Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 6, No. 4, PP. 32-44, Winter 2022
DOI: 10.22112/JWWSE.2021.277877.1264

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال ششم، شماره ۴، صفحات ۳۲-۴۴، زمستان ۱۴۰۰

Research Paper

Pressure-Energy Optimization in Water Distribution Network (Case Study of Baharestan City in Isfahan)

Hossein Nasrollahi[1], Reza Safaei[2*] and Seyed Mohamad Hossein Saleh[3]

1- Master student of Mechanical Engineering, KNT University, Tehran, Iran.
2- Water Loss and Balance Analysis Expert, Non-Revenue Water Reduction Group, Isfahan Water and Sewerage Company, Isfahan, Iran.
3- Director of the Ooperation and Development of the Water Distribution Network and Reduction of Non-Revenue Water Office, Isfahan Water and Sewerage Company, Isfahan, Iran.
*Corresponding Author, Email: rsafaei@ut.ac.ir

Received: 25/04/2021
Revised: 23/08/2021
Accepted: 09/09/2021
© IWWA

Abstract

Pressure management can reduce leakage and water loss in water distribution networks. Therefore, pressure management is considered as one of the most important ways to reduce costs related to the operation and maintenance of water distribution networks, especially in worn-out networks. Therefore, the pressure of water supplied to consumers should be as low as possible. This approach to reducing pressure in the distribution network by water and wastewater companies has led to an increase in the need for domestic water pressure boosting systems (using pumps and tanks), which in turn increases energy consumption. This discrepancy in the interests of water and wastewater companies and energy consumers highlights the perspective of the water-energy relationship. The aim of this study is to find a solution to optimize the pressure in water distribution networks through the use of domestic water pressure boosting systems while simultaneously minimize the total cost of leakage, pipe burst repairs and energy consumption. In this research, EPANET software is used for hydraulic analysis of the network as well as the use of pressure-based analysis to model as close as possible to the actual operating conditions. The research method has been implemented as a pilot for Baharestan city in Isfahan, and the results show that the optimal pressure is about 48 meters of water column and at a pressure of 41 meters, the costs of water and energy are equal.

Keywords: Water distribution network, Optimization, Pressure-based hydraulic analysis, Water and energy nexus, Pressure management

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی فشار-انرژی در شبکه توزیع آب (مطالعه موردی: شهر بهارستان اصفهان)

حسین نصراللهی[۱]، رضا صفایی بروجنی[۲*] و سید محمدحسین صالح[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی تهران.
۲- کارشناس تحلیل هدررفت و بالانس گروه کاهش آب بدون درآمد، شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان.
۳- مدیر دفتر بهره‌برداری و توسعه شبکه توزیع آب و کاهش آب بدون درآمد، شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان.
* نویسنده مسئول، ایمیل: rsafaei@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۵
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۰/۰۶/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۸
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

کنترل فشار در شبکه‌های توزیع آب می‌تواند منجر به کاهش نشتی و هدررفت آب شود. ازاین‌رو، مدیریت فشار یکی از مهم‌ترین راه‌کارها برای کاهش هزینه‌های مربوط به بهره‌برداری و نگهداری شبکه‌های توزیع آب و به‌خصوص در شبکه‌های فرسوده تلقی می‌شود. بنابراین فشار آب تأمین شده برای مصرف‌کنندگان باید تا حد ممکن پایین باشد. رویکرد کاهش فشار در شبکه توزیع توسط شرکت‌های آب و فاضلاب، منجر به افزایش نیاز به سیستم‌های تقویت‌کننده فشار آب خانگی (استفاده از پمپ و مخزن) شده که این امر افزایش مصرف انرژی را با خود به‌همراه دارد. این تناقض در منافع شرکت‌های آب و فاضلاب و مصرف‌کنندگان انرژی، چشم‌انداز رابطه آب و انرژی را برجسته می‌کند. هدف این تحقیق یافتن راه‌حلی برای بهینه‌سازی فشار در شبکه‌های توزیع آب از طریق استفاده از سیستم‌های تقویت‌کننده فشار آب خانگی برای به‌حداقل رساندن هم‌زمان هزینه کل رفع نشتی، تعمیرات ترکیدگی لوله‌ها و مصرف انرژی است. در این تحقیق از نرم‌افزار EPANET برای تحلیل هیدرولیکی شبکه و هم‌چنین استفاده از تحلیل مبتنی بر فشار برای مدل‌سازی هرچه نزدیک‌تر به شرایط واقعی بهره‌برداری استفاده می‌شود. روش تحقیق به‌صورت پایلوت برای شهر بهارستان اصفهان پیاده‌سازی شده، و نتایج نشان می‌دهد فشار بهینه در حدود ۴۸ متر ستون آب بوده و در فشار ۴۱ متر هزینه‌های بخش آب و انرژی با هم برابر می‌شود.

کلمات کلیدی: شبکه توزیع آب، بهینه‌سازی، تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار، پیوند آب و انرژی، مدیریت فشار

۱- مقدمه

تأمین انرژی و آب آشامیدنی یکی از جنبه‌های اساسی توسعه پایدار شهرها و جوامع است که خود وابسته به طیف وسیعی از عوامل مختلف و برهمکنش آن‌ها است. تغییرات آب و هوایی و روند افزایش دمای کره زمین و وقوع خشکسالی‌های درازمدت دستیابی به منابع تأمین آب پایدار و توانایی تأمین آب آشامیدنی را محدود کرده و نگرانی در مورد انتشار گازهای گلخانه‌ای علاقه جهانی به بهبود بهره‌وری انرژی را بیش از پیش نمایان ساخته است. هم‌چنین، رشد جمعیت نیاز به آب و انرژی را در بخش‌های مختلف از جمله بخش خانگی افزایش می‌دهد. بنابراین به‌دلیل جایگاه تقابلی و تکاملی مباحث آب و انرژی، امکان هم‌افزایی بین این دو وجود داشته و پیوند بین دو بخش و اهمیت برنامه‌ریزی تلفیقی آب و انرژی از موضوعات برجسته تحقیقاتی است.

اهمیت بررسی پیوند آب و انرژی در شبکه‌های توزیع آب که نقش اصلی در توزیع و تحویل آب به مصرف‌کنندگان را دارد، هنگامی به‌چشم می‌آید که کمبود فشار در شبکه مصرف‌کنندگان را ملزم به نصب و به‌کارگیری پمپ در منازل می‌نماید. مطالعات بسیاری طراحی شبکه‌های توزیع آب را با رویکرد و ابزار مختلف از جمله به حداقل رساندن هزینه (Jung and Kim, 2018)، کنترل آلودگی (Fan et al., 2019)، بازیابی انرژی (Lima et al., 2018) و استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه (Marques et al., 2018; Monsef et al., 2019) بررسی کرده‌اند. عوامل مرتبط با هزینه مانند نشت شبکه، نسبت شکست لوله، اصلاح و بازسازی شبکه آب، انرژی مورد نیاز برای پمپاژ آب به شبکه به‌طور کلی توسط تمامی شرکت‌های آب و فاضلاب موردتوجه قرار می‌گیرد. تجزیه و تحلیل چنین عواملی نقش قابل‌توجه مدیریت فشار را در شبکه‌های توزیع آب نشان داده است (Zhang et al., 2020; Lambert, 2001). فشار یک پارامتر قابل تنظیم بوده که در صورت مدیریت صحیح، می‌تواند هزینه‌های نگهداری شرکت‌های آب و فاضلاب را کاهش دهد.

مدیریت نشت به مجموعه‌ای از اقدامات و استراتژی‌هایی گفته می‌شود که توسط شرکت‌های آب و فاضلاب اتخاذ شده تا سطح نشت را به سطح اقتصادی آن نزدیک کنند (مصلحی و همکاران، ۱۳۹۸). نشت در شبکه‌های توزیع آب، رابطه بین فشار و نشت و روش‌های تشخیص نشت به‌طور گسترده‌ای مورد تحقیق قرار گرفته است (Fabbiano et al., 2020). از آن‌جا که نشت شبکه از اجزای اصلی اتلاف آب و افزایش آب بدون درآمد بوده، شرکت‌های آب و فاضلاب سعی کرده‌اند با اصلاح لوله‌های شبکه، اجرای استراتژی‌های نشت‌یابی فعال و کاهش فشار در شبکه‌های توزیع، نشت را کاهش دهند(Puust et al., 2010) . در ایران میزان متوسط نشت درشبکه‌های توزیع شهری در حدود ۱۴ درصد گزارش شده است (یوسفی خوش قلب، ۱۴۰۰). روش‌های نوین نشت‌یابی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مورد بررسی قرارگرفته است (عطاری و فغفور مغربی، ۱۳۹۷).

بسیاری از مقالات به تجزیه و تحلیل اقتصادی هزینه‌های عملیاتی و نگهداری مرتبط با شبکه‌های توزیع پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، Kanakoudis et al. (2001) مدلی برای محاسبه زمان تعویض بهینه لوله‌ها در شبکه توزیع آب، براساس هزینه‌های ترمیم خرابی و نشتی لوله ارائه دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که بهترین زمان تعویض برای شهر آتنا ۶۹ سال پس از نصب است. مدل فنی و اقتصادی آن‌ها انواع مختلفی از هزینه‌های مربوط به تعمیر و تعویض اجزای مشکل‌ساز شبکه را درنظر گرفته است. Creaco and Walski (2017) یک تحلیل اقتصادی ارائه داده‌اند که تأثیرات کاهش فشار را با استفاده از شیرهای فشارشکن با کنترل زمان لحظه‌ای (Real Time Control, RTC) بر روی نشت و تعداد شکستگی‌ها ارزیابی می‌کند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تا زمانی که هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری پایین است، نیازی به استفاده از شیرهای فشارشکن نیست. وقتی هزینه‌ها افزایش می‌یابد، اولین گزینه باید مدیریت فشار با استفاده از شیرهای فشارشکن باشد. تحلیل اقتصادی مدیریت فشار و پارامترهای تاثیرگذار بر آن نیز به‌صورت جامع مورد بررسی قرارگرفته‌است (مصلحی و همکاران، ۱۳۹۹).

مصرف انرژی در سیستم‌های تأمین آب بسیاری از محققان را بر آن داشته تا به‌دنبال رویکردهای یکپارچه‌تری در مورد آب و انرژی باشند. در یک مطالعه، مصرف انرژی در شبکه‌های توزیع آب از طریق تجزیه و تحلیل چرخه حیات شبکه آب در سه مرحله (ساخت، استفاده و دفع) ارزیابی شد و نتیجه‌گیری شد که تعویض لوله با دوره ۵۰ سال منجر به کم‌ترین مقدار مصرف انرژی می‌شود (Filion et al., 2004). Hashemi et al. (2014) با استفاده از الگوریتم کلونی مورچه عملکرد پمپ با سرعت متغیر را بهینه‌سازی کردند. با استفاده از این سیستم، آن‌ها انعطاف‌پذیری ایستگاه پمپاژ را با توجه به تغییرات تقاضای آب در طول روز افزایش دادند و برنامه پمپاژ را به‌دست‌آوردند که هزینه‌های انرژی را بهینه می‌کند.

از آن‌جایی که سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی یکی از بزرگترین اجزای مصرف‌کننده انرژی در ساختمان‌ها بوده و فشار تأمین شده توسط شرکت‌های آب و فاضلاب به‌میزان قابل‌توجهی

بر میزان انرژی مصرفی آن‌ها تأثیر می‌گذارد، رابطه بین فشار شبکه توزیع آب و انرژی مصرف شده توسط سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی (استفاده از پمپ و مخزن) برای تأمین آب و حفظ حداقل فشار در یک ساختمان با توجه به ارتفاع آن و تعداد مصرف‌کنندگان باید ارزیابی شود.

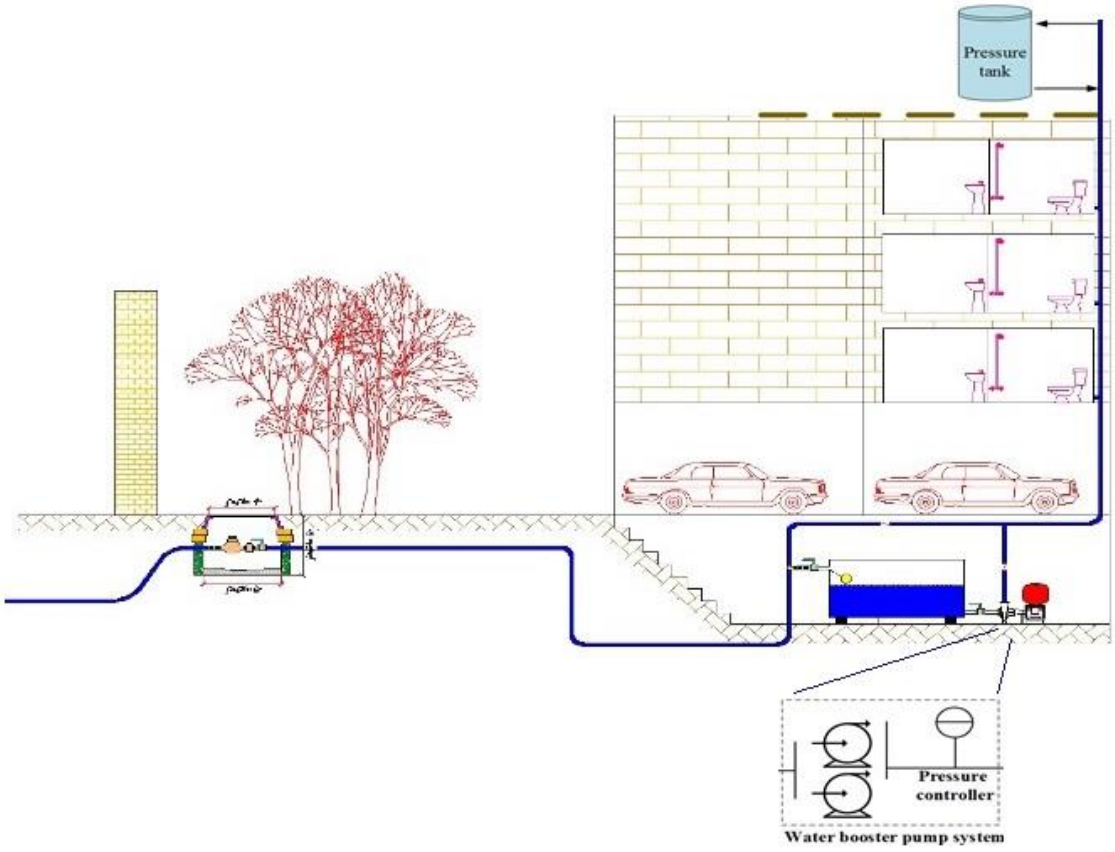
دستیابی به بهینه‌ترین مقدار فشار تأمین شده در شبکه با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های انرژی مصرفی چه در بخش خانگی و چه در بخش نگهداری شبکه‌های توزیع موضوعی است که تا به‌حال به آن پرداخته نشده است و در این تحقیق به‌عنوان هدف اصلی مطالعه انتخاب شده است.

۲- روش تحقیق

در این مقاله، شبکه با استفاده از نرم‌افزار EPANET مدل می‌شود و به‌منظور شبیه‌سازی هرچه نزدیکتر به واقعیت با استفاده از تحلیل مبتنی بر فشار فشار هر گره محاسبه می‌شود. روابط نشت و تعدد شکستگی با فشار در مدل برای محاسبه تغییرات عملکرد و هزینه‌های نگهداری پیاده‌سازی شده است. پس از تعیین مصرف انرژی توسط سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی، تابع هدف با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها در قبال دستیابی به بهینه‌ترین فشار تعریف می‌شود. این مدل برای محاسبه فشارهای بهینه شده روزانه و ساعتی و کل هزینه‌های بهینه شده برای شهر بهارستان استفاده می‌شود.

۲-۱- شبیه‌سازی مصرف انرژی برای سیستم‌های تقویت‌کننده فشار آب خانگی

سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی در هر کجا که نیاز به افزایش فشار باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد و وظیفه تأمین و حفظ فشار آب در خطوط لوله یک ساختمان را دارند. سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی به‌طور گسترده‌ای در خانه‌ها و آپارتمان‌ها نصب می‌شوند تا فشار آب را افزایش دهد و جریان مورد نیاز مصرف‌کنندگان را (که شرکت آب و فاضلاب قادر به تأمین آن نیست) در طبقه‌های مختلف در طول روز تأمین کند. براساس قوانین و استانداردهای مختلف، طرح‌های مختلف سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی برای سیستم‌های آبرسانی خانگی ارائه شده است. در شکل ۱ طراحی یک سیستم آبرسانی خانگی معمولی ارائه شده توسط شرکت‌های تولیدکننده پمپ تقویت‌کننده ارائه شده است.



شکل ۱- سیستم تامین آب خانگی

در بیشتر طراحی‌ها، مخزن ذخیره آب در طبقه همکف قرار دارد. می‌توان آب را در این مخازن در ساعات کم‌مصرف ذخیره کرد، در این مدت آب تأمین شده توسط شرکت‌های آب و فاضلاب بیش از سطح مصرف است. آب ذخیره شده را می‌توان در ساعات اوج مصرف برای تأمین نیازهای مصرف‌کنندگان با استفاده از سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی استفاده کرد. سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی، فشار آب ذخیره شده در مخزن را از طریق یک مجرا افزایش می‌دهد و شامل یک یا چند پمپ است که با توجه به ارتفاع ساختمان، کنترل‌کننده پمپ، تقویت‌کننده و یک سنسور فشار که در سمت خروجی قرار دارد، طراحی و انتخاب می‌شوند. تقویت‌کننده پمپ متصل به دستگاه کنترل، پمپ را هنگامی‌که به حد فشار بالایی از پیش تعیین شده می‌رسند خاموش کرده و با رسیدن به فشار پایین روشن می‌کند. مخزن فشار را می‌توان بر روی سقف نصب کرد تا نیازهای فشاری سیستم را برآورده کند. بدون مخزن فشار، تقویت‌کننده با کوچک‌ترین نیاز به جریان دوباره شروع به‌کار می‌کند. یک استراتژی معمولی برای صرفه‌جویی در انرژی، نصب اتصال کنارگذر برای استفاده از فشاری است که توسط شرکت آب و فاضلاب برای سیستم آبرسانی خانگی ایجاد می‌شود و نیاز به راه‌اندازی سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی را کاهش می‌دهد. هرچه میزان تأمین آب تحت فشار از شرکت‌های آب بیشتر باشد، مصرف انرژی سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی نیز کمتر خواهد بود. در تحقیق حاضر با فرض وجود مسیر کنارگذر، بررسی میزان مصرف انرژی این سیستم‌ها انجام می‌شود.

نیروی مورد نیاز پمپ برای بلند کردن مایع تا یک ارتفاع خاص، قدرت هیدرولیک نامیده می‌شود و طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$P=\begin{cases} o & h \le 0 \\ \dfrac{\rho g h Q}{\eta} & h > 0 \end{cases} \qquad (۱)$$

که P: مصرف برق، ρ: تراکم آب، g: شتاب جاذبه، Q: دبی آب، η: بازده پمپ، و h: هد پمپاژ است که طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$h=h_{sup}+h_{elv}+h_{loss}-h_{avl} \qquad (۲)$$

که h_{sup}: هدی است که توسط پمپ به شیر آب می‌رسد، h_{elv}: ارتفاع شیر آب نسبت به پمپ است، h_{loss}: تلفات اصطکاک لوله کشی و h_{avl}: فشار مکش است. فشار مکش را می‌توان فشار آب تأمین شده توسط شرکت آب در نظر گرفت که برابر با H_j است و محاسبه آن در بخش ۲-۲ نشان داده شد.

بازده پمپ η را می‌توان با استفاده از رابطه (۳) محاسبه کرد.

$$\eta=\frac{Water\ Energy}{Electric\ Energy} \qquad (۳)$$

هنگامی که هد پمپاژ h منفی باشد، فشار تأمین شده توسط شرکت آب برای مصرف‌کنندگان ساختمان کافی است. در این‌حالت دیگر نیازی به سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی نیست و انرژی اضافی نیز مصرف نمی‌شود. بازده انرژی با توجه به شرایط مختلف نصب می‌تواند متفاوت باشد. چندین استراتژی، مانند کنترل سرعت سیستم پمپاژ با استفاده از درایوهای فرکانس متغیر، نصب سیستم‌های پمپاژ موازی، افزایش قطر سیستم لوله‌کشی و انتخاب یک سیستم پمپاژ مناسب با به‌حداقل رساندن قدرت اسب بخار، پیشنهاد شده است.

طراحان ساختمان سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی را برمبنای برآورد کل نیازهای جریان مصرف‌کنندگان انتخاب می‌کنند، در حالی‌که h_{sup}، h_{elv}، h_{loss} با توجه به سیستم لوله‌کشی ساختمان حداکثر مقادیر موجود را دارند و h_{avl} حداقل مقدار را دارد. هرگونه تغییر در پارامترها بر روی نقطه عملکرد مطلوب تأثیر می‌گزارد و کارایی سیستم را کاهش می‌دهد. نصب پمپ‌های موازی می‌تواند این مشکل را در برخی ساختمان‌ها کاهش دهد.

۲-۲- شبیه‌سازی شبکه توزیع

منظور از تحلیل هیدرولیکی این است که با داشتن مشخصات شبکه و اجزای آن بتوان دبی و سرعت در لوله‌ها و هد درگره‌ها را محاسبه نمود. برای تحلیل هیدرولیکی یک شبکه باید مجموعه معادلات پیوستگی و انرژی به‌طور هم‌زمان حل شوند. معادله پیوستگی در هر گره به این مفهوم است که میزان دبی ورودی به یک گره با میزان دبی خروجی از آن برابر است. معادله انرژی در هر لوله میزان افت هد انرژی دو سر لوله را به‌صورت تابعی از خواص سیال عبوری از لوله، خواص لوله، خواص جریان (دبی یا سرعت) بیان می‌کند. برای افت هد انرژی دریک لوله معمولاً از یکی از روابط هیزن ویلیامز، دارسی وایسباخ ومانینگ استفاده می‌شود. معمولاً برای سادگی کار و از آن‌جا که فرمول هیزن ویلیامز جواب‌های نسبتاً خوبی مطابق با واقعیت می‌دهد، در عمل از معادله هیزن-ویلیامز برای تحلیل شبکه‌های آب استفاده می‌شود. هم‌چنین برای حل معادلات شبکه یکی از بهترین روش‌ها، روش گرادیان است.

برای تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های آب نرم‌افزارهای زیادی

توسعه داده شده‌اند. مشهورترین و پرکاربردترین آن، EPANET 2.0 است. از آن‌جا که این نرم‌افزار متن باز بوده و ابزار جانبی فراوانی برای آن تهیه کردند و قابلیت اتصال به محیط برنامه‌نویسی MATLAB را دارد، در این تحقیق به‌عنوان شبیه‌ساز انتخاب شده است. EPANET هم‌چنین این مزیت را دارد که برای تحلیل از روش گرادیان استفاده می‌کند.

به‌منظور تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار، باید دبی خروجی از گره را به‌جای ثابت فرض کردن (Q_{req})، متناسب با فشار موجود در گره محاسبه کرد (Q_{avl}). رابطه مورد استفاده در این تحقیق براساس بررسی و نتیجه‌گیری از روابطی که تاکنون ارائه شده‌اند، رابطه (۴) است (Tabesh et al., 2014):

$$\mathbf{Q_j^{avl}} = \begin{cases} 0 \\ ;if \quad H_j \le H_j^{min} \\ Q_j^{req}\left(\dfrac{H_j - H_j^{min}}{H_j^{des} - H_j^{min}}\right)^{\left(\frac{1}{n}\right)} \\ ;if \quad H_j^{min} < H_j \le H_j^{des} \\ Q_a + Q_b\left(\dfrac{H_j - H_j^{min}}{H_j^{des} - H_j^{min}}\right)^{\left(\frac{1}{n}\right)} \\ ;if \quad H_j^{des} < H_j \le H_j^{max} \\ Q_a + Q_b\left(\dfrac{H_j^{max} - H_j^{min}}{H_j^{des} - H_j^{min}}\right)^{\left(\frac{1}{n}\right)} \\ ;if \quad H_j > H_j^{max} \end{cases} \qquad (۴)$$

که H_j: هد موجود در گره j، H_j^{min}: حداقل حد مطلق گره‌ای، H_j^{des}: حداقل حد مطلوب گره‌ای، Q_j^{avl} و Q_j^{req}: دبی موجود و دبی مورد تقاضا گره j، H_j^{max}: هد حداکثر است که برای هدهای بیشتر از آن دبی خروجی با فشار تغییر نکرده و ثابت باقی می‌ماند، Q_a: دبی حجمی، Q_b: دبی وابسته به فشار در گره j و n: ضریبی که معمولا بین ۱/۵ تا ۲ درنظر گرفته می‌شود (Tabesh et al., 2014).

مقدار H_j^{max} با توجه به فشار ترکیدگی لوله باید انتخاب شود که این مقدار با توجه به انواع لوله‌ها از لحاظ جنس و عمر می‌تواند متفاوت باشد. مقدار پیشنهاد شده برای H_j^{max} دو برابر H_j^{des} است. برای تعیین مقادیر مصرف حجمی، با توجه به این‌که سهم عمده‌ای از مصارف را بخش حجمی در خود جا داده، لذا مقدار Q_a را برابر ۵۰٪ و در نتیجه مقدار Q_b هم ۵۰٪ مقدار مصرف مورد نیاز می‌توان درنظر گرفت.

در تحقیق حاضر با توجه به ماهیت شبکه و نحوه بهره‌برداری با فرض درنظر گرفتن مشخصات شیرهای خروجی به‌صورت ۰/۵ اینچ و به‌صورت کاملا باز می‌توان رابطه (۱) را با اعمال مقادیر پیشنهاد شده توسط (Shirzad and Tabesh, 2012) که در تحقیق خود با مطالعه آزمایشگاهی مقادیر توان و ضرایب مناسب برای استفاده در رابطه اریفیس برای شیرهای مختلف و میزان بازشدگی متفاوت را ارائه کرده‌اند، به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$H_j^{min} = 0$ ،$H_j^{des} = 30$ m ،$H_j^{max} = 100$ m و $n = 2.08$

$$\begin{cases} \mathbf{Q_j^{avl} = 0} \\ \quad \mathbf{;if \quad H_j \le 0} \\ \mathbf{Q_j^{avl} = 0.176\left(Q_j^{req} \times H_j^{0.48}\right)} \\ \quad \mathbf{;if \quad 0 < H_j \le 30} \\ \mathbf{Q_j^{avl} = Q_j^{req}\left(0.5 + 0.0882 \times H_j^{0.48}\right)} \\ \quad \mathbf{;if \quad 30 < H_j \le 100} \\ \mathbf{Q_j^{avl} = 1.424 Q_j^{req}} \\ \quad \mathbf{;if \quad H_j > 100} \end{cases} \qquad (۵)$$

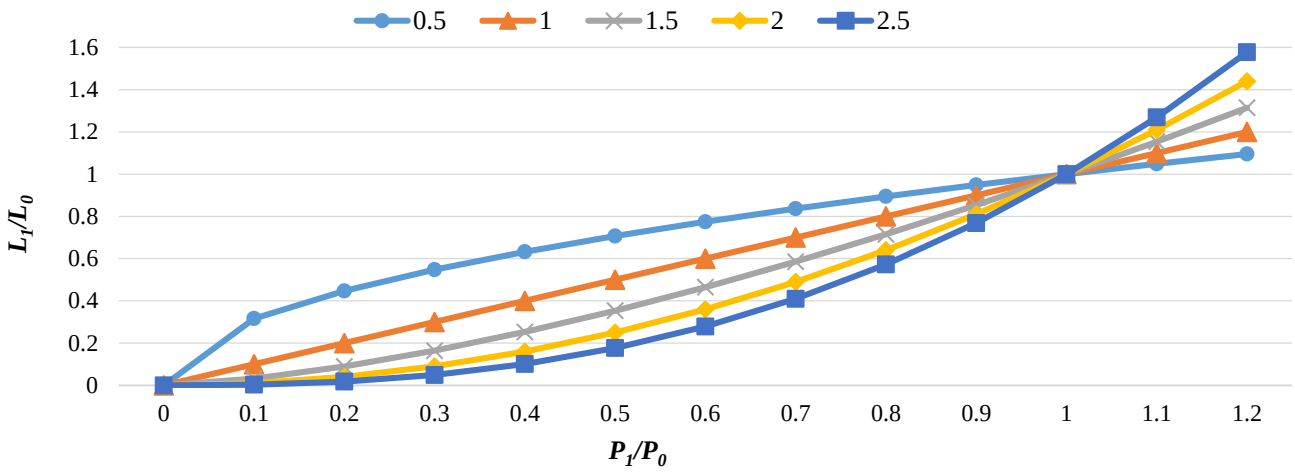
در تحقیق حاضر، به‌منظور تجزیه و تحلیل اثرات فشار متوسط شبکه توزیع آب بر هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری و هزینه انرژی مصرفی سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی، ارتفاع مخزن تغییر می‌یابد. به این معنی که به‌منظور دستیابی به میزان فشار بهینه که هدف اصلی این مطالعه است، در مدل ارتفاع مخزن تغییر داده می‌شود. البته در عمل با نصب شیرفشار شکن در ورودی شبکه توزیع و تنظیم نمودن آن، کنترل لازم را می‌توان اعمال کرد.

۲-۳- شبیه‌سازی نشت آب

یکی از نتایج اصلی مدیریت فشار متوسط شبکه کاهش نشت است. نشت دلیل اصلی هدررفت واقعی و کاهش آن پتانسیلی را برای شرکت‌های آب و فاضلاب در کاهش هزینه‌های خود و صرفه‌جویی در مصرف آب به‌ویژه در موارد کمبود آب آشامیدنی ایجاد می‌کند. روش‌های زیادی برای بررسی اثرات تغییر فشار بر نشت پیشنهاد شده است. معادله FAVAD از مشهورترین روش‌ها است و مدل بهتری در مورد رفتار واقعی شبکه‌ها ارائه می‌دهد (Deyi et al., 2014).

$$\frac{L_1}{L_0} = \left(\frac{H_1}{H_0}\right)^{N_1} \qquad (۶)$$

که L_1: نشت آب پس از کاهش فشار (متر مکعب)، L_0: نشت آب قبل از کاهش فشار (متر مکعب)، H_0: فشار قبل از کاهش (mH_2O)، H_1: فشار پس از کاهش (mH_2O) و N_1: توان نشت است و به نوع خرابی‌ها و مواد لوله بستگی دارد. طبق مطالعات تجربی، مقدار N_1 بین ۰/۵ تا ۲/۵ برآورد می‌شود. شکل ۲ رابطه بین فشار و نشت را برای مقادیر مختلف N_1 نشان می‌دهد.



شکل ۲- رابطه بین فشار و نشت را برای مقادیر مختلف N_1

۲-۴- شبیه‌سازی تعداد و دوره شکستگی‌های شبکه

کاهش تعدد شکستگی‌ها می‌تواند هزینه‌های عملیاتی و نگهداری را به‌میزان قابل‌توجهی کاهش دهد. هزینه‌های ترمیم ترکیدگی‌ها شامل لوله‌ها و کوپلینگ‌های مورد استفاده برای تعمیر، پرسنل، تجهیزات و ماشین‌آلات است که شرکت‌های آب و فاضلاب را متمایل به کاهش فشار متوسط شبکه می‌کنند. وقوع شکستگی‌ها معمولاً به سن لوله، مواد لوله، بار خارجی، شرایط آب‌وهوایی و تأثیرات مدیریت فشار بر این پارامترها بستگی دارد. مدل‌های مختلفی برای بررسی این وابستگی ایجاد شده است. Lambert et al. (2013) معادله (۷) را ارائه داده‌اند:

$$(BF_0\text{-}BF_1)=(BF_0\text{-}BF_{npd})\times\left(1\text{-}\left(\frac{H_1}{H_0}\right)^{N_2}\right) \qquad (۷)$$

که BF_0: تعداد شکستگی‌ها قبل از مدیریت فشار، BF_1: تعداد شکستگی‌ها بعد از مدیریت فشار، BF_{npd}: شکستگی‌های مستقل از فشار، H_1: فشار پس از مدیریت فشار، H_0: فشار قبل مدیریت فشار است با توجه به شبکه مورد مطالعه، و N_2: توان رابطه فشار- شکستگی است که به‌صورت تجربی محاسبه شده است.

۲-۵- روش بهینه سازی

شرکت‌های آب و فاضلاب با نصب شیرهای فشار شکن یا ایستگاه‌های پمپاژ می‌توانند فشار کل شبکه توزیع یک شهر یا یک منطقه خاص را تغییر دهند. کاهش فشار هزینه‌های عملیاتی و نگهداری شبکه توزیع را کاهش می‌دهد و از طرفی برای هر گره کاهش فشار منجر به افزایش هزینه‌های عملیاتی سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی می‌شود. از طرف دیگر، افزایش فشار باعث افزایش هزینه‌های عملیاتی و نگهداری شبکه توزیع شده و در مقابل کاهش هزینه‌های عملیاتی سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی را در پی دارد. این منافع متناقض بین شرکت‌های آب و مصرف‌کنندگان آب نیاز به یک رویکرد یکپارچه آب و انرژی برای تسهیل تصمیمات بهینه در مورد فشار متوسط شبکه توزیع در هر منطقه از شهر بر اساس شرایط محلی دارد. برای انجام این کار، هزینه‌های بخش آب و بخش انرژی مربوط به تغییر فشار متوسط باید تجزیه و تحلیل شود.

طبق بخش ۲-۱ هزینه انرژی مصرف شده توسط سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی با استفاده از رابطه (۸) قابل محاسبه است:

$$C_E = c_E \times P \qquad (۸)$$

که C_E: هزینه عملیاتی سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی، P: مصرف برق و c_E: قیمت انرژی است.

هم‌چنین، هزینه بهره‌برداری و نگهداری شبکه، که تحت تأثیر تغییر فشار موجود قرار دارد، می‌تواند با استفاده از رابطه (۹) محاسبه شود:

$$C_W=(c_B \times BF_1)) + (c_W \times L_1) \qquad (۹)$$

که C_W: هزینه بهره‌برداری و نگهداری شبکه، c_B: هزینه رفع شکستگی لوله و c_W: قیمت آب است. در آخر، نقطه فشار بهینه برای فشار موجود (h_{avl}) با رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$\text{Minimize: } OF = \left(\sum_{i=1}^{j}\sum_{h=0}^{23} C_E(i.h)\right) + \left(\sum_{h=0}^{23} C_W(h)\right)$$
$$\text{S.t:}$$
$$10 \text{ m } H_2O < (h_{avl})_j < H_j^{max} \qquad (۱۰)$$

در این تابع هدف، i و h: شمارنده، j: تعداد گره‌های شبکه، h_{avl}: متغیر تصمیم‌گیری است که در عمل با نصب شیر فشارشکن هد

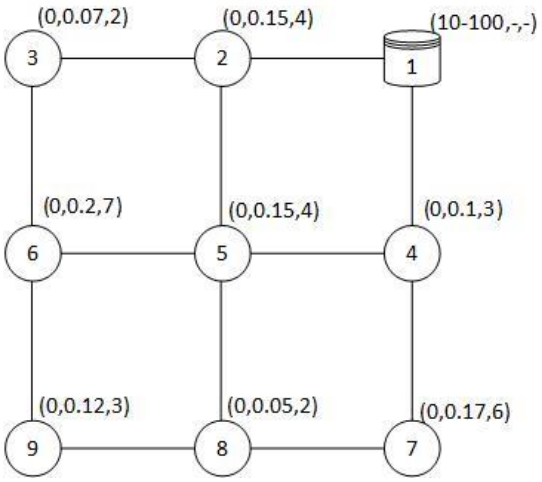
آن قابل تغییر است. فشار حداقل برابر ۱۰ متر درنظرگرفته شده که توسط شرکت‌های آب و فاضلاب تأمین می‌شود. از آن‌جا که نیاز آب و قیمت انرژی در طول روز متفاوت است، معادله بهینه‌سازی هزینه ساعتی آب و انرژی را در طول ۲۴ ساعت محاسبه می‌کند و با استفاده از جمع هزینه‌های حوزه آب و انرژی، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی خطی، نقطه کمینه این تابع را به‌عنوان جواب بهینه درنظر می‌گیرد.

۳- مطالعه موردی

در این بخش برای بررسی مدل توسعه داده شده، عملکرد آن در دو شبکه متفاوت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱- شبکه ۴ حلقه‌ای

در این مطالعه یک شبکه ۴ حلقه‌ای درنظر گرفته شده است که دارای ۱۲ لوله و ۸ مصرف‌کننده است و در شکل ۳ نمایش داده شده است. طول لوله‌ها برابر ۱۲ کیلومتر و ضریب هیزن ویلیامز برای همه لوله‌ها ۱۳۰ است. گره شماره ۱ مخزن شبکه آب است که ارتفاع آن از ۱۰ الی ۱۰۰ متر تغییر می‌کند، تا بدین وسیله بتوان اثرات تغییر متوسط فشار آب در شبکه آب را بر روی هزینه‌ها مربوط به مصرف انرژی در پمپ‌های خانگی و هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری شبکه آب مشاهده نمود.



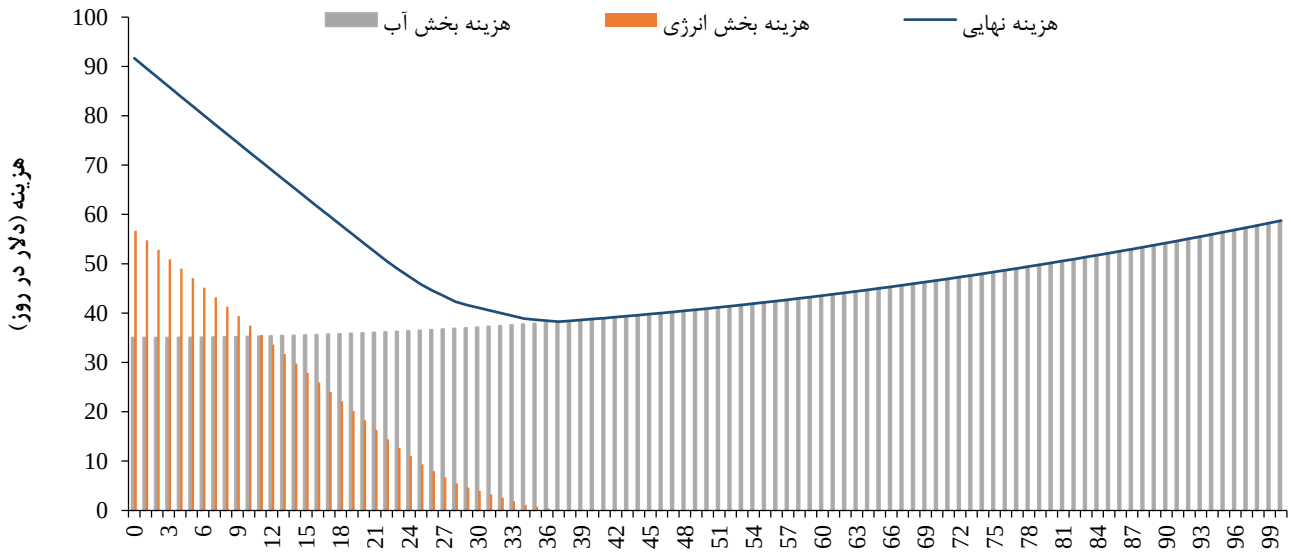
شکل ۳- شماتیک شبکه ۴ حلقه‌ای شامل ارتفاع گره برحسب متر، تقاضای آب برای هر گره برحسب مترمکعب بر ساعت و تعداد طبقات هر واحد موجود در هر گره

برای شبکه مذکور موارد مندرج در جدول ۱ به‌عنوان پیش‌فرض درنظر گرفته شده است.

جدول ۱- داده‌های پایه مورد نیاز برای شبکه ۴ حلقه‌ای

بخش	پارامتر	قیمت
آب	قیمت آب	0.5 $/m^3
	N_1	۱
	شکستگی مشاهده شده	۱ عدد در روز
	شکستگی مشاهده نشده	۱ عدد در روز
	N_2	۳
	هزینه رفع هر شکستگی	۳۵$
	میزان نشت روزانه	۴۰۰ لیتر
انرژی	هزینه انرژی	۰/۲ دلار برای هر کیلو وات ساعت
	ارتفاع هر طبقه	۳/۲ متر

نتیجه این بررسی در شکل ۴ نمایش داده شده است. براساس این نمودار با افزایش متوسط فشار آب در شبکه توزیع آب مورد بررسی، مشاهده می‌شود که مصرف انرژی پمپ‌های خانگی کاهش خواهد یافت و هنگامی‌که متوسط فشار به مقدار ۳۸ متر می‌رسد این مقدار برابر با صفر خواهد شد. از سوی دیگر با افزایش متوسط فشار آب در شبکه توزیع هزینه‌های مربوط به بهره‌برداری و نگهداری افزایش خواهد یافت. نقطه بهینه فشار برای این مورد در متوسط فشار ۳۸ متر محقق خواهد شد. در این فشار مجموع هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری از شبکه توزیع و همچنین هزینه مصرف انرژی برابر با ۳۸ دلار در هر روز خواهد بود.



شکل ۴- نمودار بهینه‌سازی فشار آب در شبکه

۳-۲- شبکه شهر بهارستان

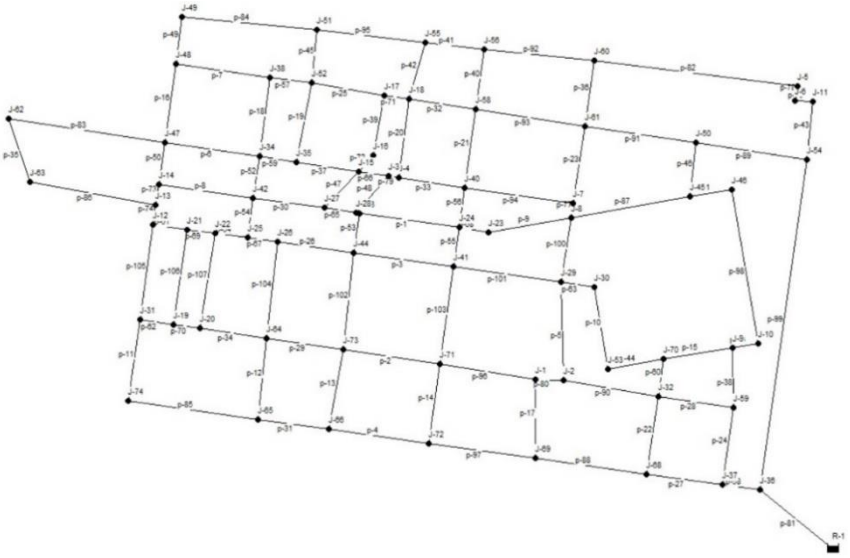
مدل توسعه داده شده در تحقیق حاضر بر روی شبکه شهر بهارستان، واقع در استان اصفهان، مورد بررسی قرارگرفته است. این شبکه از ۷۱ گره، ۱۰۷ لوله، یک مخزن و یک شیر فشارشکن برای تغییر فشار متوسط شبکه تشکیل شده است. مشخصات گره‌ها و لوله‌ها به‌ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. با توجه به پلی‌اتیلن بودن جنس لوله‌ها ضریب هیزن-ویلیامز برای هر لوله ۱۳۰ درنظر گرفته‌شده است. شماتیک شبکه در شکل ۵ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات گره‌های شبکه توزیع شهر بهارستان

گره	ارتفاع (متر)	تقاضا (لیتر بر ثانیه)	گره	ارتفاع (متر)	تقاضا (لیتر بر ثانیه)	گره	ارتفاع (متر)	تقاضا (لیتر بر ثانیه)
1	1592	8	25	1551	8	49	1565	4
2	1575	3	26	1556	16	50	1571	2
3	1583	8	27	1566	15	51	1573	2
4	1572	7	28	1570	6	52	1585	4
5	1585	1	29	1569	8	53	1586	2
6	1585	8	30	1566	13	54	1556	4
7	1592	7	31	1563	10	55	1555	4
8	1588	7	32	1566	5	56	1559	4
9	1588	7	33	1565	5	57	1559	3
10	1584	5	34	1562	9	58	1571	4
11	1569	7	35	1554	10	59	1573	1
12	1568	12	36	1596	4	60	1576	4
13	1562	12	37	1598	4	61	1557	1
14	1553	13	38	1561	3	62	1586	5
15	1590	2	39	1563	4	63	1586	4
16	1559	3	40	1589	4	64	1567	4
17	1552	7	41	1586	1	65	1567	5
18	1550	4	42	1574	9	66	1556	2
19	1552	7	43	1572	9	67	1554	1
20	1566	4	44	1563	3	68	1561	6
21	1584	8	45	1563	10	69	1561	2
22	1554	8	46	1568	5	70	1579	2
23	1551	12	47	1569	2	71	1579	4
24	1565	5	48	1563	5			

جدول ۳- مشخصات لوله‌های شبکه توزیع شهر بهارستان

لوله	طول (متر)	قطر (میلی‌متر)	لوله	طول (متر)	قطر (میلیمتر)	لوله	طول (متر)	قطر (میلی‌متر)
1	675	180	37	407	140	73	132	280
2	657	500	38	400	180	74	130	140
3	657	280	39	393	100	75	113	450
4	657	500	40	390	450	76	111	140
5	638	250	41	387	100	77	91	125
6	620	250	42	380	100	78	85	560
7	618	100	43	379	355	79	60	630
8	618	450	44	363	140	80	1	225
9	544	355	45	353	315	81	604	560
10	539	280	46	349	450	82	1324	500
11	534	250	47	321	630	83	1023	400
12	528	280	48	316	280	84	875	180
13	524	100	49	305	125	85	846	500
14	519	280	50	275	100	86	829	500
15	515	100	51	274	125	87	781	500
16	515	125	52	269	225	88	729	630
17	514	450	53	262	100	89	727	280
18	513	355	54	262	100	90	727	225
19	512	225	55	262	500	91	726	500
20	511	140	56	257	100	92	718	500
21	510	450	57	250	315	93	714	100
22	508	100	58	248	560	94	709	280
23	508	280	59	243	160	95	706	100
24	505	500	60	239	125	96	698	355
25	500	100	61	223	100	97	693	280
26	498	315	62	219	280	98	1010	140
27	496	400	63	216	125	99	2156	160
28	492	315	64	209	125	100	422	180
29	479	100	65	205	100	101	704	225
30	470	560	66	199	630	102	629	160
31	464	450	67	195	225	103	633	140
32	438	180	68	191	500	104	625	125
33	438	630	69	185	125	105	619	100
34	435	100	70	177	200	106	620	180
35	432	500	71	161	100	107	622	280
36	429	140	72	143	125			



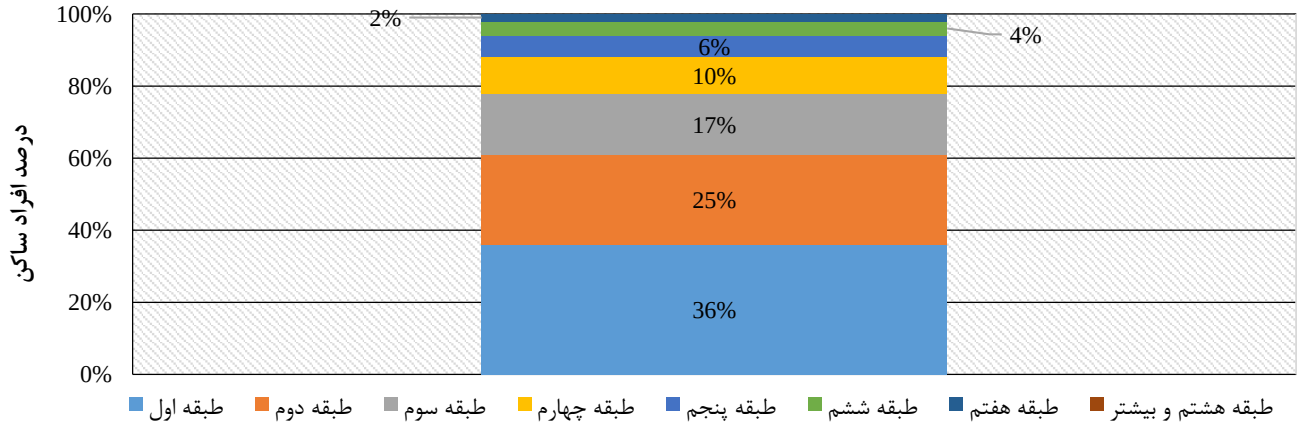
شکل ۵- شماتیک شبکه توزیع شهر بهارستان

داده‌های مورد نیاز برای اجرای بخش آب و انرژی مدل جمع‌آوری شد (جدول ۴). مقادیر برخی از پارامترها (به‌عنوان مثال، نشت پایه، تعدد شکستگی پایه، توان نشت، توان شکستگی و تقاضای پایه هر گره و اطلاعات مربوط به آن) از داده‌های

سال‌های گذشته جمع‌آوری شده است. هنگام محاسبه مقدار انرژی مصرف شده توسط سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی، چندین نوع اطلاعات توسط مدل فرض شده است. این اطلاعات شامل تعداد ساختمان‌ها، شماره طبقه مربوطه و تعداد افراد ساکن در هر طبقه بود. شکل ۶ سهم افرادی که در طبقات مختلف ساختمان‌های شهر بهارستان زندگی می‌کنند را نشان می‌دهد. اطلاعات جمع‌آوری شده از بررسی می‌دانی و سازمان‌ها و ارگان‌های مربوطه به‌دست‌آمده‌است.

جدول ۴- داده‌های پایه مورد نیاز مدل

داده‌های مورد نیاز نرم افزار EPANET		
مقدار تقاضای کل		۴۰۷ (لیتر برثانیه)
طول کل لوله های شبکه		۵۱۱ (کیلومتر)
داده‌های مورد نیاز برای محاسبه مبتنی بر فشار Q_j^{avl}		
هد حداقل	H_j^{min}	۰ (متر)
هد حداقل مورد نیاز	H_j^{des}	۳۰ (متر)
هد حداکثر	H_j^{max}	۱۰۰ (متر)
توان رابطه دبی- فشار	N	۲/۰۸
داده‌های مورد نیاز برای محاسبه هزینه نشت		
نشت پایه (فرض)	L_0 ($h_{avl.0}$ = 45m)	Q_j^{avl}×۰/۲ (لیتر بر ثانیه)
توان نشت	N	۱/۲
قیمت آب	c_w	۱۵۰۰۰ (ریال به ازای هر مترمکعب)
داده‌های مورد نیاز برای محاسبه هزینه شکستگی‌ها		
تعداد شکستگی پایه	BF_0 ($h_{avl.0}$ = 45 m)	۴ (تعداد در روز)
تعداد شکستگی مستقل از فشار	BF_{npd}	۱ (تعداد در روز)
توان شکستگی	N_2	۳ (تعداد در روز)
هزینه رفع شکستگی لوله	c_B	۲۴۰۰۰۰۰۰ (ریال به ازای هر شکستگی)
داده‌های مورد نیاز برای محاسبه توان مصرف‌شده توسط سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی		
جمعیت		۷۹۰۲۳
تعداد خانوار		۲۵۱۱۸
تعداد ساختمان‌ها		۱۱۰۸۱
ارتفاع طبقات		۳/۱ (متر)
راندمان عملکردی بوستر پمپ		٪۳۰
داده‌های مورد نیاز برای محاسبه هزینه انرژی		
قیمت انرژی (c_E)	ساعت ۱۱ شب الی ۸ صبح	۱۹۲۰ (ریال به ازای هر کیلووات)
	ساعت ۸ صبح الی ۴ بعد از ظهر	۲۴۰۰ (ریال به ازای هر کیلووات)
	ساعت ۴ بعد از ظهر الی ۱۱ شب	۳۱۲۰۰ (ریال به ازای هر کیلووات)



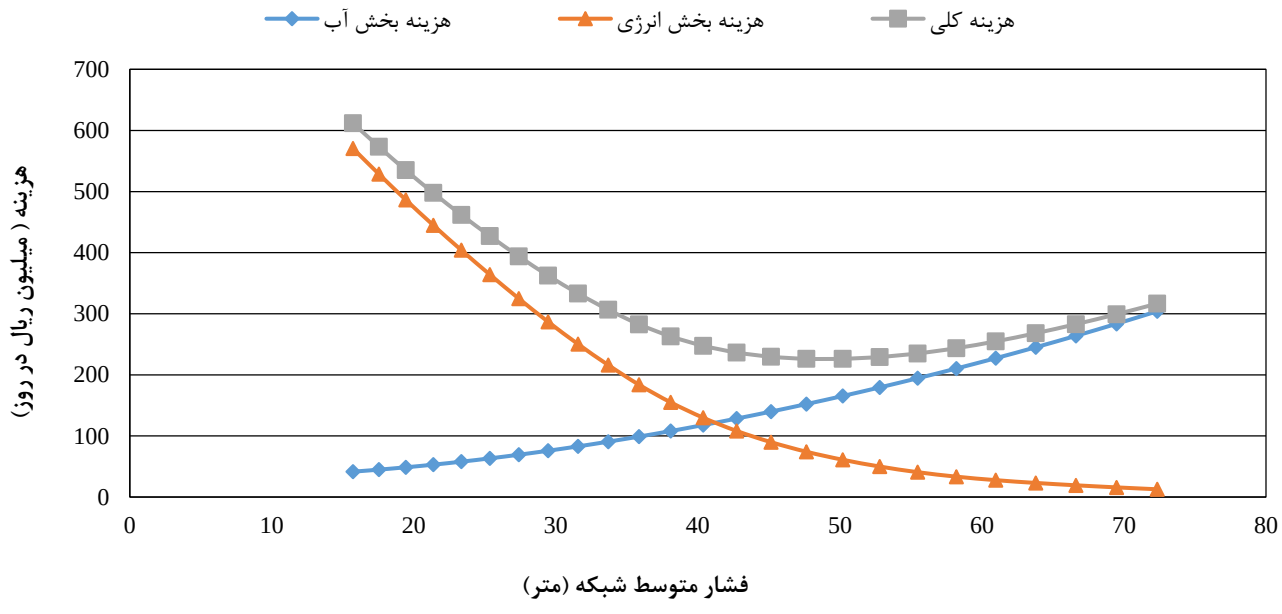
شکل ۶- سهم افراد ساکن در طبقات مختلف

۴- نتایج و بحث

در این قسمت مدل بهینه‌سازی فشار توسعه داده شده در این مقاله که برای یک مثال واقعی مورد بررسی قرار گرفته، بررسی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است با افزایش فشار متوسط شبکه، انرژی مصرف شده توسط سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی کاهش می‌یابد، در حالی‌که میزان نشت و شکستگی هم افزایش می‌یابد. مطابق مدل توسعه داده شده، متوسط فشار بهینه آب در شهر بهارستان ۴۷/۶ $m\ H_2O$ است. با درنظر گرفتن این فشار، هزینه روزانه مصرف انرژی سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی، همراه با هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری شبکه، در مجموع در حدود ۲۲۴ میلیون ریال است. اگر فشار کمتر شود، هزینه‌های عملیاتی و نگهداری کاهش می‌یابد، در حالی‌که انرژی مصرف شده توسط سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد.

این موضوع اهمیت استفاده از یک رویکرد یکپارچه نسبت به آب و انرژی در مورد فشار متوسط شبکه آب را نشان می‌دهد. در این فشار بهینه هزینه‌های بخش انرژی برابر با ۷۲ میلیون ریال در روز و هزینه‌های بخش آب برابر با ۱۵۲ میلیون ریال در روز خواهد بود. در حال‌حاضر با توجه به این‌که رویکرد یکپارچه‌ای که در این مقاله توسعه داده شده است در واقعیت مورد پیگیری قرار نگرفته است، متوسط فشار شبکه برابر با ۲۱ $m\ H_2O$ است. این اقدام باعث شده است که هزینه‌های بخش آب برابر با ۷۰ میلیون ریال در روز و هزینه‌های بخش انرژی برابر با ۴۵۰ میلیون ریال در روز شود. هرچند پایین‌تر قرارگرفتن فشار شبکه از مقدار بهینه باعث کاهش هزینه‌های بخش آب شده است. اما این موضوع هزینه‌های بخش انرژی را به‌شدت افزایش داده است، به طوری‌که مجموع هزینه هر دو بخش نسبت به زمانی که رویکرد یکپارچه توسعه داده شده در این مقاله درنظر گرفته شود به‌میزان ۲۹۶ میلیون ریال در روز افزایش خواهد یافت.

سطح فشار مطلوب تعیین شده بستگی زیادی به شرایط محلی دارد. کنترل فشار آب با افزایش سن لوله‌ها اهمیت فزاینده‌ای پیدا می‌کند. علاوه‌بر این، با گذشت زمان، محله‌های با بافت فرسوده موجود با ساختمان‌های چند طبقه جایگزین می‌شوند که باعث افزایش متوسط فشار مطلوب می‌شوند. بدیهی است که تأثیر پیچیده هرگونه تغییر در شرایط محلی بر قیمت آب و انرژی و فشار مطلوب، سیاستگذاران را به استفاده از رویکردی پویا برای مواجهه با این چالش‌ها ترغیب می‌کند.



شکل ۷- نتایج مدل برای محاسبه فشار متوسط شبکه

افزایش هم‌زمان قیمت آب و انرژی هرچند باعث افزایش هزینه بهینه می‌شود، اما فشار بهینه ثابت باقی می‌ماند. به‌عنوان مثال افزایش هم‌زمان قیمت آب و انرژی به میزان ۴۰ درصد باعث افزایش ۲۹ درصدی در هزینه بهینه خواهد شد. پارامتر توان نشت، بیشترین تأثیر را در هزینه بهینه دارد. به بیان دیگر هزینه بهینه نسبت به توان نشت بیشترین حساسیت را دارد. این موضوع درحالی است که فشار بهینه حساسیت چندانی نسبت به این پارامتر ندارد. تغییر پارامتر توان فشار از ۶ الی ۴/۲ باعث افت

میزان هزینه بهینه از مقدار ۱۶۵۰ به ۶۷۰ دلار در روز می‌شود. بازدهی پمپ‌های خانگی پارامتری است که می‌توان با ارائه آموزش‌ها و قوانین لازم در زمینه انتخاب پمپ مناسب نسبت به کاهش هزینه بهینه شده اقدام نمود. در صورتی‌که بتوان بازدهی این پمپ‌ها را به مقدار ۴۰ درصد رساند هزینه بهینه شده برابر با ۸۹۰ دلار در روز و فشار بهینه برابر با ۴۰ m H_2O می‌شود. تأثیر پارامتر هدررفت واقعی در فشار بهینه موضوعی است که بررسی آن اهمیت ویژه‌ای دارد. در صورتی‌که میزان هدررفت واقعی به‌مقدار ۴ درصد کاهش یابد فشار و هزینه بهینه به‌ترتیب برابر با ۵۶ m H_2O و ۵۶۰ دلار در روز خواهد شد. هم‌چنین در صورتی‌که این پارامتر برابر با ۳۶ درصد درنظر گرفته شود، فشار و هزینه بهینه برابر با ۴۳ m H_2O و ۱۳۶۰ دلار در روز خواهد شد.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش تعداد ساختمان‌های چند طبقه در شهرها، انرژی مصرف شده توسط سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی (پمپ و مخزن) در سال‌های اخیر افزایش یافته است و شرکت‌های آب و فاضلاب علاقه زیادی به کاهش فشار متوسط شبکه برای کاهش هزینه‌های عملیاتی و نگهداری خود دارند. با این حساب، این مطالعه یک روش اقتصادی مبتنی بر هزینه‌های بخش انرژی و بخش آب توسعه داده است که فشار شبکه را بر اساس شرایط محلی بهینه می‌کند. برخی از نتایج تحقیق حاضر عبارتند از:

- بدون رویکرد یکپارچه به بخش‌های آب و انرژی، انتخاب فشار بهینه برای هر شبکه می‌تواند از میزان بهینه آن فاصله داشته باشد.
- فشار مطلوب به چندین متغیر مربوط به بخش آب بستگی دارد (به‌عنوان مثال، نیاز و افزایش تقاضای هر گره، وضعیت هیدرولیکی شبکه، اتلاف واقعی آب از شبکه، تعدد شکستگی‌ها و قیمت آب)، و هم‌چنین برخی متغیرهای مربوط به بخش انرژی (به‌عنوان مثال ارتفاع ساختمان، شرایط سیستم‌های تقویت‌کننده فشار خانگی و قیمت انرژی).
- درحال حاضر با توجه به این‌که فشار متوسط شبکه در حدود ۲ بار است، علی‌رغم پایین بودن هزینه‌های نگهداری از شبکه و بخش آب شبکه آبرسانی شهر، هزینه‌های بخش انرژی بسیار بالا بوده و در مجموع هزینه‌های یکپارچه آب و انرژی سیستم در حدود ۸۰۰ دلار بیشتر از مقدار بهینه است که باید با بهینه‌سازی فشار متوسط شبکه، به سمت کاهش هزینه‌ها حرکت کرد.
- فشار بهینه شبکه آب براساس اندازه‌گیری‌های روزانه در این تحقیق ۴۷/۶ mH_2O (کل هزینه روزانه = ۲۲۴ میلیون ریال) به‌دست‌آمد. برای فشار ۴۱ mH_2O هزینه‌های بخش انرژی و آب باهم برابر می‌شود.
- فشار مطلوب را می‌توان روزانه یا ساعتی محاسبه کرد. به‌دلیل حساسیت مدل به الگوی مصرف ساعتی آب و قیمت‌های انرژی، پیشنهاد می‌شود متوسط فشار در بازه‌های ساعتی هم محاسبه و بررسی شود.
- برای بررسی حساسیت مدل به پارامترهای تأثیرگذار در آن با آنالیز حساسیت انجام شده، تأثیرات تغییر در هرکدام از آیتم‌های هزینه‌های بخش آب و انرژی، توان نشت، بازدهی پمپ و هدررفت واقعی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد توان نشت بیشترین تأثیر در هزینه بهینه دارد، درحالی‌که افزایش هم‌زمان قیمت آب و انرژی در میزان فشار بهینه تغییری ایجاد نمی‌کند. افرایش راندمان پمپ‌ها باعث کاهش هزینه بهینه و همچنین کاهش فشار بهینه می‌شود. هم‌چنین تأثیر میزان هدررفت واقعی قابل‌ملاحظه بوده به‌طوری‌که کاهش ۴ درصدی این پارامتر باعث افزایش حدود ۱۰ متر فشار بهینه و کاهش هزینه بهینه می‌شود.

۵- مراجع

عطاری، م.، و فغفور مغربی، م.، (۱۳۹۷)، "روش نوین نشت‌یابی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی"، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۹(۱)، ۱۴-۲۶.

مصلحی، ا.، جلیلی قاضی زاده، م.، و یوسفی خوش قلب، ا.، (۱۳۹۸)، "تعیین سطح اقتصادی نشت در شبکه‌های توزیع آب"، *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۵(۴)، ۳۵-۵۴.

مصلحی، ا.، جلیلی قاضی زاده، م.، و یوسفی خوش قلب، ا.، (۱۳۹۹)، "تحلیل اقتصادی مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب"، *مجله آب و فاضلاب*، ۳۱ (۲)، ۱۰۰-۱۱۷.

یوسفی خوش قلب، ا.، مصلحی، ا.، جلیلی قاضی زاده، م.، و غمخوار، ه.، (۱۴۰۰)، "مروری بر روش‌های تحلیل اقتصادی نشت در شبکه‌های توزیع آب"، *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۷(۱)، ۶۸-۱۰۱.

Creaco, E., and Walski, T., (2017), "Economic analysis of pressure control for leakage and pipe burst reduction", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(12), 04017074.

Deyi, M., Van Zyl, J., and Shepherd, M., (2014),

water distribution networks", *Control Engineering Practice*, 95, 104232.

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

"Applying the FAVAD concept and leakage number to real networks: A case study in Kwadabeka, South Africa", *Procedia Engineering*, 89, 1537-44.

Fabbiano, L., Vacca, G., and Dinardo, G., (2020), "Smart water grid: A smart methodology to detect leaks in water distribution networks", *Measurement*, 151, 107260.

Fan, X-Y., Klemeš, J.J., Jia, X., and Liu, Z-Y., (2019), "An iterative method for design of total water networks with multiple contaminants", *Journal of Cleaner Production*, 240, 118098.

Filion, Y.R., MacLean, H.L., and Karney, B.W., (2004), "Life-cycle energy analysis of a water distribution system", *Journal of Infrastructure Systems*, 10(3), 120-30.

Hashemi, S.S., Tabesh, M., and Ataeekia, B., (2014), "Ant-colony optimization of pumping schedule to minimize the energy cost using variable-speed pumps in water distribution networks", *Urban Water Journal*, 11(5), 335-347.

Jung, D., and Kim, J.H., (2018), " Water distribution system design to minimize costs and maximize topological and hydraulic reliability", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(9), 06018005.

Kanakoudis, V., and Tolikas, D., (2001), "The role of leaks and breaks in water networks: Technical and economical solutions", *Journal of Water Supply: Research and Technology AQUA*, 50 (5), 301-311.

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

Lima, G.M., Brentan, B.M., and Luvizotto, Jr.E., (2018), "Optimal design of water supply networks using an energy recovery approach", *Renewable Energy*, 117, 404-413.

Marques, J., Cunha, M., and Savić, D., (2018), "Many-objective optimization model for the flexible design of water distribution networks", *Journal of environmental management*, 226, 308-319.

Monsef, H., Naghashzadegan, M., Jamali, A., and Farmani, R., (2019), "Comparison of evolutionary multi objective optimization algorithms in optimum design of water distribution network", *Ain Shams Engineering Journal*, 10(1), 103-111.

Puust, R., Kapelan, Z., Savic,D., and Koppel, T., (2010), "A review of methods for leakage management in pipe networks", *Urban Water Journal*, 7 (1), 25-45.

Shirzad, A., Tabesh, M., (2012), "Study of pressure-discharge relations in water distribution networks using field measurements", *IWA World Water Congress and Exhibition*, Busan, S. Korea.

Tabesh, M., Shirzad,A., Arefkhani, V., and Mani, A., (2014), "A comparative study between the modified and available demand driven based models for head driven analysis of water distribution networks", *Urban Water Journal*, 11 (3), 221-230.

Zhang, Y., Li, S., Zheng, Y., and Zou, Y., (2020), "Multi-model based pressure optimization for large-scale