

The Effect of Demand Management Using Optimal Pressure Regulation in WDNs During Normal and Water Scarcity Conditions

M. Khashei¹, M. Tabesh², S. A. R. Shahangian³, M. Abbasi⁴

1. MSc. of Civil Engineering-Environmental Engineering, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2. Prof., School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran (Corresponding Author) mtabesh@ut.ac.ir
3. PhD., School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received Dec. 9, 2021 Accepted July 2, 2022)

To cite this article:

Khashei, M., Tabesh, M., Shahangian, S. A. R., Abbasi, M. 2023. "The effect of demand management using optimal pressure regulation in WDNs during normal and water scarcity conditions"
Journal of Water and Wastewater, 33(5), 1-18. Doi: 10.22093/wwj.2022.318859.3206. (In Persian)

Abstract

Paying attention to the conservation of water resources in order to prevent water crises is one of the most important duties of people in the community, including officials. In this regard, the most effective action is water demand management, for which there are different methods. One of these methods is pressure management in order to demand management, which can be used in normal operating conditions as well as in the event of water scarcity. On the other hand, in critical situations where the available water does not meet the total demand, policies such as intermittent water supply are adopted, which are associated with many problems. Therefore, an alternative method is needed to minimize the disadvantages of intermittent water supply, to meet the objectives of demand management and, at the same time is feasible, efficient, and economical. In this research, a combined simulation and optimization model is created by using EPANET2.2 and MATLAB software. With this model, the effects of adopting a water demand management approach using pressure management on the hydraulics of water distribution networks will be investigated. In this research, optimization is done in two approaches. In each case, a different objective function is defined and a genetic algorithm is used for optimization. The developed model has been analyzed on the WDN of Baharestan city located in Isfahan province. The results show that the model is able to reduce the average network pressure by 8 meters by finding the optimal location and adjusting pressure for pressure-reducing valves under normal conditions. Also, during water scarcity, it is able to distribute the available water among the demand nodes considering equity and justice principles. After imposing an 8% deficit on the network, without applying for a pressure management program, 8 demand nodes experienced a shortage between 15 and 30% and 19 experienced a deficit below 5%. However, after optimizing the pressure, only 3 demand nodes experienced a shortage between 15 and 25% and 6 nodes experienced a shortage of less than 5%.

Keywords: Demand Management, Pressure Management, Water Distribution Network, Simulation, Genetic Algorithm.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۳، شماره ۵، صفحه: ۱۸-۱

تأثیر مدیریت تقاضا با استفاده از تنظیم بهینه فشار در شبکه‌های توزیع آب در حالت نرمال و کمبود آب

ملیکا خاشعی^۱، مسعود تابش^۲، سید احمدرضا شاهنگیان^۳، مهناز عباسی^۱

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مهندسی محیط‌زیست،

پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- استاده، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی،

دانشگاه تهران، تهران، ایران

(نویسنده مسئول) mtabesh@ut.ac.ir

۳- دکتر، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی،

دانشگاه تهران، تهران، ایران

پذیرش (۱۴۰۱/۴/۱۱)

(دریافت ۱۴۰۰/۹/۱۸)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

خاشعی، م.، تابش، م.، شاهنگیان، س.ا.ر.، عباسی، م.، ۱۴۰۱، "تأثیر مدیریت تقاضا با استفاده از تنظیم بهینه فشار در شبکه‌های توزیع آب

در حالت نرمال و کمبود آب" مجله آب و فاضلاب، ۳۳(۵)، ۱۸-۱. Doi: 10.22093/wwj.2022.318859.3206

چکیده

توجه به حفظ منابع آبی به منظور جلوگیری از مواجه شدن با بحران آب، یکی از مهم‌ترین وظایف عموم افراد جامعه از مسئولان است. در این خصوص مهمترین اقدامی که می‌تواند در عبور از بحران‌های آبی مؤثر باشد، مدیریت تقاضای آب است که روش‌های متفاوتی برای آن وجود دارد. یکی از این روش‌ها مدیریت فشار در راستای مدیریت تقاضا است که می‌تواند در شرایط عادی بهره‌برداری و همچنین شرایط وجود بحران کم‌آبی استفاده شود. از سوی دیگر در شرایط بحرانی که آب در دسترس، تقاضای کل را برآورده نمی‌کند، سیاست‌هایی مانند جیره‌بندی و تأمین آب به‌روش نوبتی اتخاذ می‌شود که با مشکلات فراوانی همراه است. بنابراین نیاز به روشی جایگزین که معایب جیره‌بندی را حداقل کند و نیز اهداف مدیریت تقاضا را برآورده کند و در عین حال قابل اجرا، زودبازده و اقتصادی باشد احساس می‌شود. در این پژوهش، به کمک یک مدل ترکیبی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی که با تلفیق نرم‌افزارهای EPANET2.2 و MATLAB ایجاد شد، تأثیرات اتخاذ رویکرد مدیریت تقاضای آب با استفاده از تنظیم فشار در حالت عادی و کمبود آب، بر هیدرولیک شبکه توزیع بررسی شد. بهینه‌سازی در این پژوهش در دو حالت انجام شد که در هر حالت تابع هدف متفاوتی تعریف شد. برای بهینه‌سازی نیز از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. مدل توسعه‌یافته بر روی شبکه توزیع آب شهر جدید بهارستان واقع در استان اصفهان تحلیل شد و نتایج به‌دست آمده نشان داد، مدل توانسته با استفاده از یافتن مکان و فشار تنظیمی بهینه برای شیرهای فشارشکن، در شرایط عادی، فشار متوسط شبکه را تا ۸ متر کاهش دهد و در شرایط وجود کمبود، آب در دسترس را به‌صورت عادلانه میان گره‌های تقاضا توزیع کند. به‌طوری که پس از تحمیل کمبود ۸ درصدی به شبکه، بدون اعمال برنامه مدیریت فشار، ۸ گره مصرف کمبودی بین ۱۵ تا ۳۰ درصد و ۱۹ گره کمبود زیر ۵ درصد را تجربه کردند. در حالی که پس از بهینه‌سازی فشار توسط مدل تنها ۳ گره تقاضا کمبودی بین ۱۵ تا ۲۵ درصد و ۶ گره کمبود زیر ۵ درصد را تجربه کردند.

واژه‌های کلیدی: مدیریت تقاضا، مدیریت فشار، شبکه توزیع آب، شبیه‌سازی، الگوریتم ژنتیک



۱- مقدمه

از آنجا که بسیاری از فعالیت‌های شهری، به دسترسی کافی به منابع تأمین آب وابسته بوده و همچنین عمده جمعیت و فعالیت‌های اقتصادی-اجتماعی جهان در مناطق شهری متمرکز شده، دستیابی به امنیت آب شهری اهمیت ویژه‌ای دارد (Shahangian et al., 2022). با این حال دستیابی به امنیت آب در این مناطق، به چالشی اساسی برای سیاست‌گذاران تبدیل شده است (Shahangian et al., 2021a). بنابراین، با توجه به اینکه توسعه شهری پایدار نیازمند به حداقل رساندن مصرف آب توسط شهروندان است، کاهش تقاضای آب به جنبه حیاتی و مهمی از برنامه‌های مدیریت آب تبدیل شده است (Shahangian et al., 2022).

مدیریت تقاضای آب که در دهه‌های اخیر به‌عنوان راه‌حلی برای کاهش مصرف آب شهرها مطرح شده است (Stavnhagen et al., 2018) همان کلیدی در دستیابی به امنیت آب شهری محسوب می‌شود (Fielding et al., 2013). مدیریت تقاضای آب، شامل اتخاذ سیاست‌ها یا سرمایه‌گذاری توسط شرکت‌های متولی آب و همچنین مردم برای دستیابی به استفاده مؤثر و بهینه از آب توسط کلیه اعضای جامعه است. مدیریت تقاضا شامل اقداماتی مانند تنظیم نرخ آب‌بها، تبلیغات و آموزش‌های مصرف صحیح، استفاده از ابزار کاهنده مصرف، برنامه‌های تشخیص نشت و تعمیر شبکه و اعمال محدودیت‌های مصرف آب می‌شود (Dziegielewski, 2003, Tortajada et al., 2019, Zapana-Churata et al., 2022).

در این میان، اگرچه سیاست‌های اعمال محدودیت‌های مصرف آب، مقبولیت اجتماعی کمتری نسبت به سایر اقدامات دارند، اما در شرایط بحرانی (کمبود شدید آب) شاید اولین راهکار زودبازده و مؤثر از دیدگاه متولیان صنعت آب به نظر برسند. برای مثال، تأمین نوبتی آب^۱ (جیره‌بندی آب) در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، از جمله در حدود یک سوم آفریقا، نیمی از آسیا، دو سوم آمریکای لاتین و ۹۱ درصد از آسیای جنوب شرقی، به‌عنوان یک روش در راستای کنترل تقاضا اعمال می‌شود (Simukonda et al., 2018).

در حالت تأمین نوبتی، مشترکین در بعضی از ساعات شبانه روز و یا حتی در برخی روزهای هفته، قادر به برداشت از شبکه توزیع

آب نخواهند بود و فقط در زمان‌های از پیش تعیین‌شده، می‌توانند به آب دسترسی داشته باشند (Vairavamoorthy et al., 2007, Li et al., 2020). این در حالی است که اعمال این رویکرد تأمین، نه تنها مصرف‌کنندگان آب (مشترکین) بلکه متولیان صنعت آب را نیز با مشکلاتی مواجه می‌کند (Simukonda et al., 2018) و اثرات نامطلوب متعددی از جنبه‌های مختلف اجتماعی، هیدرولیکی، کیفی و اقتصادی در پی دارد، از جمله: کاهش عمر مفید اجزای شبکه بر اثر باز و بسته شدن مکرر شیرآلات، افزایش حوادث و به‌تبع آن هدررفت بیشتر آب، توزیع ناعادلانه آب و عدم رضایت مشترکین از کیفیت آب شبکه، هزینه تأمین آب به روش نوبتی (مانند نیروی کار اضافی برای باز و بسته کردن شیرآلات یا هزینه مکانیزه کردن این فرایند (Charalambous, 2012, Simukonda et al., 2018, Robroek, 2019, Preciado et al., 2021) در نتیجه بهتر است روشی برای جایگزینی با این سیاست در مقابله با بحران کم‌آبی و اعمال مدیریت تقاضا معرفی شود که این اثرات نامطلوب را کاهش دهد و یا حذف کند.

ایران نیز مانند بسیاری از کشورهای واقع در منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا^۲، با بحران‌های شدید آب روبه‌رو است که از دهه ۱۹۶۰ با کاهش پتانسیل سرانه آب در دسترس در ایران شروع شد و پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۵۰، با کاهش ۵۰ درصدی این سرانه، شرایط بدتر نیز بشود (Shahangian et al., 2021a). اگرچه بیش از ۷۰ درصد جمعیت ایران در مناطق شهری زندگی می‌کنند، اما مشکل کمبود آب سبب شده تا کلان‌شهرهای ایران با مشکلات عدیده‌ای در زمینه تأمین و توزیع آب، به‌ویژه در ماه‌های گرم و خشک سال مواجه باشند (Shahangian et al., 2022).

کمبود شدید آب در سال‌های اخیر و در برخی از استان‌های کشور از جمله استان اصفهان، متولیان صنعت آب را به سمت استفاده از رویکرد مدیریت فشار به‌منظور کاهش حجم آب در دسترس مشترکین (مدیریت تقاضای آب در شرایط کم‌آبی با استفاده از مدیریت فشار) که با کاهش فشار شبکه به کمتر از محدوده مطلوب آن عملیاتی می‌شود، سوق داده است (Abbasi et al., 2022). این حالت تأمین با روش جیره‌بندی متفاوت بوده؛ به‌نحوی که در تمامی ساعات شبانه‌روز برداشت آب از گره‌های

² The Middle East and North Africa (MENA)

¹ Water Supply Intermittency



از شیرهای PRV می‌تواند بهتر از RTC باشد (Creaco and Walski, 2017).

لطیفی و همکاران در پژوهشی، از مدیریت فشار برای کاهش نشت و مصارف وابسته به فشار و نیز کاهش ترکیدگی لوله‌ها و در نتیجه افزایش قابلیت اطمینان هیدرولیکی شبکه توزیع استفاده کردند. آنها به منظور یافتن مکان و فشار تنظیمی شیرهای فشارشکن با خروجی ثابت، یک مدل شبیه‌ساز و بهینه‌ساز چند هدفه توسعه دادند و برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی به ترتیب از تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار و الگوریتم ژنتیک بهره گرفتند (Latifi et al., 2018).

در حالی که هدف بیشتر پژوهش‌هایی که در زمینه مدیریت فشار انجام شده‌اند، کاهش نشت یا اضافه برداشت ناشی از اضافه فشار موجود در شبکه بوده است (AbdelMeguid and Ulanicki, 2010, Berardi et al., 2015, Covelli et al., 2016, Dai, 2018, Koşucu et al., 2021) تا پیش از این، فقط صفرپور و همکاران تأثیرات محیط‌زیستی سیاست مدیریت تقاضای آب در شرایط کم‌آبی با استفاده از مدیریت فشار را و آن هم صرفاً بر روی سیستم فاضلاب شهری (شامل شبکه جمع‌آوری و تصفیه‌خانه فاضلاب) (Safarpour et al., 2022) و عباسی و همکاران که اثرات این سیاست را از بعد اثرات محیط‌زیستی آن بر روی سامانه‌های آب (شامل ایستگاه پمپاژ و شبکه توزیع آب) (Abbasi et al., 2022) بررسی کرده‌اند. بنابراین هیچ‌گونه شواهدی تاکنون مبنی بر ارزیابی تأثیر اعمال سیاست مدیریت فشار به‌منظور کاهش دسترسی به آب بر روی شرایط هیدرولیکی شبکه توزیع آب، وجود ندارد. از این‌رو، از آنجا که اعمال هرگونه سیاستی در حوزه مدیریت آب شهری، می‌تواند تبعات مثبت و منفی گسترده‌ای از ابعاد مختلف (از جمله اجتماعی، فنی و محیط‌زیستی) بر سیستم داشته باشد (Safarpour et al., 2022)، بررسی تبعات چنین سیاستی از هر یک از جنبه‌های تأثیرگذار بر سیستم بسیار حائز اهمیت است.

همچنین در پژوهش‌های گذشته، استفاده از شیرهای فشارشکن برای توزیع عادلانه آب در دسترس میان مشترکین، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در حالی که این شیرها می‌توانند ابزاری کارآمد برای توزیع یکنواخت کمبود میان گره‌های تقاضا در زمان تنش آبی باشند. در شرایط وجود کمبود آب، مصرف‌کنندگان تلاش

مصرف امکان‌پذیر خواهد بود، ولی با توجه به کاهش فشار از فشار مطلوب موردنیاز مشترکین، برداشت تنها بخشی از تقاضا امکان‌پذیر خواهد بود (Khashei et al., 2021, Khashei et al., 2020). در واقع متولیان صنعت آب در این استان‌ها، در مواجهه با بحران کم‌آبی و با در نظر داشتن پیامدهای نامطلوب سیاست جیره‌بندی به لحاظ اثرگذاری نامطلوب آن بر جنبه‌های مختلف سیستم از جمله اجتماعی، اقتصادی، فنی و بهداشتی، این استراتژی را به‌عنوان یک سیاست مدیریت تقاضای جدید آب مدنظر قرار داده‌اند (Abbasi et al., 2022). مدیریت فشار به مجموعه برنامه‌ها و عملیاتی که به‌منظور تنظیم فشار در شبکه صورت می‌گیرد، گفته می‌شود (Tabesh, 2016).

پژوهش‌های زیادی در زمینه مدیریت فشار انجام شده است. تابش و هومهر با استفاده از شیرهای فشارشکن به‌عنوان متغیر تصمیم، یک مدل بهینه‌سازی برای به حداقل رساندن فشار در شبکه و در نتیجه کاهش نشت و اضافه برداشت توسط مشترکین ارائه دادند. آنها از شبیه‌سازی هیدرولیکی مبتنی بر فشار^۱ و بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک^۲ استفاده کردند. در نهایت با استفاده از یک شبکه آزمایشی نشان دادند تقاضا حدود ۱۵ تا ۲۵ درصد می‌تواند با استفاده از شیرهای فشارشکن کاهش یابد (Tabesh and Hoomehr, 2009).

کریکو و والسکی یک تحلیل اقتصادی از روش‌های مدیریت فشار برای کاهش نشت و ترکیدگی لوله‌های شبکه توزیع آب ارائه دادند. در این پژوهش هزینه‌های شبکه در حالت وجود شیرهای فشارشکن مرسوم^۳ و شیرهای فشارشکن هدایت‌شونده^۴ در مقایسه با حالتی که کنترل فشاری روی شبکه انجام نشده، برآورد شده است. نتایج نشان داد در شرایطی که نشت و هزینه‌های اجرا و نگهداری شبکه توزیع کم باشد، نیازی به مدیریت فشار نیست؛ ولی زمانی که این متغیرها زیاد باشند، در حالتی که شبکه بزرگ باشد و نوسانات مصرف روزانه دارای پیک شدید باشد، استفاده از شیرهای RTC ضروری است. همچنین در حالتی که هزینه‌های اجرا و نگهداری شبکه و نشت متوسط بوده و شبکه کوچک است، استفاده

¹ Head Driven Simulation Method (HDSM)

² Genetic Algorithm (GA)

³ Pressure Reducing Valves (PRV)

⁴ Remotely Real-Time Controlled (RTC)



همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، با توجه به وجود بحران آب و یا تشدید آن در بسیاری از مناطق جهان (Du Plessis, 2019) استفاده از تأمین آب به روش نوبتی افزایش یافته است (Wunderlich et al., 2021).

بنابراین در شرایط فعلی که بیش از نیمی از جمعیت جهان در معرض ناامنی آب ناشی از کمبود آب قرار دارند و پیش‌بینی می‌شود با تغییر شرایط اجتماعی و اقلیمی در آینده، بدتر نیز شود (Shahangian et al., 2022)؛ تا حدی که با افزایش ۵۶ درصدی تقاضا تا سال ۲۰۲۵، بیش از دو سوم جمعیت جهان با کمبود آب مواجه شوند (Shahangian et al., 2021b) از یک سو، و همچنین روشن شدن مشکلات متعدد رویکردهای متداولی مانند سیاست تأمین نوبتی از جنبه‌های مختلف، اهمیت پرداختن به تبعات استراتژی‌های جدید از جمله سیاست مدیریت تقاضای آب در شرایط کم‌آبی با استفاده از مدیریت فشار که در برخی از استان‌های کشور از جمله اصفهان اتخاذ شده‌اند، بسیار حائز اهمیت است.

بنابراین، این پژوهش تبعات چنین سیاستی را از بعد مسائل فنی و هیدرولیکی آن بر روی شبکه توزیع آب، بررسی کرد. این رویکرد که می‌تواند جایگزین سیاست تأمین نوبتی باشد، علاوه بر کنترل تقاضا و اضافه برداشت آب توسط مشترکین، منجر به کاهش فشار شبکه و در نتیجه کاهش نشت می‌شود؛ بنابراین، به نظر می‌رسد که روشی مؤثر و زودبازده باشد؛ زیرا در این روش، تأمین به صورت پیوسته انجام شده و اثرات نامطلوب قطع و وصل شدن متعدد آب در شبکه توزیع را کاهش می‌دهد. در شرایط نرمال بهره‌برداری، با توجه به اینکه وظیفه اصلی شبکه‌های آب‌رسانی تأمین آب به میزان کافی با فشار و کیفیت مناسب برای مصرف‌کنندگان است (Tabesh, 2016)، باید سعی شود فشار در گره‌های مصرف به گونه‌ای کاهش یابد که تقاضای مصرف‌کنندگان به میزان حداکثر ممکن تأمین شود.

همچنین در شرایط وجود بحران کم‌آبی، حجم آب در دسترس کاهش یافته و شبکه قادر به تأمین ۱۰۰ درصدی تقاضای مشترکین نخواهد بود و آب در دسترس شبکه باید تا حد امکان به طور مساوی میان مصرف‌کنندگان تقسیم شود. با توجه به توپوگرافی منطقه و ساختار بیشتر شبکه‌های توزیع آب، این تقسیم در حالی که کنترلی بر آن صورت نگیرد، به طور عادلانه نخواهد بود. در نتیجه، در این پژوهش با استفاده از تنظیم بهینه فشار، تلاش شد تا آب در

می‌کنند تا زمانی که نیاز آنها به‌طور کامل برآورده شود، آب برداشت کنند و آب محدود موجود در منبع در مدت زمان کوتاهی تمام می‌شود. در صورتی که کنترل مناسبی بر روی مقدار آب تأمین شده برای هر مصرف‌کننده وجود نداشته باشد، تفاوت در تأمین آب میان مشترکین مشهود است (Chandapillai et al., 2012).

بنابراین در چنین شرایطی باید تلاش شود تا با استفاده از روش‌هایی مناسب و زودبازده، توزیع آب موجود در دسترس شبکه میان مصرف‌کنندگان به صورت عادلانه انجام شود. به همین منظور در این پژوهش، استفاده از شیرهای فشارشکن با هدف توزیع یکنواخت کمبود میان گره‌های مصرف بررسی شد. با توجه به کمبود فشار گره‌ای مطلوب در شبکه‌هایی که برنامه مدیریت فشار به صورت سخت‌گیرانه اجرا می‌شود، تمایل به استفاده از پمپ و مخزن خانگی توسط مشترکین بیشتر می‌شود (Achore et al., 2020). این اقدام مشترکین سبب می‌شود تا تغییراتی در الگوی برداشت آب از گره‌های مصرف و در نتیجه آن تغییراتی در هیدرولیک شبکه آب نسبت به حالات عادی بهره‌برداری از آن ایجاد شود.

در پژوهش‌های گذشته، اغلب به جنبه‌های کیفی ذخیره آب به‌وسیله مخازن خانگی و اثرات آنها بر نشت پرداخته شده و جنبه‌های هیدرولیکی استفاده از پمپ و مخزن خانگی مورد توجه قرار نگرفته است (Momba and Notshe, 2003, Cobacho et al., 2008, Cheung et al., 2013, Evison and Sunna, 2001). چنگ، یک نمای کلی از مصرف آب مسکونی و یک معادله ساده برای آنالیز مصرف انرژی سیستم‌های آب شهری ارائه داد و انرژی مصرفی برای تأمین آب توسط شبکه آب‌رسانی به مشترکین با و بدون پمپ و مخزن خانگی را مورد مقایسه قرار داد. او همچنین نشان داد که صرفه‌جویی در مصرف آب نقش به‌سزایی در حفاظت از انرژی دارد (Cheng, 2002).

قاضی‌زاده و شهروزی عنوان کردند، با توجه به اینکه در حال حاضر شبکه‌های توزیع آب بر اساس حداکثر مصرف ساعتی طراحی می‌شوند، تغییرات زمانی مصرف آب در ساعات مختلف موجب نوسان فشار و افزایش نشت شبکه می‌شود. در صورت استفاده از مخازن داخلی آب در ساختمان، می‌توان شبکه را بر مبنای حداکثر مصرف روزانه طراحی کرد تا نوسان‌های ساعتی جریان در شبکه و در نتیجه آن نشت کاهش یابد (Ghazizadeh and Shahrouzi, 2018).



نرم افزار در طراحی، تحلیل و شبیه سازی شبکه های توزیع آب با روش هیدرولیکی مبتنی بر فشار، دسترسی رایگان و همچنین قابلیت ارتباط برقرار کردن بین مدل شبیه ساز و بهینه ساز بوده است. برای بهینه سازی از الگوریتم ژنتیک و برای برقراری ارتباط میان شبیه ساز و بهینه ساز از نرم افزار MATLAB استفاده شد. در این پژوهش، شبکه توزیع آب در دو حالت بررسی شد:

الف) حالت عادی (بدون کمبود)

در حالت عادی که کمبودی در تأمین تقاضا وجود ندارد، هدف بهینه سازی، کاهش اضافه فشار موجود در شبکه و در نتیجه آن کاهش نشت و نیز مصارف وابسته به فشار مشترکین است. تابع هدف، برای کمینه کردن فشار اضافی در شبکه در نظر گرفته شده است (Vairavamoorthy and Lumbers, 1998)

تابع هدف

$$\text{Minimize } F = \sum_{i=1}^{NPN} (H_i - H_i^{\text{des}})^2 \quad (1)$$

قیود

$$H_i^{\text{des}} - \varepsilon \leq H_i \leq H_i^{\text{max}} \quad (2)$$

که در آنها

H_i فشار در گره i ، H_i^{des} فشار طراحی در گره i ، H_i^{max} حداکثر مقدار فشار در گره i که این مقدار معمولاً ۵۰ متر بالاتر از سطح مینا در نظر گرفته می شود. ε مقدار انحراف قید فشار از حداقل فشار طراحی در گره های هدف است که یک پارامتر مدیریتی است. دلیل انتخاب پارامتر مدیریت ε این بود که در فرایند بهینه سازی و کاهش فشار امکان دارد گره های محدودی در شبکه سریعاً به مقدار حداقل فشار نزدیک شوند، در حالی که در سایر گره ها هنوز مقدار زیادی اضافه فشار وجود داشته باشد. به همین منظور مدیر شبکه می تواند اجازه دهد به اندازه ε ، فشار در گره های محدودکننده از حداقل فشار استاندارد کمتر شود. در مقابل در تعداد زیادی از گره های شبکه قسمت بیشتری از فشار اضافی کاهش یافته و فشار آن گره ها به فشار طراحی نزدیک تر می شوند.

دسترس شبکه به طور یکنواخت تری میان مصرف کنندگان توزیع شود. همچنین با توجه به استفاده مشترکین از پمپ و مخزن خانگی در صورت وجود کمبود آب، تحلیل شبکه توزیع در این شرایط در دو حالت بدون و با وجود پمپ و مخزن خانگی انجام شد. در ادامه، ابتدا شرح کاملی از جزئیات مدل و سپس نتایج تجزیه و تحلیل های انجام شده بر روی شبکه های مختلف ارائه خواهد شد. در نهایت نیز، نتایج بررسی می شوند.

۲- مواد و روش ها

همان طور که قبلاً مطرح شد، تنظیم بهینه فشار در شبکه توزیع به کنترل و مدیریت میزان مصرف در شبکه منجر می شود. میزان برداشت آب در گره های مصرف تابعی از میزان فشار است، که هرچه فشار موجود در گره مصرف بیشتر شود، میزان برداشت از آن گره نیز افزایش می یابد. در نتیجه در شرایط نرمال بهره برداری از شبکه، کاهش فشار در شبکه باید به گونه ای باشد که نیازمندی های مصرف کننده را در تمامی نقاط شبکه تا حد امکان برآورده کند. به این منظور، تابع هدفی که بیانگر میزان اختلاف هد موجود و هد طراحی در هر گره از شبکه است، معرفی می شود. همچنین در شرایطی که کمبود وجود دارد و آب کافی برای تأمین کل تقاضای شبکه در دسترس نیست، توزیع فشار باید به گونه ای باشد که تا حد امکان همه مشترکین کمبود یکسانی را تجربه کنند. در این شرایط نیز، تابع هدفی معرفی می شود که کمبود را به صورت عادلانه میان گره های مصرف توزیع کند. با توجه به اینکه در این رویکرد، میزان تقاضای هر گره لزوماً برآورده نمی شود و میزان فشار در هر گره ممکن است از فشار حداقل کمتر شود، به گونه ای که حتی به صفر نیز برسد؛ بنابراین میزان برداشت از هر گره، کاملاً متناسب با فشار آن گره خواهد بود. در نتیجه از آنجا که نمی توان از روش شبیه سازی هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا^۱ استفاده کرد، برای شبیه سازی واقعی عملکرد سیستم، نیاز است رابطه میان فشار و دبی خروجی از گره ها در نظر گرفته شود (Tabesh, 2016). از این رو، در این پژوهش از روش شبیه سازی هیدرولیکی مبتنی بر فشار برای تحلیل هیدرولیکی شبکه توزیع آب با استفاده از نرم افزار EPANET2.2 استفاده شد. انتخاب نرم افزار EPANET2.2 به دلیل توانایی قابل توجه این

¹ Demand Driven Simulation Method (DDSM)



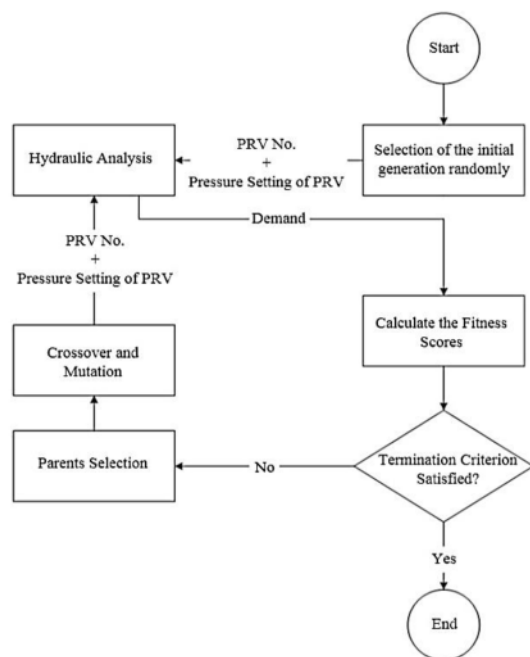


Fig. 1. Optimization and simulation flowchart

شکل ۱- الگوریتم بهینه‌سازی و شبیه‌سازی

خروجی از مخزن اصلی شهر قابل مشاهده است و می‌توان با استفاده از اطلاعات دبی خروجی از مخزن شهر، ضرایب نوسانات مصرف ساعتی را در این حالت به دست آورد. با اعمال ضرایب جدید به گره‌ها و مقایسه با حالت عادی می‌توان تأثیرات استفاده از پمپ و مخزن خانگی را بر روی هیدرولیک شبکه در نظر گرفت (Khashei, 2020).

در این پژوهش شبیه‌سازی هیدرولیکی در حالت وجود کمبود در تأمین تقاضا، در دو حالت با و بدون وجود پمپ و مخزن خانگی انجام شده و در صورت وجود پمپ و مخزن خانگی، به منظور در نظر گرفتن اثرات وجود آنها بر هیدرولیک شبکه توزیع آب از اطلاعات دبی خروجی از مخزن شهر، برای به دست آوردن ضرایب نوسانات ساعتی در گره‌های تقاضا استفاده شد.

همچنین با توجه به اینکه در برنامه مدیریت فشار، فشار متوسط شبکه کاهش می‌یابد، می‌توان دریافت که نشت از شبکه نیز کاهش خواهد یافت، چون جریان خروجی از یک روزنه، متناسب با فشار آب در محل خروج است (Lambert, 1997). در این پژوهش، روابط نشت در مدل‌سازی هیدرولیکی در نظر گرفته نشده و تنها به بررسی میزان کاهش نشت پس از اعمال سیاست مدیریت فشار پرداخته شد. از معادله ۶ برای محاسبه کاهش نشت استفاده

ب) حالت وجود کمبود

در حالت وجود بحران کم‌آبی، همان‌طور که گفته شد، کمبودی در میزان تقاضا به شبکه اعمال شده و مدیریت فشار در شبکه توزیع به وسیله شیرهای فشارشکن انجام می‌شود. برای اعمال کمبود به شبکه فرض می‌شود که در لوله‌های بعد از مخزن اصلی، شیرهای فشارشکن وجود دارد و میزان آب ورودی به شبکه با استفاده از آن شیرها کنترل می‌شود. پس از آن با استفاده از مدیریت فشار کمبود موجود میان گره‌های مصرف توزیع می‌شود. هدف بهینه‌سازی یکنواخت کردن توزیع کمبود میان گره‌های تقاضا بوده و طبق معادله ۳ تعریف می‌شود (Khashei, 2020). همچنین متغیر تصمیم در فرایند بهینه‌سازی، فشار تنظیمی و محل شیرهای فشارشکن هستند

تابع هدف

$$O.F. = \min \left(\text{Standard Deviation} \left(\frac{q_i^{\text{all}} - q_i}{q_i^{\text{all}}} \right) \right) \quad i=1, nnode \quad (3)$$

قیود

$$\sum_{i=1}^{nnode} q_i \leq \sum_{i=1}^{nnode} q_i^{\text{avl}} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{nnode} q_i^{\text{avl}} = (1 - n) \sum_{i=1}^{nnode} q_i^{\text{all}} \quad (5)$$

که در آنها

$nnode$ تعداد گره‌های مصرف در شبکه توزیع، q_i دبی قابل برداشت در هر گره مصرف، q_i^{avl} دبی در نظر گرفته شده برای گره مصرف (با اعمال کمبود)، q_i^{all} تقاضای هر گره در شرایط عادی شبکه و n میزان کمبود اعمال شده به تقاضای پایه است.

الگوریتم بهینه‌سازی در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است.

همان‌طور که گفته شد، در شرایط کمبود، مشترکین برای بهبود وضعیت فشار و برداشت آب در خانه‌های خود، از پمپ و مخزن خانگی استفاده می‌کنند. این اقدام مشترکین موجب ایجاد تفاوت در روند برداشت آب از گره‌های تقاضا شده و تغییراتی در نمودار ضرایب نوسانات مصرف ساعتی، نسبت به شرایط عادی ایجاد می‌کند. تفاوت برداشت آب در گره‌های مصرف بر روی دبی



می شود (Lambert, 1997)

$$L_1 = L_0(P_1/P_0)^N \quad (6)$$

که در آن

L_0 و L_1 میزان نشت، P_0 و P_1 فشار متوسط منطقه در شرایط فشاری متفاوت و N توان فشار هستند. مقدار دقیق N بر اساس تئوری FAVAD محاسبه می شود. در این نظریه دو نوع سطح مقطع برای منفذ نشت در نظر گرفته شده است، یکی منافذ با سطح مقطع ثابت که مانند اریفیس عمل می کند و دیگری منافذ با سطح مقطع متغیر که با تغییرات فشار تغییر می کند. تعداد این منافذ با استفاده از اطلاعات ثبت و پردازش شده مربوط به حوادث در شبکه های توزیع آب شهری تخمین زده می شود. در صورت در دسترس نبودن اطلاعات مربوط به حوادث شبکه توزیع آب، با تخمین خوبی می توان مقدار N را برابر ۱ فرض کرد (Tabesh, 2016).

۲-۱- سناریوها

به منظور پرداختن به هدف اصلی این پژوهش، ابتدا شبکه موردنظر با شرایط موجود خود در سناریو پایه تحلیل شد. سپس تحت دو سناریو دیگر که یکی عدم وجود بحران کم آبی و دیگری وجود کمبود در تأمین تقاضا بود، تحلیل و نتایج بررسی شد.

سناریو پایه: در این سناریو هیچ کمبودی در نظر گرفته نشده و شبکه در حالت عادی تحلیل می شود. در نتیجه تمامی تقاضا در گره های مصرف، در طول ۲۴ ساعت شبانه روز تأمین شده و فشار کافی نیز در شبکه وجود دارد.

سناریو ۱: در این سناریو با هدف کاهش اضافه فشار شبکه و در نتیجه آن کاهش نشت، مکان و فشار تنظیمی بهینه برای شیرهای فشارشکن تعیین خواهد شد (با توجه به اینکه در سناریو پایه کمبودی متوجه شبکه نیست و تقاضای گره ها به صورت ۱۰۰ درصدی برآورده می شود، بنابراین شبکه می تواند دارای اضافه فشار بوده و به همین دلیل نشت از شبکه زیاد خواهد بود).

سناریو ۲: در این سناریو ۸ درصد کمبود در تأمین تقاضای کل به شبکه تحمیل می شود (با توجه به اینکه مدیران شبکه مورد مطالعه که شهر بهارستان در استان اصفهان است، با سیاست مدیریت فشار (به صورت تجربی) توانسته اند ۸ درصد از تقاضای کل شبکه را

کاهش دهند، کمبود ۸ درصدی در این سناریو در نظر گرفته شده است).

۲-۲- مطالعه موردی

محل مطالعه موردی، شبکه توزیع آب شهر بهارستان واقع در استان اصفهان بود. در این پژوهش، لوله های اصلی شبکه شهر بهارستان در نظر گرفته شد. شبکه دارای ۳۵ گره تقاضا و ۶۱ لوله بود که اطلاعات ورودی گره ها و لوله های آن به ترتیب در جدول های ۱ و ۲ آمده است. همچنین شبکه دارای یک مخزن بود و تعداد ۵ شیر فشارشکن که ۲ عدد از آنها شیر با خروجی ثابت و ۳ عدد دیگر شیرهای هدایت شونده بودند، در شبکه نصب شدند. شیرهای خروجی ثابت در لوله های P7 و P56 و شیرهای با خروجی متغیر در لوله های P14، P24 و P41 قرار دارند که طرح پیکربندی این شبکه در شکل ۲ نشان داده شده است. ضرایب نوسانات مصرفی در حالت عادی و بدون کمبود و در شرایطی که در تحلیل هیدرولیکی وجود پمپ و مخزن خانگی در نظر گرفته نمی شود، مطابق نشریه ۳-۱۱۷ بازنگری اول در جدول ۳ آمده است. همچنین برای حالتی که اثرات وجود پمپ و مخزن خانگی در تحلیل شبکه توزیع در نظر گرفته می شود، با استفاده از میانگین داده های خروجی مخزن شهر بهارستان در مهرماه ۱۳۹۸ که تعداد زیادی از مشترکین از پمپ و مخزن خانگی استفاده می کردند، ضرایب نوسانات ساعتی مصرف برای شهر بهارستان محاسبه شده و مطابق جدول ۴ به دست آمده است.

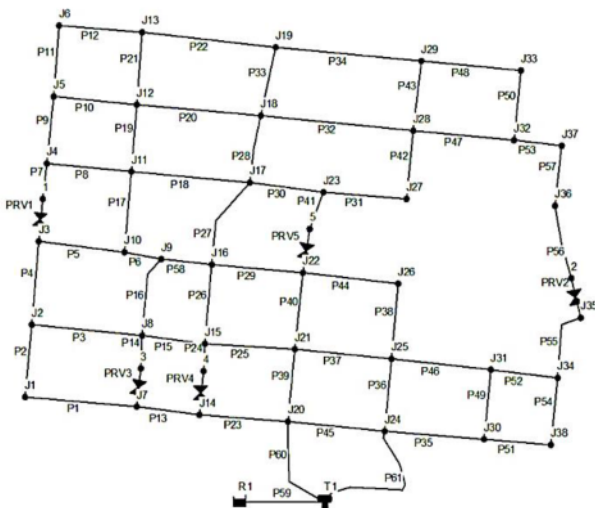


Fig. 2. Overview of Baharestan city water distribution network

شکل ۲- شمای کلی شبکه توزیع آب شهر بهارستان

جدول ۱- ورودی گره‌های شبکه مورد مطالعه

Table 1. Input data of the nodes

Node No.	Elevation (m)	Base demand (L/s)	Node No.	Elevation (m)	Base demand (L/s)	Node No.	Elevation (m)	Base demand (L/s)
J1	1593	7.004	J15	1576	19.846	J28	1559	16.545
J2	1586	13.431	J16	1567	13.469	J29	1553	8.591
J3	1573	8.122	J17	1560	10.762	J30	1592	6.066
J4	1564	4.314	J18	1555	16.791	J31	1587	10.128
J5	1558	5.409	J19	1551	9.13	J32	1563	7.758
J6	1550	2.79	J20	1585	11.485	J33	1555	3.696
J7	1589	10.949	J21	1574	24.041	J34	1588	6.488
J8	1580	21.608	J22	1566	18.178	J35	1585	0
J9	1568	12.2	J23	1562	9.513	J36	1572	0
J10	1570	9.663	J24	1588	9.592	J37	1565	0
J11	1563	9.625	J25	1581	20.074	J38	1592	2.425
J12	1555	13.413	J26	1573	10.482	R1	1630	-
J13	1550	7.025	J27	1561	7.953	T1	1625	-
J14	1590	9.478	-	-	-	-	-	-

جدول ۲- ورودی لوله‌های شبکه مورد مطالعه

Table 2. Input data of the pipes

Pipe No.	Length (m)	Diameter (mm)	C _{H-W}	Pipe No.	Length (m)	Diameter (mm)	C _{H-W}	Pipe No.	Length (m)	Diameter (mm)	C _{H-W}
P1	830	600	150	P22	965	110	130	P42	490	180	130
P2	520	250	130	P23	650	600	150	P43	550	110	130
P3	840	180	130	P24	530	200	130	P44	700	110	130
P4	620	250	130	P25	660	180	130	P45	700	250	130
P5	620	160	130	P26	620	200	130	P46	750	160	130
P6	320	160	130	P27	610	200	130	P47	740	110	130
P7	540	250	130	P28	500	160	130	P48	750	110	130
P8	620	250	130	P29	670	110	130	P49	510	160	130
P9	500	180	130	P30	470	250	130	P50	590	110	130
P10	620	200	130	P31	700	250	130	P51	500	250	130
P11	550	110	130	P32	1120	110	130	P52	500	160	130
P12	630	110	130	P33	560	110	130	P53	350	180	130
P13	480	600	150	P34	1070	110	130	P54	510	250	130
P14	500	250	130	P35	750	250	130	P55	490	200	130
P15	470	180	130	P36	520	180	130	P56	950	200	130
P16	650	250	130	P37	700	180	130	P57	350	200	130
P17	550	200	130	P38	620	200	130	P58	360	110	130
P18	860	250	130	P39	530	180	130	P59	500	800	150
P19	500	160	130	P40	620	200	130	P60	1000	600	150
P20	920	200	130	P41	550	250	130	P61	1115	600	150
P21	540	110	130	-	-	-	-	-	-	-	-



جدول ۳- ضرایب نوسانات ساعتی مصرف مطابق نشریه ۱۱۷-۳

Table 3. Hourly fluctuation coefficients of consumption according to the publication 3-117

Time (hr)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Coefficients	0.5	0.45	0.35	0.3	0.45	0.75	1.1	1.25	1.1	1	0.9	1.1
Time (hr)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Coefficients	1.45	1.2	1.15	1.05	1.1	1.4	1.65	1.8	1.45	1.1	0.8	0.6

جدول ۴- ضرایب نوسانات ساعتی مصرف به دست آمده از داده‌های خروجی مخزن شهر بهارستان

Table 4. Hourly fluctuation coefficients obtained from Baharestan reservoir output data

Time (hr)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Coefficients	0.542	0.301	0.254	0.265	0.385	0.72	0.904	1.098	1.297	1.401	1.442	1.425
Time (hr)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Coefficients	1.428	1.34	1.287	1.315	1.37	1.274	1.204	1.146	1.015	1.102	0.943	0.542

۳- نتایج و بحث

حالت ۱: از ضرایب نوسانات ساعتی نشریه در گره‌های تقاضا استفاده شد و شبکه تحلیل شد. حالت ۲: همان حالت ۱ در نظر گرفته شد و مدیریت فشار با هدف توزیع یکنواخت کمبود میان مشترکین انجام شد و متغیر تصمیم در این حالت تنها فشار تنظیمی شیرهای فشارشکن موجود در شبکه بهارستان بود. حالت ۳: شبکه با وجود مخزن خانگی در گره‌های مصرف و ضرایب مصرف ساعتی شهر بهارستان تحلیل شد. حالت ۴: شبکه همان شرایط حالت ۳ را داشته و فشار تنظیمی شیرهای فشارشکن موجود با هدف توزیع یکنواخت کمبود میان مصرف‌کنندگان، بهینه شد. حالت ۵: با در نظر گرفتن ضرایب نوسانات ساعتی شهر بهارستان و وجود مخزن خانگی، بهینه‌سازی با هدف توزیع عادلانه کمبود میان گره‌های تقاضا انجام شد و علاوه بر فشار تنظیمی، مکان شیرها نیز به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شد.

سناریوهای پایه و ۱:

نتایج تحلیل در سناریوهای پایه و ۱ در جدول ۵ آمده است. فشار متوسط شبکه در سناریو ۱، حالت‌های ۱ و ۲ به ترتیب حدود ۵ و ۸ متر و نشت شبکه در این دو حالت به ترتیب ۱۶/۳۸ و ۱۷/۵۰ درصد کاهش یافته است. شکل ۴، روند تغییرات فشار متوسط شبکه در شبانه‌روز را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده از اجرای این سناریو، می‌توان نتیجه گرفت که مکان شیرهای فشارشکن موجود در شبکه بهارستان به صورت مهندسی انتخاب

همان طور که اشاره شد، شرکت آب و فاضلاب شهر بهارستان با استفاده از جانمایی ۵ شیر فشارشکن به صورت تجربی توانسته بود تقاضای کل شبکه را تا ۸ درصد کاهش دهد. در این پژوهش، با استفاده از مدل توسعه داده شده برای تنظیم بهینه فشار در شرایط عادی و با وجود کمبود، در یک حالت از شیرهای فشارشکن موجود شبکه بهارستان استفاده شد و در حالت دیگر، مکان بهینه برای ۵ شیر فشارشکن با فشار تنظیمی متغیر به دست آمد که نتایج آن با نتایج حاصل از در نظر گرفتن شیرهای موجود شبکه مورد مطالعه مقایسه شد. در سناریو ۲ نیز، پس از تحمیل کمبود، مدیریت فشار با هدف توزیع عادلانه آب در دسترس میان مشترکین انجام شد.

در سناریو پایه، کمبودی به شبکه تحمیل نشده و شبکه در شرایط عادی تحلیل شد و دبی خروجی از مخزن برابر کل تقاضای مشترکین (۳۲۶۰۴/۴۹ مترمکعب در روز) به دست آمد. پس از آن، در سناریو ۱ تحلیل هیدرولیکی در دو حالت انجام شد: حالت ۱: مدیریت فشار با استفاده از شیرهای فشارشکن موجود در شبکه بهارستان انجام شد. حالت ۲: با استفاده از ۵ شیر فشارشکن با خروجی متغیر، بهینه‌سازی انجام شد و فشار تنظیمی و مکان بهینه برای شیرها به دست آمد. همچنین با توجه به اینکه در این حالت‌ها کمبود وجود ندارد، برای تحلیل فقط از ضرایب نوسانات ساعتی مصرف نشریه ۱۱۷-۳ استفاده شد. در سناریو ۲ نیز، در شبکه کمبود وجود داشته و تحلیل هیدرولیکی در پنج حالت انجام شد:



یکنواخت تری در شبکه توزیع کرده و فشار متوسط شبکه را به فشار مطلوب نزدیک کرده است.

نشده و انتخاب های بهتری برای مکان شیرها وجود داشته است که مدل توانسته به خوبی مکان های بهینه را پیدا کند (شکل ۳)، چون با تحمیل درصد کمتری از کمبود (۰/۳۳ درصد)، فشار را به صورت

جدول ۵- نتایج تحلیل در سناریو پایه و ۱

Table 5. Analysis results in base scenario and scenario 1

Scenario and analysis mode	Pipe number with PRV	Setting pressure (m)						Network inflow (m ³ /day)	Network average pressure (m)	Deficiency (%)	Leakage reduction (%)
		0-4 a.m.	4-8 a.m.	8-12 a.m.	12-4 p.m.	4-8 p.m.	8-12 p.m.				
Base scenario	-	-	-	-	-	-	-	32604.49	47.42	0.18	-
Scenario 1 Mode 1	7	35.79	35.79	35.79	35.79	35.79	35.79	31957.17	42.74	2.17	16.38
	14	29.89	25	25	25	25	25				
	24	27.6	25	25	25	25	25				
	41	35.43	30.08	25.84	32.94	25.87	32.29				
Scenario 1 Mode 2	56	31.56	31.56	31.56	31.56	31.56	31.56	32560.01	39.12	0.33	17.5
	7	25	25	25	25	39.69	25				
	17	25	25	25	25	43.36	25				
	27	29.87	25	27.52	26.7	27.38	27.01				
	40	26.79	25	25	25	25	25				
57	25	25	25	25	25	25					

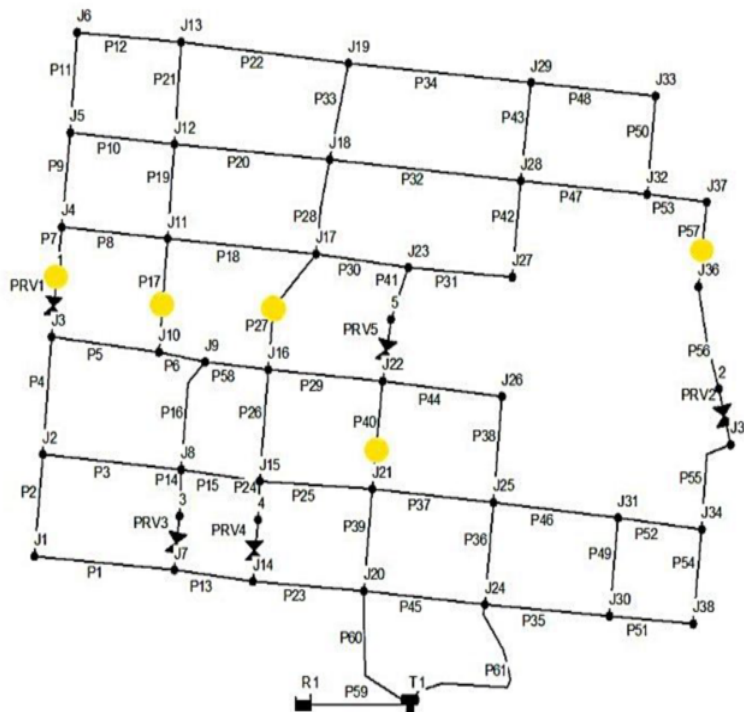


Fig. 3. Location of PRVs obtained from optimization in scenario 1 mode 2
 شکل ۳- محل شیرهای فشار شکن به دست آمده در فرایند بهینه سازی مکان در سناریو ۱ حالت ۲



نداشته باشد، مصرف حداکثر در ساعت‌های کوتاهی اتفاق می‌افتد و در سایر ساعت‌ها مصرف نسبتاً کم است. در نتیجه در زمان‌هایی که مصرف کم است، فشار متوسط شبکه بیش از فشار موردنیاز در گره‌های مصرف بوده (شکل ۶) و تقاضا به‌طور کامل تأمین می‌شود و فقط در ساعت‌های کوتاهی فشار ناکافی بوده و گره‌های مصرف دچار کمبود می‌شوند. در حالی که با وجود پمپ و مخزن خانگی، پیک شدید مصرف از بین رفته و مصرف حداکثری که در پی تأثیر دادن ضرایب نوسانات مصرف ساعتی در حالت عادی به وجود می‌آید، بین ساعت‌های طولانی‌تری، تقسیم می‌شود. این موضوع سبب می‌شود تا در ساعت‌های طولانی‌تری فشار متوسط شبکه از فشار حداقل کمتر شود و گره‌های تقاضا در ساعت‌های طولانی‌تری کمبود را تجربه می‌کنند.

بنابراین با وجود کمبود در زمان‌های بیشتر، توزیع آن نیز میان گره‌های مصرف نسبت به حالتی که پمپ و مخزن در شبکه وجود ندارد، غیریکنواخت‌تر می‌شود. همچنین با اجرای برنامه مدیریت فشار، این اتفاق تشدید شده است. چون در مقدار تابع هدف در حالت ۴ نسبت به حالت ۲ افزایش بیشتری از حالت ۳ نسبت به حالت ۱ داشته است. این موضوع به دلیل وابستگی توزیع کمبود میان گره‌های تقاضا به فشار موجود در گره‌ها است.

همان‌طور که جدول ۶ و شکل ۵ نشان می‌دهند، لوله‌هایی که به‌عنوان محل نصب شیر فشارشکن انتخاب شده‌اند، با لوله‌هایی که در سناریو ۱ حالت ۲ در فرایند بهینه‌سازی مکان شیرها به‌دست آمده‌اند، متفاوت هستند. علت این موضوع، متفاوت بودن تابع هدف بهینه‌سازی و شرایط مختلف تحلیل است.

در سناریو پایه، شبکه در حالت عادی بهره‌برداری قرار داشته و مکان شیرها با هدف حداقل‌سازی اختلاف فشار موجود در گره‌ها با حداقل فشار مطلوب بهینه می‌شوند، در حالی که در سناریو ۱ به شبکه کمبود تحمیل شده و هدف بهینه‌سازی، توزیع عادلانه این کمبود میان گره‌های مصرف است. وجود نوسانات در شکل ۷ به دلیل مش بندی در نظر گرفته شده برای شماره گره‌های تقاضا در شبکه مورد بررسی است. چون مقدار کمبود در هر گره متأثر از فشار آن گره بوده و توپوگرافی منطقه و نحوه شماره‌گذاری گره‌ها موجب به وجود آمدن این نوسانات شده است. در صورتی که نحوه شماره‌گذاری تغییر کند، این نوسانات نیز متفاوت خواهد شد.

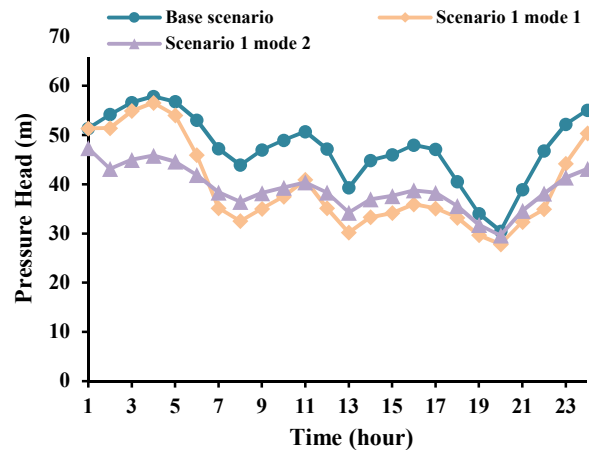


Fig. 4. The average network pressure during the day in base scenario and scenario I

شکل ۴- فشار متوسط شبکه طی ساعات شبانه‌روز در سناریو پایه و سناریو ۱

سناریو ۲:

سناریو ۲ در پنج حالت بیان شده تحلیل و نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است. مقایسه مقدار تابع هدف بین حالت‌های ۱ تا ۴ نشان می‌دهد که توزیع کمبود میان گره‌های مصرف پس از بهینه‌سازی فشار تنظیمی شیرهای فشارشکن، یکنواخت‌تر شده است، ولی این مقدار به دلیل مکان نامناسب شیرها بسیار کم است. در حالی که در حالت ۵، مقدار تابع هدف تقریباً نصف شده و مدل بهینه‌ساز در شرایطی که فشار و مکان شیرها هم‌زمان بهینه می‌شوند، جواب بهتری تولید می‌کند (شکل ۵). این نتایج در جدول ۷ نیز قابل مشاهده است. درصد کمبود اکثر گره‌ها در حالت ۵ به ۸ درصد نزدیک شده و فقط تعدادی از آنها از میانگین دور شده‌اند که این اتفاق با توجه به محدود بودن تعداد شیرهای فشارشکن و شرایط هیدرولیکی شبکه اجتناب‌ناپذیر است.

مقدار تابع هدف در حالت ۳ نسبت به حالت ۱، ۸۰ درصد و در حالت ۴ نسبت به حالت ۲، ۱۵ درصد افزایش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد در زمان کمبود و در حالتی که مشترکین از مخزن خانگی استفاده کنند و ضرایب نوسانات ساعتی مصرف یکنواخت‌تر باشند، توزیع کمبود میان مصرف‌کنندگان غیریکنواخت‌تر می‌شوند. دلیل افزایش ناعدالتی میان گره‌های مصرف در این حالت، یکنواخت شدن ضرایب نوسانات ساعتی است (جدول ۴). در حالتی که پمپ و مخزن خانگی در شبکه وجود



جدول ۶- نتایج اجرای سناریو ۲

Table 6. Analysis results in scenario 2

Mode	Pipe number with PRV	Setting pressure (m)						Network inflow (m ³ /day)	Objective function value	Network average pressure (m)	Deficiency (%)	Leakage reduction (%)
		0-4 a.m.	4-8 a.m.	8-12 a.m.	12-4 p.m.	4-8 p.m.	8-12 p.m.					
1	-	-	-	-	-	-	-	30051.37	0.088	30.95	8	34.72
	7	24.42	24.42	24.42	24.42	24.42	24.42					
	14	25.07	27.26	28.78	24.03	10	32.81					
2	24	23.22	25.98	23.71	28.08	10	26.23	30049.24	0.072	31.68	8	33.19
	41	27.41	40	17.1	34.35	11.43	39.79					
	56	20.67	20.67	20.67	20.67	20.67	20.67					
3	-	-	-	-	-	-	-	30050.56	0.096	30.22	8	36.27
	7	23.74	23.74	23.74	23.74	23.74	23.74					
	14	23.06	27.27	15	15	27.84	25					
4	24	29.05	26.42	15	28.11	27.73	21.1	30050.91	0.085	30.25	8	36.2
	41	28.26	18.81	15.58	16.23	18.66	34.89					
	56	26.26	26.26	26.26	26.26	26.26	26.26					
5	9	25.14	36.04	5.5	6.43	14.29	35.69	30027.57	0.047	30.89	8.08	38.03
	16	32.08	26.38	3.72	1.44	5.33	32.05					
	26	36.05	31.44	1.92	16.02	28.13	33.23					
	40	39.24	33.68	24.16	1.87	29.33	35.2					
	57	22.83	22.69	2.66	1	10.36	21.31					

جدول ۷- فشار گره‌های تقاضا در ساعات حداقل و حداکثر مصرف در حالت ۵ سناریو ۲

Table 7. Pressure of demand nodes at minimum and maximum consumption hours in scenario 2 mode 5

Node	Pressure (m) 3 a.m.	Pressure (m) 5 p.m.	Node	Pressure (m) 3 a.m.	Pressure (m) 5 p.m.	Node	Pressure (m) 3 a.m.	Pressure (m) 5 p.m.
1	21.92	19.87	13	61.51	20.10	25	35.06	26.39
2	28.27	18.05	14	24.95	23.33	26	42.75	30.79
3	40.25	18.72	15	38.78	30.43	27	51.12	15.72
4	48.85	22.78	16	45.14	15.54	28	52.75	14.53
5	53.75	15.04	17	52.28	19.23	29	58.32	16.71
6	61.57	20.70	18	56.79	18.53	30	25.51	21.64
7	25.93	24.04	19	60.40	18.63	31	30.13	23.89
8	34.78	28.55	20	29.98	28.98	32	48.24	9.55
9	44.29	14.00	21	40.77	33.16	33	56.24	15.15
10	42.44	12.43	22	46.49	12.32	34	29.40	24.05
11	49.43	18.80	23	50.28	16.22	35	25.45	20.78
12	56.79	18.52	24	29.84	29.48			



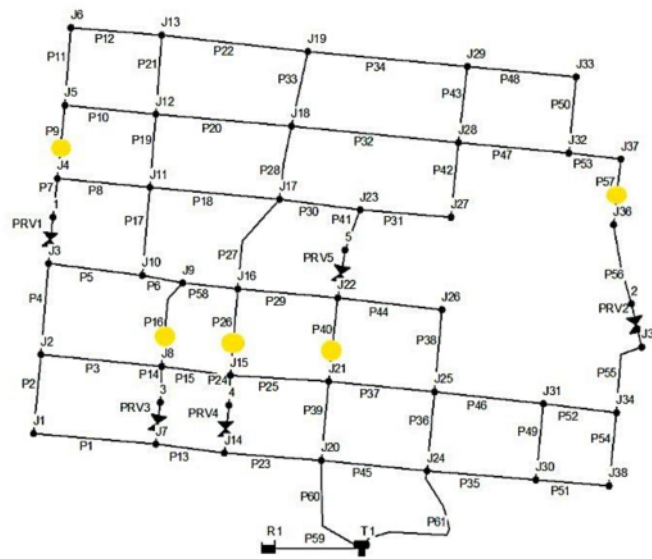


Fig. 5. Location of PRVs obtained from optimization in scenario 2 mode 5
 شکل ۵- محل شیرهای فشارشکن به دست آمده در فرایند بهینه‌سازی مکان در سناریو ۲ حالت ۵

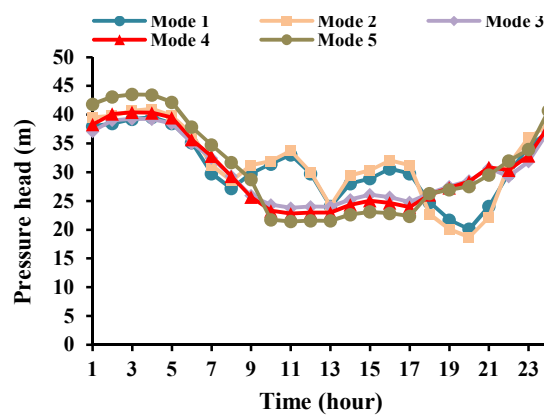


Fig. 6. The average network pressure during the day in scenario 2
 شکل ۶- فشار متوسط شبکه طی ساعات شبانه‌روز در حالت‌های مختلف سناریو ۲

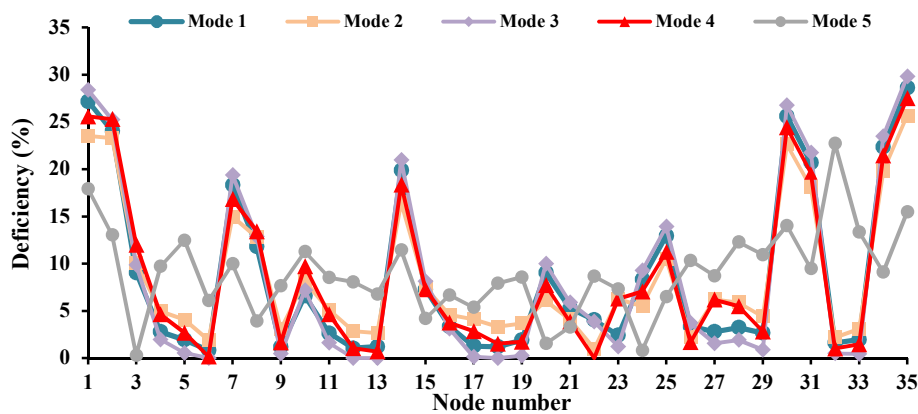


Fig. 7. Percentage of outflow deficit in demand nodes in different modes of scenario 2
 شکل ۷- درصد کمبود دبی قابل برداشت در گره‌های تقاضا در حالت‌های مختلف سناریو ۲



۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، امکان استفاده از سیاست مدیریت فشار در شبکه توزیع آب به منظور مدیریت تقاضا در شرایط عادی (بدون کمبود) و شرایط وجود بحران کم‌آبی بررسی شد. ابزار استفاده شده در مدیریت فشار در این پژوهش، شیرهای فشارشکن با خروجی ثابت و متغیر بود. به منظور دستیابی به هدف پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی و شبیه‌سازی توسعه یافت و در تمامی تحلیل‌ها از تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار استفاده شد.

برای بهینه‌سازی، دو تابع هدف در حالت‌های مختلف بهره‌برداری در نظر گرفته شدند. تابع هدف اول، به منظور کاهش اضافه فشار در شبکه در شرایط بدون کمبود و تابع هدف دوم، برای توزیع یکنواخت آب قابل دسترس میان مصرف‌کنندگان در شرایط وجود کمبود بودند.

با توجه به اینکه بخشی از تحلیل‌ها در شرایط کمبود انجام شده و آب با فشار کافی به گره‌های تقاضا نمی‌رسد، مصرف‌کنندگان به استفاده از پمپ و مخزن خانگی روی می‌آورند که این اتفاق سبب تغییر الگوی برداشت آب در گره‌ها می‌شود. برای واقعی شدن بررسی اثرات هیدرولیکی استفاده از پمپ و مخزن خانگی در شبکه توزیع، در سناریوهای بررسی شده، از دو دسته ضریب که یکی از آنها ضرایب نشریه ۳-۱۱۷ و دیگری ضرایب به دست آمده از خروجی مخزن شبکه توزیع آب شهر بهارستان بود، استفاده و نتایج آنها مقایسه شد. برای ارزیابی روش تحقیق، شبکه توزیع آب شهر بهارستان در استان اصفهان به عنوان مورد مطالعه انتخاب شد که در چند سال اخیر برای مقابله با بحران کم‌آبی در این منطقه از مدیریت فشار به منظور مدیریت تقاضا بهره گرفته شد، اما در رابطه با این اقدام (مدیریت فشار به منظور مدیریت تقاضا) نه تنها پژوهش‌های زیادی انجام نشد، بلکه اثرات هیدرولیکی و کارایی آن در بهبود شرایط مشترکین به لحاظ عدالت در دریافت آب نیز، بررسی نشده است. نتایج تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش نشان داد که مدل، کمبود بین گره‌های مصرف را با توجه به شرایط مسئله و محدودیت‌های موجود آن (تعداد شیرهای فشارشکن و

توپوگرافی منطقه)، به طور منطقی و مناسبی توزیع می‌کند. همچنین مکان شیرهای موجود در شبکه بهارستان به درستی انتخاب نشده و برای بهبود شرایط فشار در شبکه بهتر است شیرهای فشارشکن جدیدی به شبکه اضافه شوند و همچنین برای مدیریت بهتر فشار، انتخاب محل شیرهای فشارشکن از طریق مدل‌سازی انجام شود.

نتایج حاصل از مدل نشان داد که می‌توان با اجرای سیاست مدیریت فشار، تقاضا را مدیریت کرده و دبی برداشت در گره‌های مصرف (و به تبع آن میزان کمبود) را در شرایط بحران کم‌آبی، بدون اجرای سیاست جیره‌بندی به طور عادلانه تنظیم کرد. بنابراین شبکه‌هایی که برای تأمین پیوسته طراحی شده‌اند را می‌توان در مواقعی که آب قابل دسترس از تقاضای کل شبکه کمتر است، با این روش مدیریت کرد. همچنین از این روش می‌توان برای اصلاح الگوی مصرف، در شبکه‌هایی که اضافه فشار دارند، استفاده کرد.

در این پژوهش نوسانات دبی خروجی از مخزن شهر به عنوان معرف عملکرد پمپ و مخزن خانگی در نظر گرفته شد. پیشنهاد می‌شود یک مجموعه یکپارچه بین شبکه شهر و شبکه خانه مدل‌سازی شده و اثرات وجود پمپ و مخزن خانگی مورد مطالعه دقیق‌تر و کامل‌تر قرار گیرد. همچنین برآورد هزینه‌های تهیه و نصب شیرهای فشارشکن و بهره‌برداری آنها و نیز برگشت سرمایه حاصل از مدیریت تقاضا می‌تواند در پژوهش‌های آینده انجام شود. در نهایت پیشنهاد می‌شود با افزودن اهداف دیگری مانند قابلیت اطمینان کیفی، مسئله به صورت چند هدفه حل شود. همچنین ضمن استفاده از سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی، نتایج مقایسه شود.

۵- قدردانی

به این وسیله از شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان (به‌ویژه جناب آقای مهندس اکبری، سرکار خانم مهندس مالباشی و سرکار خانم مهندس احمدی) و شرکت آب و فاضلاب شهر بهارستان (به‌ویژه جناب آقای مهندس آلمانی) به دلیل همکاری صمیمانه در انجام و پیشبرد این پژوهش و در اختیار قرار دادن اطلاعات مربوطه، تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

References

- Abbasi, M., Tabesh, M., Safarpour, H. & Shahangian, S. A. 2022. Environmental impact assessment of water demand management policies on the urban water system using life cycle approach. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(10), In Press. (In Persian)



- Abdelmeguid, H. & Ulanicki, B. 2010. Pressure and leakage management in water distribution systems via flow modulation PRVs. *Water Distribution Systems Analysis*, 2011, 1124-1139.
- Achore, M., Bisung, E. & Kuusaana, E. D. 2020. Coping with water insecurity at the household level: a synthesis of qualitative evidence. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 230, 113598.
- Berardi, L., Laucelli, D., Ugarelli, R. & Giustolisi, O. 2015. Leakage management: planning remote real time controlled pressure reduction in Oppegård municipality. *Procedia Engineering*, 119, 72-81.
- Chandapillai, J., Sudheer, K. & Saseendran, S. 2012. Design of water distribution network for equitable supply. *Water Resources Management*, 26, 391-406.
- Charalambous, B. 2012. The effects of intermittent supply on water distribution networks. *Water Loss Conference*, Manila, Philippines.
- Cheng, C. L. 2002. Study of the inter-relationship between water use and energy conservation for a building. *Energy and Buildings*, 34, 261-266.
- Cheung, C., Mui, K. W. & Wong, L. T. 2013. Energy efficiency of elevated water supply tanks for high-rise buildings. *Applied Energy*, 103, 685-691.
- Cobacho, R., Arregui, F. & Cabrera, E. 2008. Private water storage tanks: evaluating their inefficiencies. *Water Practice and Technology*, 3(1), wpt2008025.
- Covelli, C., Cimorelli, L., Cozzolino, L., Della Morte, R. & Pianese, D. 2016. Reduction in water losses in water distribution systems using pressure reduction valves. *Water Science and Technology: Water Supply*, 16, 1033-1045.
- Creaco, E. & Walski, T. 2017. Economic analysis of pressure control for leakage and pipe burst reduction. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143, 04017074.
- Dai, P. D. 2018. Efficient optimization of pressure regulation in water distribution systems using a new-relaxed pressure reducing valve model. *Vietnam Journal of Science and Technology*, 56, 503-514.
- Du Plessis, A. 2019. Current and future water scarcity and stress. In: Du Plessis, A. *Water as an Inescapable Risk*. Springer. Cham. 13-25.
- Dziegielewski, B. 2003. Strategies for managing water demand. *Water Resources Update*, 126, 29-39.
- Evison, L. & Sunna, N. 2001. Microbial regrowth in household water storage tanks. *Journal-American Water Works Association*, 93, 85-94.
- Fielding, K. S., Spinks, A., Russell, S., Mccrea, R., Stewart, R. & Gardner, J. 2013. An experimental test of voluntary strategies to promote urban water demand management. *Journal of Environmental Management*, 114, 343-351.
- Ghazizadeh, M. J. & Shahrouzi, S. 2018. Effect of household water tanks on leakage reduction for distribution networks under operation. *Journal of Water and Wastewater*, 29(5), 112-119. (In Persian)
- Khashei, M. 2020. Demand management during water scarcity using optimum pressure management in water distribution networks. MSc. Thesis. University of Tehran, Tehran Iran. (In Persian)
- Khashei, M., Tabesh, M. & Shahangian, S. A. 2020. Pressure optimization in water distribution networks with purpose of demand management. *Proceedings of the 18th Iranian Hydraulic Conference*, Tehran University, Tehran, Iran. (In Persian)
- Khashei, M., Tabesh, M., Shahangian, S. A. & Abbasi, M. 2021. Demand management in water distribution networks by pressure management during water scarcity considering equanimity and justice principles.



- Proceedings of the 19th Iranian Hydraulic Conference*, Ferdowsi University, Mashhad, Razavi Khorasan Province. Iran. (In Persian)
- Koşucu, M., Sari, O., Demirel, M., Kiran, S., Yılmaz, A., Aybakan, A., et al. 2021. Water leakage reduction in the water distribution network with real time pressure management. *Teknik Dergi*, 32(1), 10541-10564.
- Lambert, A. 1997. Pressure management/leakage relationships: theory, concepts and practical applications. *Proceedings of Conference on Minimizing Leakage in Water Supply/Distribution Systems*.
- Latifi, M., Naeeni, S. T. & Gheibi, M. A. 2018. Upgrading the reliability of water distribution networks through optimal use of pressure-reducing valves. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144, 04017086. (In Persian)
- Li, H., Cohen, A., Li, Z., Lv, S., He, Z., Wang, L., et al. 2020. Intermittent water supply management, household adaptation and drinking water quality: a comparative study in two Chinese provinces. *Water*, 12, 1361.
- Momba, M. N. & Notshe, T. 2003. The microbiological quality of groundwater-derived drinking water after long storage in household containers in a rural community of South Africa. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 52, 67-77.
- Preciado, C. C., Husband, S., Boxall, J., Del Olmo, G., Soria-Carrasco, V., Maeng, S. K., et al. 2021. Intermittent water supply impacts on distribution system biofilms and water quality. *Water Research*, 201, 117372.
- Robroek, S. 2019. The impact of an intermittent water supply on water losses: a case study on water distribution systems in Nairobi, Kenya. MSc. Thesis, University of Nairobi, Kenya.
- Safarpour, H., Tabesh, M. & Shahangian, S. A. 2022. Environmental assessment of a wastewater system under water demand management policies. *Water Resources Management*, 36, 2061-2077.
- Shahangian, S. A., Tabesh, M. & Yazdanpanah, M. 2021a. How can socio-psychological factors be related to water-efficiency intention and behaviors among Iranian residential water consumers? *Journal of Environmental Management*, 288, 112466.
- Shahangian, S. A., Tabesh, M. & Yazdanpanah, M. 2021b. Psychosocial determinants of household adoption of water-efficiency behaviors in Tehran capital, Iran: application of the social cognitive theory. *Urban Climate*, 39, 100935.
- Shahangian, S. A., Tabesh, M., Yazdanpanah, M., Zobeidi, T. & Raoof, M. A. 2022. Promoting the adoption of residential water conservation behaviors as a preventive policy to sustainable urban water management. *Journal of Environmental Management*, 313, 115005.
- Simukonda, K., Farmani, R. & Butler, D. 2018. Intermittent water supply systems: causal factors, problems and solution options. *Urban Water Journal*, 15, 488-500.
- Stavenhagen, M., Buurman, J. & Tortajada, C. 2018. Saving water in cities: assessing policies for residential water demand management in four cities in Europe. *Cities*, 79, 187-195.
- Tabesh, M. 2016. *Advanced Modeling of Water Distribution Networks*. University of Tehran Press, Tehran, Iran. (In Persian)
- Tabesh, M. & Hoomehr, S. 2009. Consumption management in water distribution systems by optimizing pressure reducing valves' settings using genetic algorithm. *Desalination and Water Treatment*, 2, 96-102. (In Persian)



- Tortajada, C., González-Gómez, F., Biswas, A. K. & Buurman, J. 2019. Water demand management strategies for water-scarce cities: the case of Spain. *Sustainable Cities and Society*, 45, 649-656.
- Vairavamoorthy, K., Gorantiwar, S. D. & Mohan, S. 2007. Intermittent water supply under water scarcity situations. *Water International*, 32, 121-132.
- Vairavamoorthy, K. & Lumbers, J. 1998. Leakage reduction in water distribution systems: optimal valve control. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124, 1146-1154.
- Wunderlich, S., St. George Freeman, S., Galindo, L., Brown, C. & Kumpel, E. 2021. Optimizing household water decisions for managing intermittent water supply in Mexico City. *Environmental Science and Technology*, 55, 8371-8381.
- Zapana-Churata, L., March, H. & Sauri, D. 2022. Water demand management strategies in fast-growing cities. The case of Arequipa, Perú. *International Journal of Water Resources Development*, 38, 363-387.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

