

**Abstract**

Water distribution networks are among the most critical urban infrastructures, with leakage being a major challenge. Pressure control and management have been identified as effective strategies for reducing leakage. In this study, a hydraulic model was developed for two networks, Jowitt & Xu and a section of the Tehran water distribution network, using WaterGEMS. The optimal location and outlet pressure of pressure-reducing valves (PRVs) were determined as an optimization problem using the MOPSO approach. A MATLAB-based program was designed and integrated with the EPANET hydraulic analyzer for implementation. The results were evaluated and ranked using the VIKOR and TOPSIS methods. Ultimately, the optimized placement of 9 PRVs ensured that 80% of the network nodes-maintained pressure within the standard range, compared to only 65% coverage with 14 PRVs in the initial network condition.

**Keywords:** Pressure Management, Water Distribution Network, Pressure Reducing Valve (PRV), Multi-Objective Optimization, Hydraulic Analysis, Multi-Criteria Decision Making (MCDM), MOPSO Algorithm.

Received: August 16,2024

Accepted: September 18,2024

**چکیده**

شبکه‌های توزیع آب از مهم‌ترین زیرساخت‌های شهری محسوب می‌شوند و نشت در این شبکه‌ها یکی از چالش‌های اساسی است. کنترل و مدیریت فشار به‌عنوان روشی کارآمد برای کاهش نشت مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، مدل‌سازی هیدرولیکی دو شبکه مصنوعی Jowitt & Xu و بخشی از شبکه آب تهران با استفاده از WaterGEMS انجام شد. سپس، مکان بهینه و میزان فشار خروجی شیرهای فشارشکن به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی با رویکرد MOPSO تعیین گردید. به‌منظور پیاده‌سازی، یک برنامه در MATLAB طراحی و با تحلیل‌گر هیدرولیکی EPANET تلفیق شد. نتایج حاصل با استفاده از روش‌های VIKOR و TOPSIS ارزیابی و اولویت‌بندی شدند. در نهایت، اجرای بهینه‌سازی با ۹ شیر فشارشکن، ۸۰٪ از گره‌های شبکه را در محدوده استاندارد فشار قرار داد، درحالی‌که استفاده از ۱۴ شیر فشارشکن در وضعیت اولیه تنها ۶۵٪ پوشش را فراهم می‌کرد.

**کلمات کلیدی:** مدیریت فشار، شبکه توزیع آب، شیر فشارشکن، بهینه‌سازی چندهدفه، تحلیل هیدرولیکی، تصمیم‌گیری چندمعیاره، الگوریتم MOPSO

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۵/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۶/۲۸

1- MSc., Civil Engineering Department, Ale-Taha Institute of Higher Education, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Ale-Taha Institute of Higher Education, Tehran, Iran.

Email:

\* Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی آل طه، تهران، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی آل طه، تهران، ایران.

ایمیل:

فشار بالا در این شبکه‌ها باعث افزایش نشت و مصرف ناخواسته می‌شود که مدیریت بهینه فشار را به یک راهکار ضروری برای کاهش تلفات آب و جلوگیری از آسیب‌های شبکه تبدیل می‌کند. استفاده از شیرهای فشارشکن، مخازن و پمپ‌ها برای کنترل فشار از

**مقدمه**

شبکه‌های آبرسانی با افزایش جمعیت و کاهش منابع آب تجدیدپذیر با چالش‌های جدی مواجه هستند.

ارزیابی کارایی روش‌های VIKOR و TOPSIS برای تعیین مکان بهینه شیرهای فشارشکن در شبکه آبرسانی

مآنده شکوهی جم، پژمان طاهری قزوینی

آب، به این نتیجه رسیدند که طراحی پویای تک‌هدفه، شبکه‌های آبرسانی را بهینه‌تر می‌کند.

مطالعات دیگری مانند تحقیق مقدم و همکاران (۱۳۹۲) که به کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه در طراحی شبکه‌های توزیع آب پرداخته‌اند، همچنین پژوهش‌های اسلامی و شقاقیان (۱۳۹۴) که به بررسی موقعیت شیرهای فشارشکن پرداختند، نشان می‌دهند که استفاده از شیرآلات فشارشکن به‌عنوان یک روش کم‌هزینه و مؤثر در کاهش نشت و فشار اضافی در شبکه‌ها مؤثر است.

در سال‌های اخیر نیز بسیاری از محققان به تحلیل و بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم‌های مختلف پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، وهاب‌زاد (۱۳۹۵) از الگوریتم گرگ خاکستری برای بهینه‌سازی قطر و طول لوله‌ها در شبکه آبرسانی استفاده کرده و نشان داد که می‌توان با این روش ۳۲ درصد در هزینه‌ها صرفه‌جویی کرد. همچنین، یوسفی و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از الگوریتم شیر مورچه، هزینه طراحی شبکه آبرسانی را ۱۵ درصد کاهش دادند.

در سطح جهانی، پژوهش‌هایی مانند کار Li و Dai (۲۰۱۴) و Xu و همکاران (۲۰۱۴) نیز بر بهینه‌سازی تعداد، محل و تنظیمات شیرهای کنترل فشار تأکید داشته و نشان داده‌اند که این اقدامات می‌توانند به طور چشمگیری نشت و فشار اضافی را کاهش دهند. به‌طور مشابه، Saldarriaga و Salcedo (۲۰۱۵) با استفاده از

روش‌های رایج است، اما تعیین مکان بهینه این تجهیزات، علاوه بر ملاحظات مهندسی، نیازمند در نظر گرفتن هزینه‌ها و محدودیت‌های اجرایی است. بهینه‌سازی همزمان تعداد و موقعیت شیرهای فشارشکن، مجموعه‌ای از گزینه‌های کارآمد را ارائه می‌دهد که انتخاب بهترین راهکار با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام می‌شود.

تحولات سیستم‌های آبرسانی از دوران باستان تا کنون به‌طور مستمر ادامه داشته است. اما در جوامع شهری، این سیستم‌ها به زیرساخت‌های استاندارد تبدیل شده‌اند و نوآوری‌های بسیاری در مدیریت این سیستم‌ها انجام گرفته است. بر اساس گزارش بانک جهانی، حجم قابل توجهی از آب ورودی به شبکه‌های توزیع به دلیل نشت هدر می‌رود که حدود ۴۸/۶ میلیارد متر مکعب در سال برآورد شده است (Thornton & et al., 2008). مطالعات نشان می‌دهند که مکان‌یابی و نصب شیرهای فشارشکن در نقاط مختلف شبکه می‌تواند به کاهش نشت و مدیریت فشار کمک کند.

در سال‌های اخیر، روش‌های بهینه‌سازی و الگوریتم‌های پیشرفته برای طراحی و مدیریت شبکه‌های توزیع آب پیشنهاد شده است. به عنوان مثال، هومهر (۱۳۸۵) از الگوریتم ژنتیک برای کاهش نشت و مدیریت مصرف استفاده کرد و نشان داد که شیرآلات به طور میانگین ۳۳ درصد از میزان نشت را کاهش می‌دهند. همچنین، قاجارنیا و همکاران (۱۳۹۰) با ارائه روش طراحی پویای شبکه‌های توزیع

شبکه‌های آبرسانی برای شرایط بیشترین تقاضا طراحی می‌شوند، اما در بیشتر زمان‌ها فشار اضافی در سیستم وجود دارد که عامل افزایش نشت است (مهدوی، ۱۳۹۱). عملکرد نامناسب شبکه موجب توزیع فشار بالای غیرضروری می‌شود و مدیریت فشار از طریق تنظیم شیرهای فشارشکن در اولویت شرکت‌های آب قرار گرفته است (عادلی و همکاران، ۱۳۹۵). مطالعات نشان داده که مدیریت فشار، روشی مقرون‌به‌صرفه برای کاهش نشت است (Covelli & et al., 2016).

از اوایل دهه ۱۹۸۰، اثرات زیان‌بار فشار اضافی در شبکه‌های توزیع آب شناخته شده است (Janković- Nišić & et al., 2004). فشار بالا موجب افزایش حوادث و شکست در شبکه‌ها شده و روش‌های مدیریت فشار به‌عنوان بخشی از مسائل بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Hindi & Hamam, 1991).

حداکثر فشار در شبکه‌های توزیع آب نباید از میزان مجاز فراتر رود تا از ترکیدگی لوله‌ها جلوگیری شود. در ایران، این مقدار معمولاً ۵ اتمسفر در نظر گرفته می‌شود (نامجو، ۱۳۹۵). حداقل فشار برای ساختمان‌های یک طبقه ۱,۴ اتمسفر بوده و برای هر طبقه اضافی، ۰,۴ اتمسفر افزایش می‌یابد (نامجو، ۱۳۹۵).

برای اجرای طرح ناحیه‌بندی فشار در شبکه‌های توزیع آب، باید نقشه‌های دقیق با تراز ارتفاعی شهرسازی و

الگوریتم NSGA-II، بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی را برای کاهش نشت و هزینه‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند.

در نهایت، مطالعات اخیر مانند تحقیق Demirel (۲۰۲۲) در استانبول و Scholz (۲۰۲۲) در آفریقای جنوبی، نشان می‌دهند که استفاده از شیرهای فشارشکن هوشمند می‌تواند در کاهش نشت و مدیریت فشار شبکه‌های توزیع آب نقش بسزایی داشته باشد.

پژوهش‌های بسیاری بر روی شبکه‌های آبرسانی انجام شده و به‌کارگیری روش‌های مدرن بهینه‌سازی در این حوزه توسعه یافته است (قاجارنیا و همکاران، ۱۳۹۰). به دلیل افزایش نیازهای آبی و محدودیت منابع، مدیریت بهینه شبکه‌های توزیع آب اهمیت ویژه‌ای یافته است (نامجو، ۱۳۹۵). نشت آب، که معمولاً در محل اتصالات و ترک‌های لوله‌ها رخ می‌دهد، از مسائل اساسی شبکه‌های آبرسانی محسوب می‌شود. این نشت را می‌توان با تحلیل و مدیریت فشار و استفاده از شیرهای فشارشکن کاهش داد (Dai & Li, 2014).

سیستم‌های توزیع آب شامل مجموعه‌ای از لوله‌ها، تأسیسات ذخیره‌سازی و اجزای مرتبط هستند که آب را به مصرف‌کنندگان منتقل می‌کنند (اسدی، ۱۳۹۷). شبکه‌های توزیع آب به سه دسته شاخه‌ای، حلقوی و درهم طبقه‌بندی می‌شوند که هر یک ویژگی‌ها و مزایای خاص خود را دارند (اسدی، ۱۳۹۷). فشار اضافی می‌تواند باعث افزایش مصرف و نشت شود، در نتیجه طراحی باید با رعایت ملاحظات فنی و اقتصادی انجام گیرد (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۹).

با نصب شیرآلات و لوله‌های جدید، امکان تأمین آب نواحی را به روش‌های دیگر فراهم کرده و موجب توزیع بهینه فشار می‌شود (نشریه ۳-۱۱۷، ۱۳۹۲). برای کنترل خطوط انتقال، می‌توان از شیرهای فشارشکن یا شیرهای کنترلی برقی استفاده کرد که امکان تنظیم فشار در یک محدوده وسیع را فراهم می‌کنند (نشریه ۳-۱۱۷، ۱۳۹۲).

کنترل سطح آب در مخازن ذخیره نیز نقش مهمی در مدیریت فشار دارد. این کنترل‌کننده‌ها می‌توانند با خاموش کردن پمپ‌ها پس از پر شدن مخازن، از ضربه قوچ جلوگیری کنند (مصلحی و جلیلی‌زاده، ۱۳۹۵). همچنین، تقسیم‌بندی نواحی به روز و شب با شیرآلات مرزی می‌تواند فشار را در طول روز و شب بهینه کند و میزان نشت را کاهش دهد. مدیریت فشار به‌عنوان راهکاری بلندمدت، به کاهش نشت، تثبیت فشار، افزایش رضایت مشترکین و کاهش آسیب به تجهیزات کمک می‌کند (Girard & Stewart, 2007).

### مواد و روش‌ها

در این بخش شبکه‌های توزیع آب که قرار است در ادامه بر روی آن‌ها اقدام گردد شرح داده می‌شود. در ابتدا شبکه توزیع آب مصنوعی و سپس به توصیف شبکه توزیع آب آبفای منطقه یک تهران می‌پردازیم.

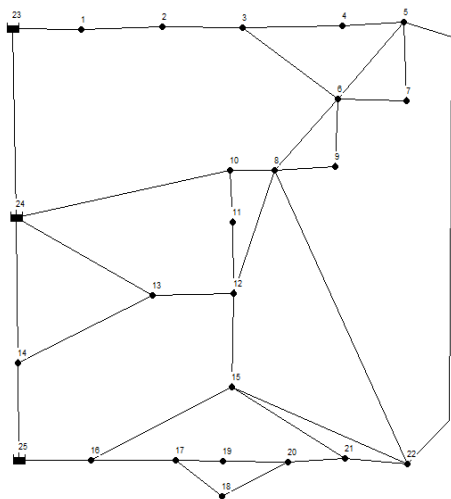
### شبکه توزیع آب مصنوعی

اولین مطالعه موردی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است مربوط به شبکه آبرسانی مصنوعی

شبکه توزیع آب فراهم باشد تا محدوده تحت پوشش مخازن مشخص شود. این فرآیند شامل شناسایی لوله‌های موجود در مرزهای هر ناحیه، انجام فشارسنجی و تهیه نقشه‌های هم‌فشار است تا ارتباط بین نواحی هم‌جوار قطع گردد. در شهرهای بزرگ که از ابتدا ناحیه‌بندی انجام نشده، باید به تدریج این کار صورت گیرد (نشریه ۳-۱۱۷، ۱۳۹۲).

شیرهای فشارشکن (PRV) به‌صورت خودکار فشار ورودی را تنظیم کرده و با کاهش فشارهای ناخواسته، از هدررفت آب جلوگیری می‌کنند. این شیرها بر اساس عملکرد به دو نوع مستقیم و پایلوت‌دار و از نظر سیال به دو نوع هیدرولیکی و پنوماتیک تقسیم می‌شوند. انتخاب صحیح شیر بر اساس محل استفاده، میزان مصرف سیال و فشار ورودی و خروجی اهمیت دارد. انتخاب نادرست اندازه شیر می‌تواند باعث افزایش هزینه و کاهش عمر مفید آن شود (اسلامی، ۱۳۹۴؛ Xu & et al., 2014). عملکرد شیرهای فشارشکن مبتنی بر تعادل فشارهای ورودی، خروجی و داخلی است. در صورت افزایش فشار خروجی، شیر پیلوت‌دار مسیر عبور را کاهش داده و فشار داخلی را افزایش می‌دهد تا جریان را تنظیم کند. در شرایط عدم مصرف، شیر جریان را قطع کرده و از انباشته شدن فشار جلوگیری می‌کند (Walski & et al., 2003).

حوضچه‌های فشارشکن برای تبدیل فشار به فشار اتمسفری در مسیر لوله‌های انتقال کاربرد دارند، اما مشکلات بهره‌برداری و نگهداری آن‌ها باید مدنظر قرار گیرد (نشریه ۳-۱۱۷، ۱۳۹۲). ناحیه‌بندی مجدد نیز



شکل ۱- مدل هیدرولیکی شبکه توزیع آب مصنوعی.

ارزیابی شبکه- بدون پیاده‌سازی مدیریت فشار

در ادامه، نتایج تحلیل هیدرولیکی برای ساعت حداقل مصرف (۴ صبح) و حداکثر مصرف (۹ صبح) ارائه شده است (شکل ۲).

جدول ۱ نتایج هیدرولیکی شبکه بدون پیاده‌سازی طرح مدیریت فشار در شبکه مصنوعی

مقادیر متناظر با کرانه‌های بالا و پایین فشار در شبکه مصنوعی و در شرایطی که هیچ شیرفشارکنی در ساختار شبکه وجود ندارد، در جدول فوق ارائه شده و توزیع فشار در سطح شبکه نیز با استفاده از خطوط هم فشار ذیل به نمایش درآمده است.

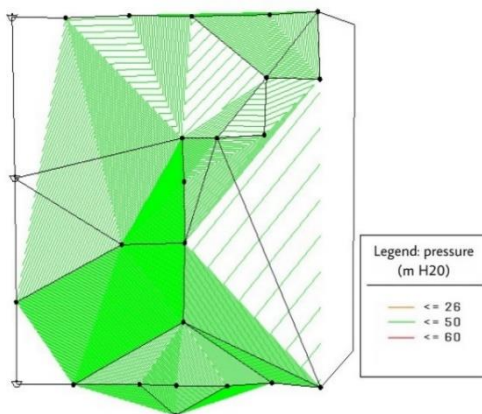
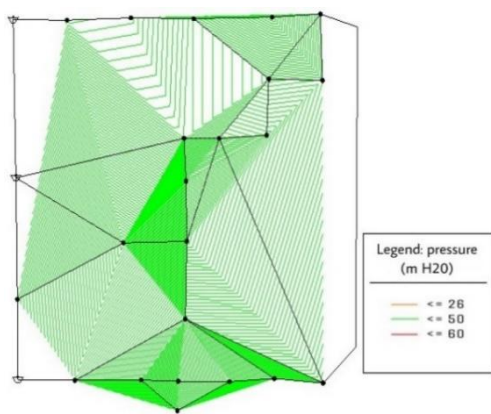
جدول ۱- نتایج هیدرولیکی شبکه بدون پیاده‌سازی طرح مدیریت فشار در شبکه مصنوعی

تحت عنوان Jowitt&Xu است، این شبکه از جمله مثال‌های معتبری است که توسط محققین زیادی از جمله Germanopoulos and Sterling and Bargela (1989) (1989) مورد استفاده قرار گرفته است. سیستم توزیع آب مصنوعی فوق شامل ۲۲ گره، سه مخزن و ۳۷ خط لوله با طولی برابر ۴۲۵۷۳ متر است. متوسط مصرف آب در شبکه ۱۵۵ لیتر بر ثانیه و تراز آب مخازن شبکه مورد نظر دارای ارتفاعی برابر ۵۴،۶۶-۵۴،۶-۵۴،۵ متر و ضریب تغییرات روزانه نیاز آبی در شبکه ۰،۶-۱،۴ در ۲۴ است. اطلاعات ورودی مربوط به گره‌ها و لوله‌های به کار برده شده در شبکه مطابق شکل (۲-۳) در جداول (۱-۳) و (۲-۳) ارائه شده است (هومهر و تابش، ۱۳۹۵).

### آماده‌سازی و تنظیمات مدل هیدرولیکی شبکه مصنوعی

برای مدل نمودن یک شبکه باید تمام اجزا و متعلقات آن را شناخته و بکار برد. در این پژوهش برای مدل‌سازی از نرم افزار WaterGEMS بهره گرفته شده که امروزه کاربران بسیاری در سطح جهان از این نرم افزار قدرتمند استفاده می‌کنند و کاربردهای آن در سطح گسترده‌ای آزموده شده است. به این منظور برای ایجاد مدل هیدرولیکی مطابق شکل ۱ در نرم افزار WaterGEMS پیاده‌سازی شد. در ادامه خروجی نرم افزار WaterGEMS به نرم افزار Epanet به منظور تلفیق بهینه‌سازی و شبیه‌سازی ارسال شد.

۹:۰۰	۲۱۷	۳۰,۲۰	۳۸,۲۲	زما	دبی (لیتر بر	حداقل فشار	حداکثر فشار
.				ن	ثانیه)	(متر)	(متر)
۴:۰۰					۹۳	۳۰,۹۷	۴۴,۶۲
.							



شکل ۲- خطوط هم‌فشار در شبکه در ساعت حداقل مصرف (شکل سمت راست) و ساعت حداکثر مصرف (شکل سمت چپ) در ادامه، اثرگذاری توزیع فشار بر تأمین مصارف در شبکه آبرسانی مصنوعی مورد بررسی قرار گرفته است. به ویژه، مصرف مبتنی بر فشار در شرایط مختلف فشار حدی در جدول زیر تحلیل شده است. در ساعت صفر، فشار در تمامی گره‌های شبکه بالاتر از ۲۶ متر است و در این شرایط، مجموع مصرف مبتنی بر فشار در حالت فشار حدی برابر با ۲۶ متر با مصرف پایه شبکه هم‌راستا می‌باشد. به علاوه، در این جدول مصرف مبتنی بر فشار در حالت فشار حدی معادل ۳۵

جدول ۲- اثرگذاری توزیع فشار بر مصارف قبل از مدیریت فشار در شبکه مصنوعی

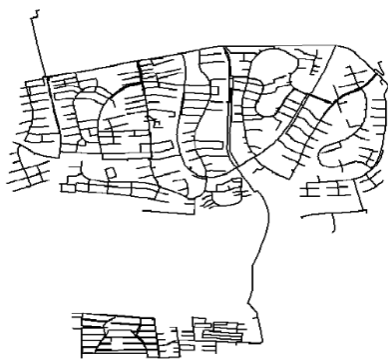
مصرف مبتنی بر فشار	مصرف مبتنی بر فشار
فشار حدی = ۲۶ متر	فشار حدی = ۳۵ متر
مصرف پایه در ساعت صفر	

۱۲۴

۱۲۴

۱۲۳،۹

۴۰۵۶ گره و ۶۳ شیر فشارشکن می‌باشد. فشار در گره‌های شبکه از ۱۲- متر تا ۱۹۸ متر متغیر است. در این تحقیق، به دلیل وسعت زیاد شبکه، تنها بخشی از آن، به نام محدوده R۳۷، مورد بررسی قرار گرفته است. این بخش از شبکه با طول ۱۰۲،۲۶۳ متر شامل ۲۲۳۷ گره، ۱۶۵۲ لوله، یک مخزن و ۱۴ شیر فشارشکن می‌باشد. از ۱۴ شیر فشارشکن موجود، ۱۲ شیر فعال و ۲ شیر غیر فعال هستند. ارتفاع پایین‌ترین نقطه محدوده ۱۳۲۰ متر و بالاترین نقطه آن ۱۵۲۲ متر است. همچنین، فشار در گره‌های این بخش از شبکه از ۱۲ متر تا ۱۹۱ متر متغیر است و نیاز آبی روزانه آن به حدود ۳۴۳ لیتر بر ثانیه می‌رسد. برای اطلاعات دقیق‌تر از شبکه، جزئیات بیشتر در شکل ۳ ذکر شده است. جدول ۳ همچنین نتایج هیدرولیکی وضع موجود شبکه بدون پیاده سازی طرح مدیریت فشار در شبکه واقعی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- مدل هیدرولیکی شبکه توزیع آب واقعی

در ادامه، برای معرفی محل‌های مناسب برای نصب شیرهای فشارشکن در شبکه، فضای جواب به تعداد کل لوله‌های موجود در شبکه بستگی دارد. به طور خاص، فضای جواب برای انتخاب محل‌های نصب شیر فشارشکن برابر با ۷۷۷۰ می‌باشد. این فضای جواب نیاز به استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی برای یافتن بهترین محل‌ها دارد. همچنین، برای مدل پیشنهادی فرض شده است که تمامی لوله‌ها پتانسیل نصب شیرهای فشارشکن را دارند. با توجه به اینکه تعداد لوله‌ها در این شبکه ۳۷ عدد است، بنابراین تعداد کل لوله‌ها برابر با ۳۷ می‌باشد.

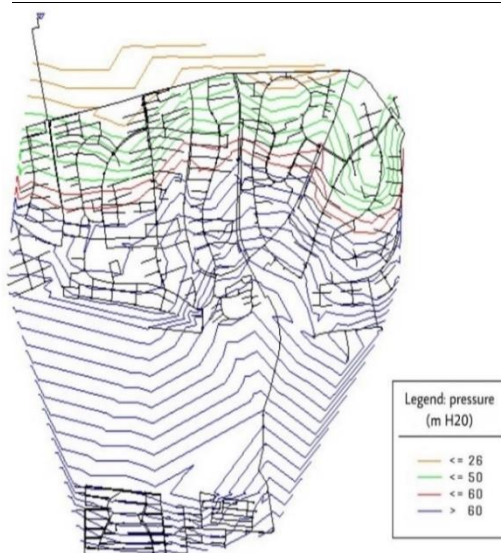
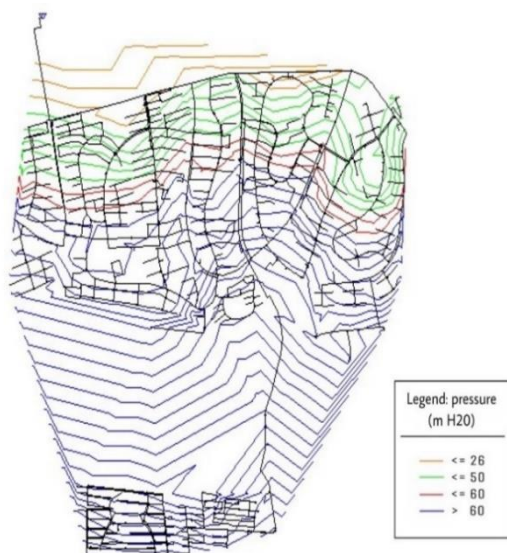
### مشخصات شبکه توزیع آب آبفا منطقه یک تهران

مطالعات حاضر در منطقه شمیرانات تهران با وسعتی حدود ۴،۶ کیلومتر مربع و طول کل لوله‌های شبکه به میزان ۳۷۷،۷۶۱ متر انجام شده است. این منطقه شیب‌دار است و ارتفاع پایین‌ترین نقطه آن ۱۳۰۰ متر و بالاترین نقطه آن ۱۶۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد. عمده نیازهای آبی در این منطقه به مصارف مسکونی اختصاص دارد و برخی از کاربران تجاری نیز وجود دارند. لوله‌های شبکه از جنس‌های مختلفی شامل داکتایل، آزبست، چدن، پلی اتیلن و PVC ساخته شده‌اند. شبکه توزیع آب این منطقه شامل ۵ زون، ۸۲۵۵ لوله با طول‌های ۲۵ تا ۱۶۰۰ متر، ۵ مخزن،

جدول ۴ همچنین اثرگذاری توزیع فشار بر مصارف قبل از مدیریت فشار در شبکه واقعی را نشان می‌دهد. شکل ۴ نیز خطوط هم فشار در شبکه در ساعت حداقل مصرف (شکل سمت چپ) و ساعت حداکثر مصرف (شکل سمت راست) نشان می‌دهد.

جدول ۳- نتایج هیدرولیکی وضع موجود شبکه بدون پیاده سازی طرح مدیریت فشار در شبکه واقعی.

زمان	دبی (لیتر بر ثانیه)	حداقل فشار (متر)	حداکثر فشار (متر)
۴:۰۰	۲۰۰,۱۹۹	۱۲,۹۲	۱۹۱,۴۴
۱۴:۰۰	۴۵۴,۰۲۴	۱۴,۰۵	۱۷۶,۵۵



شکل ۴- خطوط هم فشار در شبکه در ساعت حداقل مصرف (شکل سمت چپ) و ساعت حداکثر مصرف (شکل سمت راست) محدوده فشارهای نامطلوب وضع موجود شبکه واقعی

جدول ۴- اثرگذاری توزیع فشار بر مصارف قبل از مدیریت فشار در شبکه واقعی

در این پژوهش انتخاب بهترین مکان‌ها از بین کلیه مکان‌ها با پتانسیل نصب شیر فشارشکن، برای کاهش فشارهای اضافی و نامطلوب مورد توجه است. در جدول ۵ درصد توزیع فشارهای مطلوب و بحرانی قید شده که توزیع آن در خطوط هم فشار ذیل قابل مشاهده است.

مصرف مبتهنی بر فشار	مصرف مبتهنی بر فشار	مصرف مبتهنی بر فشار
فشار حدی = ۳۵ متر	فشار حدی = ۲۶ متر	مصرف مبتهنی بر فشار
۲۵۹,۲	۲۶۴,۷۷	۲۶۸,۰۴

## جدول ۵- درصد توزیع فشار در شبکه واقعی

درصد توزیع فشار در شبکه	کرانه‌های فشار
۰,۰۸	$26 \leq$
۰,۵۰	۲۶-۵۰
۰,۱۵	۵۰-۶۰
۰,۲۷	$60 \geq$

حد پایینی این محدوده، فشار حداقل مطلوب شبکه است که معمولاً فشاری است که برای مشترکین بدون نارضایتی از کمبود فشار قابل استفاده است و بین ۱۴-۲۶ متر قرار دارد. از سوی دیگر، حد بالای این محدوده، فشار حداکثر مطلوب است که در فشارهای بالاتر احتمال نشت به طور تصاعدی افزایش می‌یابد و معمولاً کمتر از فشارهای قابل تحمل توسط لوله‌ها و اتصالات است، این مقدار بین ۲۶ تا ۶۰ متر در نظر گرفته شده است.

علاوه بر اهداف، متغیرهای تصمیم و محدودیت‌هایی مانند حداقل و حداکثر فشار مجاز در شبکه نیز باید تعیین شوند.

## تابع هدف فشارهای مطلوب

تابع هدف فوق به صورت رابطه ی (۱) در نظر گرفته شده است.

$$Z_1 = 100 \times \frac{\text{تعداد گره فشار مطلوب}}{\text{تعداد نقاط کل شبکه}} \quad (1)$$

هم چنین، محدوده فشارهای مطلوب در شبکه نیز به صورت رابطه (۲) نشان داده شده است:

$$p_{\text{حداکثر}} \leq p_i \leq p_{\text{حداقل}} \quad (2)$$

که در آن  $p_{\text{حداقل}}$  مطلوب حداقل فشار مطلوب،  $p_{\text{حداکثر}}$  مطلوب حداکثر فشار مطلوب و  $p_i$  فشار در نقطه  $i$  است (Reis & Chaudhry, 1999؛ نشریه ۳-۱۱۷، ۱۳۹۲). حد پایین و بالای محدوده فشارهای

## توابع هدف و متغیرهای بهینه‌سازی

هدف اصلی این پژوهش انتخاب بهترین موقعیت برای نصب شیرهای فشارشکن در شبکه به منظور کاهش فشار اضافی و بهینه‌سازی تعداد شیرهای فشارشکن موجود است. در این راستا، تعداد شیرهای مورد نیاز و میزان پوشش شبکه در محدوده فشار مطلوب به عنوان معیارهای ارزیابی مدنظر قرار گرفته است. برای توسعه یک مدل بهینه‌سازی، دو هدف اصلی به شرح زیر تعریف شده است:

هدف اول: کاهش فشار اضافی در شبکه ( $Z_1$ )

هدف دوم: کاهش تعداد شیرهای فشارشکن ( $Z_2$ )

اگرچه مدیریت فشار در شبکه هدف اصلی است، در این تحقیق تابع هدف دیگری نیز تعریف شده که کیفیت سرویس‌دهی و ریسک وقوع حوادث را از طریق کنترل و مدیریت فشار در نظر می‌گیرد. در این راستا، محدوده‌ای از فشارها به عنوان فشار مطلوب برای سرویس‌دهی تعریف شده است. هدف از بهینه‌سازی، افزایش پوشش این محدوده در کل شبکه است.

هر ذره از میان اعضای مخزن یک رهبر انتخاب می‌کند و حرکت خود را بر اساس آن رهبر انجام می‌دهد. یعنی سرعت و موقعیت آن به روز می‌شود. رهبر حتماً باید عضو مخزن و همچنین نامغلوب باشد. برای انتخاب یک جواب در بین جواب‌های نمودار یک انتخاب مبتنی بر ناحیه انجام می‌شود. یعنی باید در ابتدا ناحیه مورد نظر شبکه بندی شود و سپس یکی از خانه‌ها انتخاب و در پایان یکی از اعضای آن خانه برگزیده شود. این انتخاب توسط یک توزیع گسسته صورت می‌گیرد.

بهترین خاطره شخصی هر کدام از ذرات به روز می‌شوند. برای مقایسه بهترین بردار خاطره شخصی و بهترین خاطره جهانی به شکل زیر عمل می‌شود:

الف) اگر موقعیت جدید بهترین خاطره را مغلوب کند، آنگاه موقعیت جدید جایگزین بهترین خاطره می‌شود.  
ب) اگر موقعیت جدید توسط بهترین خاطره مغلوب شد، کاری انجام نمی‌گیرد.

مطلوب در این تحقیق به ترتیب ۲۶ و ۶۰ متر در نظر گرفته شده است.

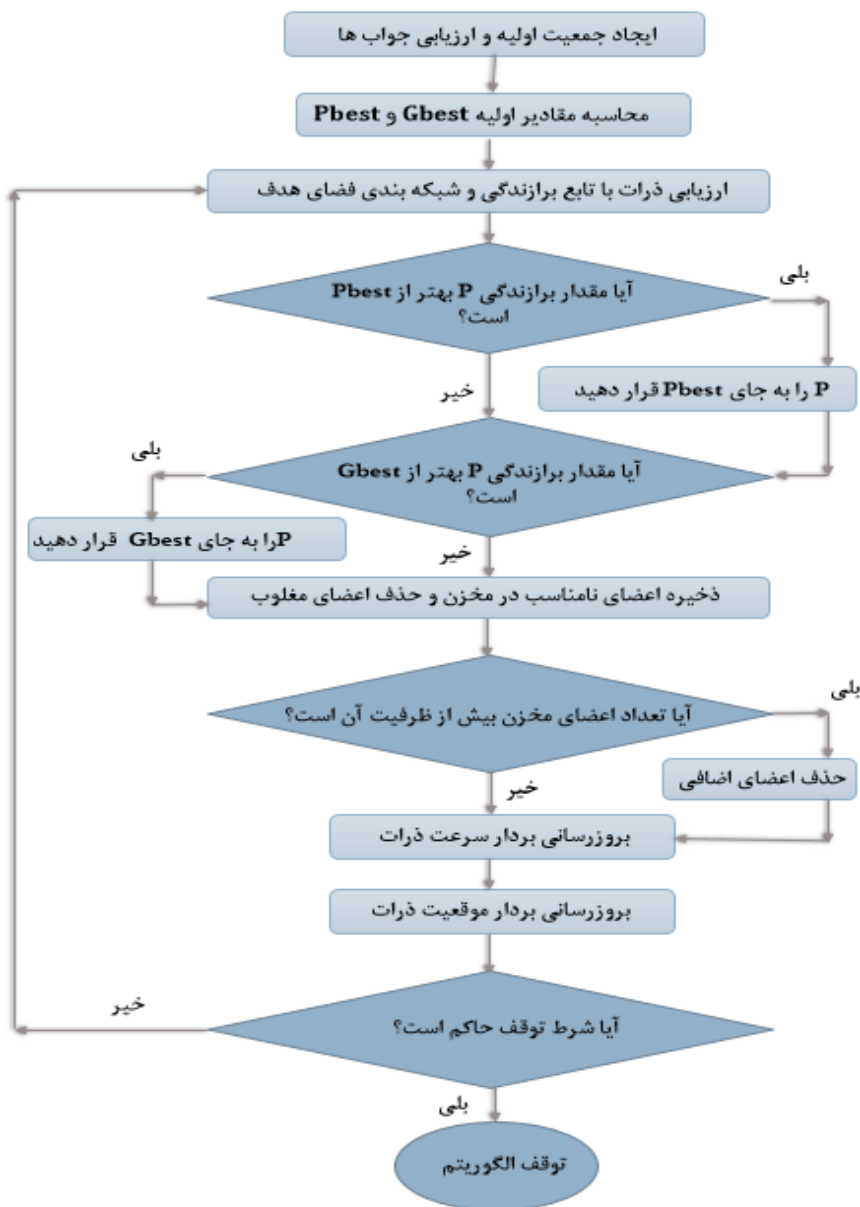
### مراحل اجرای الگوریتم Mopso

در الگوریتم Mopso یک مفهومی به نام آرشیو یا مخزن نسبت به الگوریتم Pso اضافه شده است که به تالار مشاهیر نیز معروف است. ترتیب اجرای این الگوریتم به شرح زیر می‌باشد:

پس از نوشتن زیر برنامه، پارامترهای مورد نیاز برای اجرای الگوریتم Mopso به شرح زیر به برنامه معرفی می‌شوند. تعداد حداکثر تکرار برای اجرای الگوریتم، اندازه جمعیت، مقادیر فاکتورهای  $C_1$ ،  $C_2$ ،  $W$  و تعداد اعضای مخزن. جمعیت اولیه ایجاد می‌شود.

اعضای نامغلوب جمعیت جداسازی و در مخزن ذخیره می‌شوند.

فضای هدف کشف شده جدول بندی می‌شود.



شکل ۵- مراحل شماتیک الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه

### شبکه مصنوعی Jowitt & Xu

اجرای مدل بهینه سازی با در نظر داشتن توابع هدف در این بخش، مدل مدیریت فشار پیشنهادی ارائه شده بر روی شبکه توزیع آب مصنوعی شناخته شده آزموده شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. هدف از این مطالعه سنجش بهینه ساز بر روی شبکه مصنوعی Jowitt & Xu و تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده از نرم افزار Epanet است. اجرای مدل با استفاده از الگوریتم Mopso و با در نظر گرفتن توابع هدف کاهش فشار و کاهش تعداد شیرهای فشارشکن در شبکه به صورت مجموعه نقاط منتخب بهینه برای نصب شیرهای فشارشکن ارائه و نتایج بدست آمده از اجرای الگوریتم در جدول ۶ بیان شده است. در جدول فوق شماره شیرهای فعال در شبکه و همچنین تنظیمات فشار خروجی هر یک از شیرهای فشارشکن بر حسب متر به انضمام متوسط فشار شبکه به ازای جانمایی هر شیر نشان داده شده است.

ج) اگر هیچ کدام یکدیگر را مغلوب نکنند، به تصادف یکی به عنوان بردار بهترین موقعیت در نظر گرفته می شود.

۱. اعضای نامغلوب جدید به مخزن افزوده می شوند.
۲. اعضای مغلوب مخزن حذف می شوند.
۳. اگر تعداد اعضای مخزن بیش از ظرفیت تعیین شده باشد، اعضای اضافی حذف می شوند. باید توجه داشت که مخزن ظرفیتی محدود دارد و برای حذف یک پاسخ دقیقاً بایستی عکس انتخاب رهبر عمل نمود. در نهایت اگر شرایط خاتمه محقق نشده باشد از مرحله ۴ به بعد الگوریتم تکرار می شود.

بنابراین الگوریتم Mopso را می توان به صورت فلوچارت شکل ۵ بیان نمود.

### نتایج و بحث

جدول ۶ شیرهای فعال و تنظیمات هر شیر در شبکه مصنوعی

تعداد شیر	شماره شیر فعال و تنظیمات هر شیر		متوسط فشار کل شبکه
۰	شماره شیر تنظیمات		۳۸.۶۱
۱	شماره شیر تنظیمات	P-۱۲-۱۱ ۲۸,۰۴	۳۳,۲۵
۲	شماره شیر تنظیمات	P-۶-۵ ۲۵,۹۸	P-۱۲-۱۱ ۲۸,۰۴ ۳۴,۶۳

با توجه به جدول ۷، اعمال طرح مدیریت فشار در این حالت منجر به آن شده که مقادیر حداکثر فشار از ۴۴،۶۲ متر در ساعت حداقل مصرف و ۳۸،۲۲ متر در ساعت حداکثر مصرف (قبل از اجرای مدیریت فشار) به ترتیب به مقادیر ۴۰،۷۴ و ۳۶،۴۳ متر (بعد از اجرای مدیریت بهینه فشار) کاهش پیدا نماید و همچنین منجر به آن شده که حداقل فشار ۲۶ متر برای هر دو ساعت حداقل و حداکثر مصرف تحقق یافته. در ادامه، توزیع فشار در شبکه با استفاده از خطوط هم فشار ارائه گردیده است.

علاوه بر این، اثرگذاری توزیع فشار بر تأمین مصارف مشترکین نیز در ذیل و در قالب مصارف مبتنی بر فشار بررسی شده است. با توجه به این که در این راه حل نیز، فشار متناظر با ساعت صفر در تمامی گره‌های شبکه مقداری بالاتر از ۲۶ متر است، مجموع مصرف مبتنی بر فشار در حالت فشار حدی ۲۶ متر، با مصرف پایه شبکه در این ساعت برابر است. با این وجود، کاهش مقادیر فشار در نتیجه اجرای راه حل بهینه، منجر به آن شده که مقدار مصرف مبتنی بر فشار مرتبط با فشار حدی ۳۵ متری (۱۲۲/۷۴ لیتر بر ثانیه) در قیاس با مقدار متناظر آن در شرایطی که مدیریت فشار اجرا نمی‌گردد (۱۲۳/۹ لیتر بر ثانیه) کاهش یابد.

همانطور که پیش تر بیان شده اجرای الگوریتم پیشنهادی بر روی یک شبکه مصنوعی منحصراً به منظور ارزیابی کد در محیط متلب بوده که این موضوع

با اجرای مدل و اخذ نتایج حاصله مطابق جدول بالا با توجه به معرفی تنها یک راه حل بهینه منطقی توسط الگوریتم بهینه ساز لذا از بررسی ماتریس VIKOR و Topsis در این بخش صرف نظر کرده و در ادامه عملکرد الگوریتم پیشنهادی در شبکه مصنوعی در دو راه حل قبل و بعد از بهینه یابی به منظور اثرگذاری رویکرد مدیریت فشار بهینه در زمان حداقل و حداکثر مصرف مورد توجه قرار گرفته است.

### اثرگذاری رویکرد مدیریت فشار بهینه

در این بخش، نتایج پیاده‌سازی راه حل بهینه مدیریت فشار که با تعیین تنظیمات و مکان بهینه شیرآلات اعمال گردیده، بیان می‌شود. برای این منظور، دو شیر فشارشکن ۵-۶-p و ۱۱-۱۲-p که هرکدام در وضعیت فعال قرار گرفته، به عنوان ابزار کنترل فشار مدنظر می‌باشند. در جدول ۷، نتایج تحلیل هیدرولیکی برای ساعت حداقل مصرف (۴ صبح) و حداکثر مصرف (۹ صبح) ارائه شده است.

جدول ۷- نتایج مدل هیدرولیکی پیاده سازی شیرهای

#### فشارشکن در شبکه مصنوعی

حداکثر فشار (متر)	حداقل فشار (متر)	دبی (لیتر بر ثانیه)	زما ن
۴۰،۷۴	۳۱،۰۵	۹۳	۴:۰۰
۳۶،۴۳	۲۹،۴۳	۲۱۷	۹:۰۰

در نهایت با استفاده از نتایج حاصل از اجرای الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک ارائه شده توسط دیگر محقق می توان اظهار داشت، الگوریتم دو هدفه (Mopso) با رعایت حداقل فشار مطلوب در تمامی گره ها نسبت به الگوریتم ژنتیک رفیع تر می باشد.

جدول ۸- فشار بهینه توسط الگوریتم ژنتیک

Node	Load1	Load2	Load3
۱۳	۳۱,۵	۳۱,۱	۳۰,۴
۱۹	۲۵,۹	۲۸,۳	۲۸,۹
۲۱	۲۵,۹	۲۸,۴	۲۹,۲
۲۲	۳۱	۳۰,۷	۳۰,۸

### شبکه آبفا منطقه یک تهران

#### اجرای مدل بهینه ساز با توابع هدف

در این بخش مدل مدیریت فشار پیشنهادی ارائه شده در فصل قبل بر روی شبکه توزیع آب واقعی آزموده و مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. هدف از این مطالعه سنجش مدل بهینه سازی بر روی بخشی از شبکه واقعی آبفای منطقه یک تهران و تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده از نرم افزار Epanet است.

مدل بهینه سازی الگوریتم Mopso به عنوان مدل بهینه سازی چند هدفه استفاده می گردد، که در این پژوهش تابع هدف اول کاهش فشار در شبکه و تابع هدف دوم مدل بهینه سازی تعداد شیرهای به کار رفته در شبکه در نظر گرفته شده است. مکان و تعداد بهینه شیرهای فشارشکن به منظور کاهش فشار و تنظیمات

با توجه به نتایج بدست آمده صحت الگوریتم به کار برده شده را به خوبی نشان می دهد. در ادامه به منظور ارزیابی دقیق تر، الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم ژنتیک اجرا شده توسط محقق دیگر بر روی شبکه مصنوعی ارائه شده است.

### سنجش الگوریتم های بهینه سازی ازدحام ذرات و ژنتیک بر روی شبکه مصنوعی

در این بخش نتایج حاصل از تحقیقات صورت پذیرفته با استفاده از الگوریتم دو هدفه ازدحام ذرات در شبکه مصنوعی به جهت بدست آوردن میانگین فشار شبکه با کمترین تعداد شیرهای فشارشکن با نتایج حاصل از استفاده الگوریتم ژنتیک بر روی شبکه فوق توسط Nicolini و Zovatto مورد بررسی قرار گرفته است (Nicolini & Zovatto, ۲۰۰۹). پاسخ بهینه ارائه شده توسط Nicolini و Zovatto مجدداً توسط عبدالحسین نجفی مورد بررسی تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار قرار گرفته و در جدول ۸ نشان داده شده است. از نتایج حاصل می توان نتیجه گرفت که فشار حداقل ۲۶ متر در بعضی گره های مرجع رعایت نشده است، که این موضوع خود به نوعی از اعتبار پاسخ بهینه سازی می کاهد.

پاسخ بهینه الگوریتم پیشنهادی متناظر با الگوریتم ژنتیک برای گره های فوق به ترتیب برابر با ۳۱,۵۹ و ۳۳,۸۳ است که نشان دهنده رعایت حداقل فشار ۲۶ متر در شبکه مورد نظر است.

گام به انضمام یک گام نهایی مورد توجه قرار گرفته است (جدول ۱۰).

جدول ۱۰- ماتریس تصمیم Vikor

ماتریس تصمیم	P	PRV
راه حل ۱	۴۵,۹۹	۱۲
راه حل ۲	۴۶,۶۵	۹
راه حل ۳	۴۶,۶۱	۱۲
راه حل ۴	۴۶,۱۱	۱۱

### جمع بندی

در این پژوهش مدیریت فشار بر روی دو شبکه مصنوعی و واقعی آزموده شده است. نتایج حاصل از بهینه سازی، تنظیمات شیرها و مکان بهینه هر یک از آنها در شبکه های آبرسانی مورد نظر، مبین آن است که الگوریتم Mopso می تواند منجر به یافت پاسخ های بهینه شود. برنامه کنترل تهیه شده برای شبکه مصنوعی در قیاس با حالتی که توسط محقق دیگر با الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار گرفته است بیانگر آن است که حداقل فشار مطلوب برای گره های مرجع رعایت شده است که این موضوع مؤید اعتبار پاسخ بهینه یابی می باشد. همچنین نتایج حاصل از بهینه یابی بر روی شبکه واقعی در قیاس با حالت وضعیت موجود شبکه منجر به افزایش حدوداً ۱۵ درصدی توزیع فشارهای مطلوب در هر ۴ راه حل شده است. از

فشار خروجی مربوط به هریک از شیرهای معرفی شده توسط الگوریتم به عنوان پارامترهای متغیر، برای رسیدن به هدف مدل بهینه سازی برای مدل تعریف شده اند. نتایج حاصل از اجرای مدل بهینه ساز در جدول ۹ نشان داده شده است.

جدول ۹- جواب های بهینه توسط الگوریتم Mopso

Solution	Num (تعداد شیرها)	P (فشار کل شبکه)
راه حل ۱	۱۲	۴۵,۹۹
راه حل ۲	۹	۴۶,۶۵
راه حل ۳	۱۲	۴۶,۶۱
راه حل ۴	۱۱	۴۶,۱۱

به منظور برگزیدن بهترین پاسخ یا همان بهترین مکان شیرهای فشارشکن با در نظر داشتن کاهش فشارهای اضافی در شبکه از تصمیم گیری چندمعیاره Vikor و Topsis بهره گرفته شده است. به این منظور به جهت اعتبارسنجی گزینه برتر روش های مزبور لازم است کلیه پاسخ های بهینه الگوریتم پیشنهادی در قالب راه حل مورد بررسی قرار گیرد.

### تصمیم گیری چند معیاره VIKOR

از نتایج حاصل از اجرای الگوریتم Mopso ، از ۲ شاخص متوسط فشار شبکه و تعداد شیرهای فشارشکن برای اولویت بندی ۴ مکان بهینه شیرهای فشارشکن (راه حل) استفاده شده و نتایج آن در پنج

Covelli Carmine ؛Cozzolino Luca ؛Cimorelli Luigi ؛Morte Renata Della & Pianese Domenico. (2016). Optimal location and setting of PRVs in WDS for leakage minimization. *Water Resources Management* 30 (5): 1803-1817 .

Dai Pham & Li Pu. (2014). Optimal localization of pressure reducing valves in water distribution systems by a reformulation approach. *Water Resources Management* 28 (10): 3057-3074 .

Demirel Mehmet Cuneyd. (2022). Smart pressure management extension for EPANET .

Girard Mark & Stewart Rodney. (2007). Implementation of pressure and leakage management strategies on the Gold Coast, Australia: case study. *Journal of Water Resources Planning and Management* 133 (3): 210-217 .

Hamilton ؛Mckenzie & Seago. (2006). A review of performance indicators for real losses from water supply systems. UK House of commons Report .

Hindi Ks & Hamam Ym. (1991). Locating pressure control elements for leakage minimization in water supply networks: An optimization model. *Engineering optimization* . 17(4): 281-291 .

Janković-Nišić Bojana ؛Maksimović Čedo ؛Butler David & Graham Nigel Jd. (2004). Use of flow meters for managing water supply

طرفی به منظور اولویت بندی پاسخ های بهینه با بهره گیری از تصمیم گیری چند معیاره VIKOR و Topsis مشخص شده راه حل شماره ۲ با ۹ شیر فشارشکن و درصد پوشش فشارهای مطلوب ۸۰ درصدی در هر دو ماتریس تصمیم گیری چندمعیاره اولویت برتر را به خود اختصاص داده است که این موضوع در قیاس با حالت ۱۴ شیرفشارشکن با ۶۵ درصد پوشش فشارهای مطلوب (وضع موجود شبکه)، بیانگر تامین اهداف اصلی این پژوهش برای استفاده از روش های مختلف ریاضی و بهینه سازی با هدف کمینه کردن، جهت طراحی مدل مدیریت بهینه فشار در شبکه آبرسانی گردد.

## مراجع

Aghajani M ؛Taherei P ؛Sulaiman Nmn & Basri Nea. (2016). Application of TOPSIS and VIKOR

improved versions in a multi criteria decision analysis to develop an optimized municipal solid waste management model .

Coello Carlos. (2000). An updated survey of GA-based multiobjective optimization techniques. *ACM Computing Surveys (CSUR)* ، 32(2): 109-143 .

networks. Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications \ (1): 259-267 .

Sabet ؛Nasirian ؛Mohtashami & Ahrari. (2019). Determination of Value and Location of the Leakage in Water Distribution Networks Using Calibration. Journal of Water and Wastewater . ۳۰ (۶).

Saldarriaga Juan & Salcedo Andrés. (2015). Determination of optimal location and settings of pressure reducing valves in water distribution networks for minimizing water losses. Procedia Engineering \ ۱۹ : 973-983 .

Thornton Julian ؛Sturm Reinhard & Kunkel George. (2008). Water loss control: McGraw-Hill Education .

Walski Thomas ؛Chase Donald ؛Savic Dragan ؛Grayman Walter ؛Beckwith Stephen & Koelle Edmundo. (2003). Advanced water distribution modeling and management.

Wu Jianfeng ؛Zheng Chunmiao ؛Chien Calvin & Zheng Li. (2006). A comparative study of Monte Carlo simple genetic algorithm and noisy genetic algorithm for cost-effective sampling network design under uncertainty. Advances in Water Resources ۲۹ (6): 899-911 .

Xu Qiang ؛Chen Qiuwen ؛Ma Jinfeng ؛Blanckaert Koen & Wan Zhonghua. (2014). Water saving and energy reduction through pressure management in urban water

networks. Journal of Water Resources Planning and Management \ ۳۰ (2): 171-179 .

Miklas Scholz. (2022). Optimal Pressure Management in Water Distribution Systems .

Mollabashi Asieh ؛Amini Hashem & Gholami Hasan. (2018). Benchmarking Non-Revenue Water and Calculating Economic Leakage Level, Case Study: Isfahan Water and Wastewater Company. Journal of Water and Wastewater Science and Engineering ۳ (2): 4-13

Montalvo Idel ؛Izquierdo Joaquín ؛Pérez Rafael & Tung Michael. (2008). Particle swarm optimization applied to the design of water supply systems. Computers & Mathematics with Applications ۵۶ (3): 769-776.

Neelima B. Kore<sup>1</sup>. (2017). A Simplified Description of FUZZY TOPSIS Method for Multi Criteria Decision Making.

Nicolini Matteo & Zovatto Luigino. (2009). Optimal location and control of pressure reducing valves in water networks. Journal of water resources planning and management ، ۱۳۵(3): 178-187 .

Opricovic Serafim & Tzeng Hshiang. (2007). Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. European journal of operational research ۱۷۸ (2): 514 .

Reis Fr & Chaudhry Fazal H. (1999). Hydraulic characteristics of pressure reducing valves for maximum reduction of leakage in water supply

distribution networks. *Water Resources Management* ۲۸, (11): 3715-3726 .

Zitzler Eckart. (1999). *Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: Methods and applications* (Vol. 63): Citeseer