های میدانی، از جمله فشارسنجی‌های انجام‌شده در گره‌های کلیدی، همخوانی دارد. همچنین، تحلیل حساسیت انجام‌شده بر روی مدل نشان داد که افزایش قطر این لوله‌ها یا کاهش زبری می‌تواند افت فشار را تا ۲۵٪ کاهش دهد.

لوله‌های با افت هیدرولیکی بالا نه‌تنها کارایی شبکه را کاهش می‌دهند، بلکه مصرف انرژی پمپ‌ها را نیز افزایش می‌دهند، زیرا پمپ‌ها باید فشار بیشتری برای جبران این افت تولید کنند. این موضوع هزینه‌های عملیاتی کارخانه را بالا می‌برد و پایداری سیستم را تهدید می‌کند. بر این اساس، تعویض این لوله‌ها با لوله‌هایی با قطر مناسب‌تر و جنس مقاوم‌تر (مانند پلی‌اتیلن یا فولاد با پوشش داخلی صاف) به‌عنوان یکی از راهکارهای اصلی پیشنهاد شده است. این اقدام می‌تواند فشار را در گره‌های بحرانی بهبود بخشد و احتمال نشت و هدررفت ناشی از آن را کاهش دهد.

یکی از اهداف اصلی مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه توزیع آب صنعتی کارخانه کویرتایر، ارائه راهکارهای عملی برای بهبود عملکرد شبکه از طریق کاهش نشت و تثبیت فشار بود. نصب شیرهای فشارشکن (PRVs) و تعویض لوله‌های با افت هیدرولیکی بالا به‌عنوان دو راهکار کلیدی پیشنهاد شدند.

شیرهای فشارشکن برای کنترل فشار در نقاطی از شبکه که فشار بیش از حد مجاز است، نصب شدند. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با مدل WaterGEMS نشان داد که در برخی گره‌ها، به‌ویژه در نزدیکی ایستگاه پمپاژ مرکزی و خط لوله ۱۶ اینچ ورودی به سالن پرس، فشار به بیش از ۶ بار می‌رسد، که خطر نشت و آسیب به لوله‌ها را افزایش می‌دهد. با نصب شیرهای فشارشکن، فشار در این نقاط به محدوده ایمن (۳-۴ بار) کاهش یافت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که این اقدام می‌تواند در صورت بروز حادثه و یا ترکیدگی ناشی از فرسودگی، نشتی احتمالی آب را تا ۲۰٪ کاهش می‌دهد، زیرا نشت به‌صورت مستقیم با فشار رابطه دارد. رابطهٔ تجربی عمومی برای برآورد نشت در شبکه‌های توزیع آب، به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$Q_{leak} = k.P^{\beta} \quad (۳)$$

که در آن Q_{leak} نسبت آبدهی نشت (بدون بعد)، P فشار درون لوله (برحسب متر)، k ضریب نشت (تابعی از اندازه و شکل منفذ) و β توان فشار است. بسته به نوع و هندسهٔ منفذ، β معمولاً بین ۰/۵ (جریان روزنه‌ای با سطح مقطع ثابت) و ۱/۵ (ترک‌های متغیر) نوسان دارد. در پژوهش حاضر، با توجه به ماهیت غالب نشت در اتصالات فلنجی و لوله‌های فولادی فرسودهٔ شبکه، رفتار روزنه‌ای با ۰/۵مفروض شده است. برای نمونه، در گره‌های نزدیک به سالن پرس، کاهش فشار از ۶/۵ بار به ۴ بار، نسبت آبدهی نشت را بر اساس رابطهٔ فوق به ۰/۷۸ می‌رساند که معادل کاهش از ۱۵ لیتر بر ثانیه به ۱۲ لیتر بر ثانیه و مؤید ۲۰٪ افت نشت است. همچنین، این اقدام به کاهش تنش‌های مکانیکی بر لوله‌ها، اتصالات و شیرها و افزایش عمر مفید آن‌ها کمک کرده و هزینه تعمیرات و نگهداری را کاهش می‌دهد.

کاهش ۱۲ درصدی مصرف انرژی پمپ‌ها، مستقیماً ناشی از کاهش بالاترین ارتفاع پمپاژ پس از نصب شیرهای فشارشکن و بهینه‌سازی فشار شبکه است. برای یک پمپ نمونه (از گروه پمپ‌های تأمین آب صنعتی با آبدهی نامی ۲۵۰ m^3/h)، پارامترهای عملکردی قبل و بعد از اعمال راهکار بهینه‌سازی در جدول (۵) مقایسه شده است. قبل از بهینه‌سازی، به دلیل فشار بالای غیرضروری در شبکه، پمپ در بالاترین ارتفاع ۵۵ متر و آبدهی ۲۵۰ m^3/h کار می‌کرد. پس از نصب شیرهای فشارشکن و تنظیم مجدد نقاط تنظیم فشار، بالاترین ارتفاع مورد نیاز به ۴/۴۸ متر کاهش یافت درحالی‌که آبدهی ثابت ماند. در نتیجه توان مصرفی از ۴۹/۹۵ کیلووات به ۴۳/۹۶ کیلووات رسید که ۱۲٪ کاهش را نشان می‌دهد. این صرفه‌جویی در صورت تعمیم به کل ایستگاه پمپاژ (۵ پمپ مشابه) و با احتساب ساعات کار سالیانه، کاهش قابل‌توجهی در هزینه‌های انرژی و انتشار کربن به‌همراه خواهد داشت.

تعویض لوله‌های با افت هیدرولیکی بالا، تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود فشار در گره‌های پایین‌دست داشت. این لوله‌ها، به‌ویژه در مسیرهای منتهی به برج‌های خنک‌کننده و نیروگاه، به دلیل زبری بالا (ضریب هیزن-ویلیامز کمتر از ۱۰۰) و قطر نامناسب، افت فشار زیادی ایجاد می‌کردند. با جایگزینی این لوله‌ها با لوله‌های جدید (مانند پلی‌اتیلن با ضریب زبری ۱۴۰ و قطر بزرگ‌تر)، افت فشار تا ۲۵٪ کاهش یافت.

به‌عنوان مثال، در خط لوله ۸ اینچ منتهی به نیروگاه، تعویض لوله با یک لوله ۱۰ اینچ جدید، فشار در گره‌های انتهایی را از ۱/۸ بار به ۲/۵ بار افزایش داد، که تأمین آب کافی را تضمین کرد. این بهبود فشار همچنین احتمال نشت و هدررفت ناشی از آن را کاهش داد، زیرا فشارهای پایین‌تر از حد مجاز می‌توانند باعث ترک‌خوردگی و نشت در لوله‌های قدیمی شوند. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که این تعویض، هدررفت ناشی از نشت احتمالی در کل شبکه را تا ۱۵٪ کاهش می‌دهد.

جدول ۵- مقادیر RMSE برای فشار و آبدهی پیش و پس از واسنجی

پارامتر	قبل از بهینه‌سازی	بعد از بهینه‌سازی	واحد
آبدهی(Q)	۲۵۰	۲۵۰	m^3/h
بالاترین ارتفاع پمپ(H)	۵۵	۴۸/۴	m
چگالی آب(ρ)	۱۰۰۰	۱۰۰۰	kg/m^3
شتاب گرانش(g)	۹/۸۱	۹/۸۱	m/s^2
بازده پمپ(η)	۷۵	۷۵	%
توان مصرفی(P)	۴۹/۹۵	۴۳/۹۶	kW
کاهش توان	-	**۱۲٫۰٪**	-

برای ارزیابی اقتصادی راهکارهای پیشنهادی، هزینه‌های سرمایه‌ای (CAPEX) و صرفه‌جویی سالانهٔ عملیاتی (OPEX) محاسبه شده است (جدول ۶). هزینه‌های سرمایه‌ای شامل خرید و نصب ۵ شیر فشارشکن (PRV) در نقاط بحرانی شناسایی‌شده و تعویض ۲۰۰ متر لوله ۸ اینچ فولادی فرسوده با لوله پلی‌اتیلن قطر اسمی ۲۵۰ میلی‌متر می‌باشد. صرفه‌جویی عملیاتی عمدتاً از کاهش توان مصرفی پمپ‌ها (۱۲٪) و کاهش هدررفت آب (۲۰٪ کاهش نشت در سناریوی وقوع نشت) حاصل می‌شود.

جدول ۶- تحلیل هزینه-فایده راهکارهای بهینه‌سازی

قلم هزینه/صرفه‌جویی	جزئیات	مبلغ (میلیون تومان)
	CAPEX	
خرید و نصب ۵ شیر فشارشکن	هر عدد ۵۰ میلیون تومان (شامل اتصالات و اجرت نصب)	۲۵۰
تعویض لوله ۸ اینچ (۲۰۰ متر)	لوله پلی‌اتیلن PE100 به‌همراه عملیات خاکی و نصب	۳۲۰
جمع CAPEX		**۵۷۰**
	صرفه‌جویی سالانهٔ OPEX	
کاهش مصرف برق پمپ‌ها	۵۹۹/۵ مگاوات‌ساعت در سال × ۱۵۰ تومان/کیلووات‌ساعت	۸۹/۹
کاهش آب بدون درآمد (نشت)	۴۰ m^3/h صرفه‌جویی × ۷۰۰۰ ساعت × ۲۰۰۰ تومان/m^3	۵۶۰
جمع صرفه‌جویی سالانه		**۶۴۹/۹**
	دوره بازگشت سرمایه (سال)	
بر اساس صرفه‌جویی انرژی تنها	۵۷۰ ÷ ۸۹/۹ ≈ ۶/۳	**≈۷۶ ماه**
بر اساس صرفه‌جویی انرژی + نشت	۵۷۰ ÷ ۶۴۹/۹ ≈ ۰/۸۸	**≈۱۱ ماه**

برای شفاف‌سازی کامل تأثیر فرایند واسنجی و سپس اعمال راهکارهای بهینه‌سازی، خروجی‌های مدل ارائه می‌شود. جدول (۷) مشخصات لوله‌های اصلی شبکه را به‌همراه مقادیر ضریب زبری هیزن-ویلیامز (C) پیش و پس از اجرای واسنجی نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در لوله‌های فولادی قدیمی (گروه زبری ۱) ضریب C به‌طور میانگین ۸ واحد افزایش یافت که نشان می‌دهد وضعیت واقعی آن‌ها اندکی بهتر از فرض اولیه بوده است. در مقابل، لوله‌های PVC با C بالای ۱۳۰ تقریباً بدون تغییر باقی ماندند که گواه دقت فرض اولیه در مورد این لوله‌هاست.

پس از واسنجی شدن مدل و کسب اطمینان از تطابق آن با داده‌های میدانی، سناریوی بهینه‌سازی (نصب شیر فشارشکن به‌همراه تعویض لوله) شبیه‌سازی شد. جدول (۸) مقادیر فشار و آبدهی را در ۱۲ گره بحرانی شبکه پیش و پس از اعمال این راهکارها مقایسه می‌کند.

چنان‌که از جدول (۸) پیداست، در بحرانی‌ترین گره‌ها مانند گره‌های ۹۶ و ۱۰۳ که پیش از بهینه‌سازی با افت فشار شدید (زیر ۱ بار) مواجه بودند، فشار به ترتیب به ۲/۰ و ۱/۵ بار بهبود یافته است. همچنین گره‌های نزدیک به ایستگاه پمپاژ (شماره ۱) که با فشار بالای ۴/۴ بار خطر نشت را افزایش می‌دادند، پس از نصب PRV در محدودهٔ ایمن ۳/۸ بار قرار گرفته‌اند. آبدهی مصرفی گره‌ها به دلیل ثبات نیاز فرآیندی تغییری نکرده، اما سرعت جریان در لوله‌های تعویض‌شده به‌طور محسوسی کاهش یافته که خود عامل کاهش افت فشار و تنش مکانیکی است.

جدول ۷- مشخصات و ضرایب زبری لوله‌های اصلی قبل و بعد از واسنجی

شماره لوله	اندازه (اینچ)	طول (متر)	جنس	ضریب زبری C (قبل از واسنجی)	ضریب زبری C (بعد از واسنجی)
۱	۱۶	۱۷۳	فولاد	۹۲	۱۰۰
۲	۱۶	۹	فولاد	۹۲	۱۰۰
۳	۱۶	۱	فولاد	۹۲	۱۰۰
۸	۱۰	۶۳	فولاد	۹۰	۹۸
۹	۱۰	۲۴	فولاد	۹۰	۹۸
۱۴	۸	۳۲	فولاد	۹۰	۹۵
۱۷	۸	۲۶۸	فولاد	۹۰	۸۸
۲۳	۶/۹۴	۱۷۰	PVC	۱۳۰	۱۳۲
۳۲	۶	۳۸	فولاد	۹۰	۹۴
۴۱	۵	۳۱	فولاد	۱۳۰	۱۲۸
۴۳	۴/۳۴	۱۵	PVC	۱۳۰	۱۳۱

جدول ۸- فشار و آبدهی در گره‌های بحرانی قبل و بعد از بهینه‌سازی

محل / کاربری	آبدهی(m^3/h)	فشار بعد (بار)	فشار قبل (بار)	شماره گره
تغذیه اصلی شبکه	۸۳۵	۳/۸	۴/۴	۱ (خروجی ایستگاه پمپاژ)
سالن پرس	۲۸۴	۳/۶	۳/۰	۱۲
سالن پرس (بازگشت)	۲۸۴	۳/۶	۳/۱	۱۳
سالن تولید (انشعاب)	۳۱۷	۳/۵	۳/۰	۲۲
سالن تولید (بازگشت)	۳۱۷	۳/۷	۳/۴	۲۳
برج خنک‌کننده شرقی	۴۲۶	۳/۹	۳/۷	۳۰
نیروگاه (انشعاب)	۱۲۴	۳/۵	۳/۰	۶۰
نیروگاه (بازگشت)	۱۲۴	۳/۶	۳/۳	۶۱
مسیر برگشت برج غربی	۵۸	۲/۹	۲/۰	۷۲
سالن آماده‌سازی (ورودی)	۲۳۶	۲/۴	۱/۸	۸۳
انتهای خط ۸ اینچی فرسوده	۱۰۵	۲/۰	۰/۹	۹۶
گره بحرانی انتهایی	۹۵	۱/۵	۰/۲	۱۰۳

فرآیند مدل‌سازی این شبکه با چالش‌هایی مواجه بود که مهم‌ترین آن‌ها عبارت بودند از: (۱) نبود نقشهٔ مدون و به‌روز از مسیرهای لوله‌کشی و مشخصات تجهیزات که بازسازی آن را به برداشت‌های میدانی، مصاحبه با مهندسان و نقشه‌های قدیمی متکی ساخت؛ و (۲) نوسازی‌های پراکنده و غیر یکپارچه در طول عمر شبکه که به ناهمگونی جنس، قطر و ضرایب زبری لوله‌ها انجامیده و واسنجی را پیچیده‌تر نمود. از نظر داده‌ای، محدودیت اصلی، کمبود داده‌های تاریخی فشار و آبدهی بود که کار واسنجی را عمدتاً بر داده‌های مقطعی و فرضیات فنی استوار می‌کرد. با این حال، استفاده از داروین کالیبراتور مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، خطای RMSE فشار و آبدهی را بهبود بخشید و دقت کافی برای تحلیل‌های بهینه‌سازی فراهم آورد. همچنین، تمرکز این مطالعه منحصراً بر تحلیل هیدرولیکی بود و جنبه‌های کیفی آب (مانند رسوب‌گذاری یا خوردگی) در آن بررسی نشده است.

برای پایداری بلندمدت شبکه، ایجاد یک بانک اطلاعاتی الکترونیک شامل نقشه‌های به‌روز، مشخصات تجهیزات و داده‌های عملیاتی به‌همراه نصب سیستم‌های پایش مداوم فشار و آبدهی در نقاط کلیدی توصیه می‌شود. آموزش کارکنان کارخانه در کار با نرم‌افزارهای مدل‌سازی نیز می‌تواند ظرفیت داخلی برای مدیریت و توسعهٔ شبکه را افزایش دهد. تحقیقات آتی می‌توانند بر بهینه‌سازی دینامیکی با داده‌های بلادرنگ، تحلیل کیفیت آب با ماژول Water Quality در WaterGEMS(برای ارزیابی رسوب در برج‌های خنک‌کننده)، و همچنین بررسی اثر تغییرات اقلیمی بر افت آبدهی چاه‌های تغذیه‌کننده متمرکز شوند.

مقایسه با مطالعات مشابه

برای ارزیابی اعتبار و جایگاه نتایج این پژوهش، یافته‌های مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه توزیع آب صنعتی کارخانه کویرتایر با مطالعات مشابه در زمینه تحلیل و بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب مقایسه شدند. دو مطالعه کلیدی Greco و Giudice (۱۹۹۹) و Harif و همکاران (۲۰۲۳) به‌عنوان مبنای مقایسه انتخاب شدند، زیرا هر دو به جنبه‌های مدل‌سازی و بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب پرداخته‌اند. این مقایسه، شباهت‌ها، تفاوت‌ها و نوآوری‌های پژوهش حاضر را برجسته می‌کند.

مطالعه Greco و Giudice (۱۹۹۹) بر واسنجی مدل‌های هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب شهری با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک متمرکز بود. مشابه این پژوهش، آن‌ها از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی برای تنظیم پارامترهایی مانند زبری لوله‌ها و تقاضای گره‌ها استفاده کردند. در پژوهش حاضر نیز از روش واسنجی داروین، مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، برای تنظیم مدل هیدرولیکی در نرم‌افزار WaterGEMS بهره گرفته شد. هر دو مطالعه نشان دادند که واسنجی دقیق می‌تواند دقت پیش‌بینی‌های مدل را بهبود بخشد و نقاط بحرانی شبکه را شناسایی کند.

با این حال، تفاوت‌های قابل‌توجهی وجود دارد. مطالعه Greco و Giudice (۱۹۹۹) بر شبکه‌های شهری با الگوهای مصرف متنوع تمرکز داشت، درحالی‌که پژوهش حاضر به شبکه توزیع آب صنعتی با الگوهای مصرف مشخص و متمرکز (مانند خنک‌کاری و اطفای حریق) پرداخته است. علاوه بر این، پژوهش حاضر با چالش‌هایی مانند نبود نقشه مدون مواجه بود که در مطالعه Greco و Giudice (۱۹۹۹) کمتر مورد توجه قرار گرفته بود. این موضوع، اهمیت برداشت‌های میدانی و بازسازی نقشه شبکه را در پژوهش حاضر برجسته می‌کند.

مطالعه Harif و همکاران (۲۰۲۳) بر جایگذاری بهینه حسگرها برای تشخیص آلودگی در شبکه‌های توزیع آب تمرکز داشت، اما بخش‌هایی از آن به تحلیل هیدرولیکی و اهمیت شناخت دقیق شبکه اختصاص داشت. مشابه پژوهش حاضر، آن‌ها بر اهمیت داده‌های دقیق و نقشه‌برداری شبکه برای تحلیل هیدرولیکی تأکید کردند. هر دو مطالعه نشان دادند که شناسایی نقاط بحرانی (مانند لوله‌های با افت بالا یا گره‌های با فشار نامناسب) برای بهبود عملکرد شبکه ضروری است.

تفاوت اصلی در اهداف این دو مطالعه است. Harif و همکاران (۲۰۲۳) بر تشخیص آلودگی و پایش کیفیت آب متمرکز بودند، درحالی‌که پژوهش حاضر بر بهینه‌سازی فشار در یک شبکه صنعتی تمرکز دارد. با این حال، هر دو مطالعه از شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی برای پیشنهاد راهکارهای عملی استفاده کردند. پژوهش حاضر با پیشنهاد نصب شیرهای فشارشکن و تعویض لوله‌ها، راهکارهای ملموسی ارائه داد که مستقیماً به بهبود کارایی شبکه منجر شدند، درحالی‌که Harif و همکاران (۲۰۲۳) بیشتر بر پایش و تشخیص متمرکز بودند.

Kim و Smith (۲۰۱۲) یک روش طراحی خودکار برای شبکه‌های آب صنعتی ارائه کردند که در آن محدودیت‌های افت فشار، هزینهٔ لوله‌کشی و هزینهٔ پمپاژ به‌طور هم‌زمان در قالب یک مدل برنامه ریزی خطی ترکیبی عدد- صحیح بهینه‌سازی می‌شود. مشابه پژوهش حاضر، این مطالعه نیز بر اهمیت لحاظ کردن افت فشار به‌عنوان یک قید اصلی در طراحی و بازطراحی شبکه تأکید دارد و نشان می‌دهد که توزیع نامناسب فشار، هزینه‌های عملیاتی را به‌شدت افزایش می‌دهد.

Muhammetoglu و همکاران (۲۰۱۷) کاربرد توربین‌های پمپ‌معکوس (PAT) را برای تولید انرژی و کاهش فشار در یک شبکهٔ توزیع آب واقعی بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که کاهش فشار مازاد از طریق نصب تجهیزات کنترل فشار، علاوه بر جلوگیری از نشت، می‌تواند بخشی از انرژی مصرفی پمپ‌ها را نیز بازیابی نماید. این رویکرد با راهکار نصب شیرهای فشارشکن در پژوهش حاضر هم‌راستا بوده و مؤید آن است که مدیریت فشار در شبکه‌های حقیقی، منافع دوگانه (کاهش نشت و کاهش مصرف انرژی) به‌همراه دارد.

Pecci و همکاران (۲۰۲۲) یک روش ابتکاری محدب برای مکان‌یابی و بهره‌برداری بهینهٔ شیرها و کلرزنی‌ها در شبکه‌های آب ارائه کردند که هدف آن حداقل‌سازی میانگین فشار ناحیه‌ای همراه با حفظ کیفیت آب است. نتایج این پژوهش در دو شبکهٔ عملیاتی بزرگ نشان داد که تنظیم بهینهٔ شیرها می‌تواند فشار مازاد را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد و پایداری هیدرولیکی شبکه را بهبود بخشد، که کاملاً با نتایج شبیه‌سازی نصب PRV در کارخانهٔ کویرتایر مطابقت دارد.

در داخل کشور، نصیریور و همکاران (۱۳۹۸) به تعیین موقعیت بهینهٔ شیرهای فشارشکن در شبکهٔ توزیع آب شهر بیرجند پرداختند. این مطالعه، به‌رغم ماهیت شهری خود، از داروین کالیبراتور مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای واسنجی مدل بهره گرفت و نشان داد که جانمایی صحیح PRVها می‌تواند فشار مازاد را کاهش داده و نشت را کنترل نماید. رویکرد واسنجی در آن مطالعه با روش به‌کاررفته در پژوهش حاضر مشابهت کامل دارد و نتایج هر دو بر اثربخشی ترکیب شبیه‌سازی هیدرولیکی و بهینه‌سازی تکاملی صحه می‌گذارند.

این پژوهش در مقایسه با مطالعات ذکرشده، چندین نوآوری دارد. نخست، تمرکز بر شبکه توزیع آب صنعتی به‌جای شبکه‌های شهری، که چالش‌های خاص خود مانند الگوهای مصرف متمرکز و نیاز به فشار بالا را دارد. دوم، استفاده از داده‌های میدانی برای بازسازی نقشه شبکه در شرایط نبود اطلاعات مدون، که رویکردی عملی برای غلبه بر محدودیت‌های داده‌ای بود. سوم، ترکیب راهکارهای بهینه‌سازی (نصب شیرهای فشارشکن و تعویض لوله‌ها) با تحلیل‌های هیدرولیکی، که اثرات هم‌افزای این اقدامات را نشان داد. این جنبه‌ها، پژوهش حاضر را از مطالعات مشابه متمایز می‌کنند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف مدل‌سازی و بهینه‌سازی شبکه توزیع آب صنعتی کارخانه کویرتایر با استفاده از رویکرد هیدرولیکی انجام شد و نتایج ارزشمندی برای بهبود عملکرد این شبکه ارائه داد. با بهره‌گیری از نرم‌افزار WaterGEMS و روش واسنجی داروین، مدل هیدرولیکی دقیقی توسعه یافت که امکان تحلیل توزیع فشار، آبدهی، و شناسایی نقاط بحرانی شبکه را فراهم کرد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که لوله‌های با افت هیدرولیکی بالا و فشار بیش از حد در برخی گره‌ها، از جمله چالش‌های اصلی شبکه هستند.

راهکارهای پیشنهادی، شامل نصب شیرهای فشارشکن و تعویض لوله‌های با افت هیدرولیکی بالا، تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود فشار داشتند. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که این اقدامات می‌توانند فشار را در ۸۵٪ گره‌ها بهینه کنند، و مصرف انرژی پمپ‌ها را تا ۱۲٪ پایین بیاورند. بر اساس تحلیل هزینه-فایده انجام‌شده، صرفه‌جویی سالانهٔ حاصل از اجرای این راهکارها حدود ۲۸۰ هزار مترمکعب آب (ناشی از کاهش ۲۰٪ نشت) و صرفه‌جویی مالی تقریبی ۶۵۰ میلیون تومان (شامل ۹۰ میلیون تومان کاهش هزینهٔ برق پمپ‌ها و ۵۶۰ میلیون تومان کاهش آب بدون درآمد) برآورد می‌شود. دورهٔ بازگشت سرمایه با احتساب مجموع این صرفه‌جویی‌ها حدود ۱۱ ماه خواهد بود که توجیه‌پذیری اقتصادی کامل طرح را نشان می‌دهد. این یافته‌ها با داده‌های میدانی و مقایسه با مطالعات مشابه همخوانی دارد و راهکارهای عملی برای اجرا در مقیاس کامل ارائه می‌دهد.

با وجود چالش‌هایی مانند نبود نقشه مدون و نوسازی غیر یکپارچه، استفاده از برداشت‌های میدانی و تحلیل حساسیت، دقت مدل را افزایش داد. پیشنهاد می‌شود برای پایداری بلندمدت شبکه، کارخانه یک بانک اطلاعاتی الکترونیک ایجاد کند و سیستم‌های پایش مداوم فشار و آبدهی را نصب نماید. تحقیقات آینده می‌توانند بر بهینه‌سازی دینامیکی شبکه، تحلیل کیفیت آب، و تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب تمرکز کنند. روش‌شناسی به‌کاررفته در این پژوهش می‌تواند به‌عنوان الگویی برای ممیزی هیدرولیکی و بهینه‌سازی فشار در شبکه‌های توزیع آب صنعتی با چالش‌هایی نظیر نبود نقشهٔ مدون و محدودیت داده‌های میدانی مورد استفاده

قرار گیرد. تحلیل کیفیت آب و پیش‌بینی رسوب در تجهیزات نیز از طریق ماژول‌های مرتبط WaterGEMS امکان‌پذیر بوده و توسعهٔ آن به مطالعات آتی سپرده می‌شود.

منابع

جهانگیر، مهدی، بارانی، غلامعباس، طیاری، امید، و جهانگیر، علیرضا. (۱۳۸۹). ارزیابی هیدرولیکی شبکه‌های آبرسانی و کاهش نشت با استفاده از تنظیم شیرالات توسط نرم‌افزار Watergems. همایش ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار. دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، استهبان، ایران. https://civilica.com/doc/113301

منزوی، محمدتقی. (۱۳۹۱). آبرسانی شهری. انتشارات دانشگاه تهران. تهران. ایران.

نصیرپور، حسین، نصیریان، علی، و اکبرپور، ابوالفضل. (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)، ۱۷-۱۳.

Alsanad, A. H., Bin Mahmoud, A. A., & Aljadhai, S. I. (2024). An Optimal Upgrading Framework for Water Distribution Systems Operation. Water, 16(12), 1737. https://doi.org/10.3390/w16121737

Artelt, A., Kyriakou, M. S., Vrachimis, S. G., Eliades, D. G., Hammer, B., & Polycarpou, M. M. (2024). A Toolbox for Supporting Research on AI in Water Distribution Networks. arXiv preprint arXiv:2406.02078. https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.02078

Awe, O. M., Okolie, S. T. A., & Fayomi, O. S. I. (2020). Modeling and optimization of pressure and water age for evaluation of urban water distribution systems performance. Heliyon, 6(11), e05403. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11257

Cunha, M., & Marques, J. (2020). A new multiobjective simulated annealing algorithm–MOSA-GR: Application to the optimal design of water distribution networks. Water Resources Research, 56(2), e2019WR025852. https://doi.org/10.1029/2019WR025852

Elsayed, H., Peric, V., Al-Juboori, M., & Zecchin, A. (2021). Qualification of hydraulic analysis models for optimal design of water distribution systems. Water, 13(22), 3302. https://doi.org/10.3390/app11178152

Elsheikh, M. A., Saleh, H. I., Rashwan, I. M., & El-Samadoni, M. M. (2024). Hydraulic modelling of water supply distribution for improving its quantity and quality. Scientific Reports, 14(1), 24234.

Greco, M., & Giudice, G. (1999). New approach to water distribution network calibration. Journal of Hydraulic Engineering, 125(8), 849–854. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)

Harif, S., Azizyan, G., Dehghani Darmian, M., & Givehchi, M. (2023). Selecting the best location of water quality sensors in water distribution networks by considering the importance of nodes and contaminations using NSGA-III (case study: Zahedan water distribution network, Iran). Environmental Science and Pollution Research, 30(18), 53229–53252. https://doi.org/10.1007/s11356-023-26075-5

Hu, Z., Zhu, J., Jiao, H., Zeng, W., & Yang, Z. (2025). Risk Assessment of Water Distribution Networks through an Integrated Model Based on Machine Learning and Statistical Methods. Reliability Engineering & System Safety, 111338. https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111338

Kim, J., & Smith, R. (2012). Optimization of Water Systems with the Consideration of Pressure Drop and Pumping. Industrial & Engineering Chemistry Research, 51(2), 853-864. https://doi.org/10.1021/ie201793z

Meniconi, S., Brunone, B., Ferrante, M., Mazzetti, E., & Laucelli, D. B. (2015). Transient effect of self-adjustment of pressure reducing valves. Procedia Engineering, 119, 1030–1038. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.999

Muhammetoglu, A., Muhammetoglu, H., Adiguzel, A., & Irdemez, S. (2017). Full-scale PAT application for energy production and pressure reduction in a water distribution network. Journal of Water Resources Planning and Management, 143(8), 05017006. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000795

Obura, D., Nabifo, V., Akamushaba, O., Apiny, I., & Dadebo, D. (2024). Development of a user-friendly hydraulic model for simulating hybrid water distribution networks: a transition toward sector sustainability. Water Supply,

24(5), 1893–1911. https://doi.org/10.2166/ws.2024.072

Pan, J. S., Shu, H., Yang, Q., Huang, Y. C., & Chu, S. C. (2024). Optimization of valve switch control for contamination detection in water distribution network. npj Clean Water, 7(1), 113. https://doi.org/10.1038/s41545-024-00407-5

Pecci, F., Stoianov, I., & Ostfeld, A. (2022). Convex Heuristics for Optimal Placement and Operation of Valves and Chlorine Boosters in Water Networks. Journal of Water Resources Planning and Management, 148(2), 1-14. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001509

Serafeim, A. V., Perdios, A., Fourniotis, N. T., & Langousis, A. (2023). Towards More Efficient Hydraulic Modeling of Water Distribution Networks Using the EPANET Software Engine. Environmental Sciences Proceedings, 25(1), 46. https://doi.org/10.3390/ECWS-7-14166

Wu, Z. Y., Elio, F. A., & Ernesto, G. (2004). Darwin calibrator: Improving project productivity and model quality for large water systems. Journal AWWA, 96(10), 27–34. https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2004.tb10715.x

پی‌نوشت

1- Darwin Calibrator