Research Paper

Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
Water and Soil Resources Conservation (WSRCJ)

Web site:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

Email:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

Vol. 14
No. 1 (53)

Received:
2023-10-13

Accepted:
2024-12-22

Pages: 77-88

Designing District Metered Areas with Cost Reduction and Reduction of Leakage Approach in Water Distribution Networks

Mohammad KakshPour[1], Mohammad Reza Jalili Ghazi Zadeh[2]*, Seyed Abbas Hoseini[3], Ahmad Sherafati[4]

1)Civil Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2) Civil Department, Water and Environment, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
3) Civil Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
4) Civil Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
Corresponding Author email: m_jalili@sbu.ac.ir

Abstract:

Background and Aim: To estimate the rate of leakage in the water distribution network, the International Water Association recommends measuring the rate of night flow by creating district-metered areas. On the other hand, the creation of these areas for the existing and old networks should be chosen by considering factors such as minimizing the boundary pipes between the areas, the lowest cost of creating the areas, and also checking the effect of creating the areas on the hydraulics of the network, including the effect on the amount of leakage. In other words, the selected layout should be optimally calculated and selected in terms of geometry, the number of areas, and the boundary conditions between the areas. Also, due to the effect of the selection of the two-objective algorithm on the optimization results, for the first time, the results of the two-objective algorithms have been compared in creating district-metered areas. NSGAII, MOGWO, SPEA2, and MOPSO algorithms were used to select the best optimization algorithm in the physical partitioning section, and the results showed that the SPEA2 algorithm performed better than other algorithms. Then, by examining the results of creating separate measurement areas by changing the number and geometry of the areas in the network, the optimal state of the areas was calculated according to two optimization goals, as well as indicators such as compactness and nodal pressure values, and the proposed plan was selected.

Methods: This study presents a new method to create district-metered areas in the existing water distribution network with cost reduction and leakage reduction approaches. The creation of areas with these two approaches has yet to be investigated in past studies. This method includes the phases of clustering, physical partitioning, and analysis of the results. The presented method was used on the ZJ water distribution network in China. Also, due to the effect of the selection of the two-objective algorithm on the optimization results, for the first time, the results of the two-objective algorithms have been compared in creating district-metered areas. NSGAII, MOGWO, SPEA2, and MOPSO algorithms were used to select the best optimization algorithm in the physical partitioning section, and the results showed that the SPEA2 algorithm performed better than other algorithms. Then, by examining the results of creating district-metered areas by changing the number and geometry of the areas in the network, the optimal case of the areas was calculated according to two optimization goals, as well as indicators such as modularity and nodal pressure values, and the proposed plan was selected.

Results: The results showed that with the optimal selection of the number and geometry of the areas with the presented method, the standard deviation of the nodal pressure of the network has decreased by 14.8% and the nodal leakage rate of the network by 5.8% compared to the case without creating district metered areas. In addition to controlling leakage in the network, the creation of areas has led to pressure management and reduced leakage in the network.

Conclusion: The presented method, while creating district-metered areas with the lowest cost, has also reduced the amount of leakage and the standard deviation of the nodal pressure in the network, which helps to create the justice of water distribution in the network. Also, the SPEA2 dual-objective algorithm is suggested as the best algorithm for creating district-metered areas among the four reviewed algorithms.

Keywords: District Metered Areas, Water Distribution Network, SPEA2, Leakage, Pressure management

مقاله پژوهشی

طراحی نواحی مجزای اندازه‌گیری
با رویکرد کاهش هزینه و کاهش نشت در شبکه‌های توزیع آب

محمد کاکش‌پور[1]، محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده[*2]، سید عباس حسینی[3] و احمد شرافتی[4]

۱)گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۲)گروه عمران، آب و محیطزیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۳)گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۴)گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
[*]ایمیل نویسنده مسئول: m_jalili@sbu.ac.ir

چکیده:

زمینه و هدف: برای تخمین مقدار نشت در شبکه توزیع آب، انجمن بین‌المللی آب اندازه‌گیری مقدار جریان شبانه با استفاده از ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری (DMA[1]) را توصیه می‌کند. از طرفی ایجاد این نواحی برای شبکه‌های موجود و قدیمی باید با در نظر گرفتن عواملی از قبیل به حداقل رساندن لوله‌های مرزی بین نواحی، کمترین هزینه ایجاد نواحی و همچنین بررسی تأثیر ایجاد نواحی برهیدرولیک شبکه و ازجمله اثرگذاری بر میزان نشت انتخاب گردد. به‌عبارت‌دیگر، طرح انتخابی به لحاظ هندسه، تعداد نواحی و همچنین شرایط مرزی بین نواحی باید به‌صورت بهینه محاسبه و انتخاب گردد. همچنین با توجه به تأثیر انتخاب الگوریتم دو هدفه بر نتایج بهینه‌سازی، برای اولین بار نتایج الگوریتم‌های دو هدفه در ایجاد نواحی منطقه‌سنجی مقایسه شده است. برای انتخاب بهترین الگوریتم بهینه سازی در بخش پارتیشن بندی فیزیکی از الگوریتم های NSGAII، MOGWO، SPEA2 و MOPSO استفاده شد و نتایج نشان داد که الگوریتم SPEA2 بهتر از سایر الگوریتم‌ها عمل می‌کند. سپس با بررسی نتایج ایجاد نواحی اندازه گیری مجزا با تغییر تعداد و هندسه نواحی در شبکه، وضعیت بهینه نواحی با توجه به دو هدف بهینه سازی و همچنین شاخص هایی مانند فشردگی و مقادیر فشار گرهی محاسبه شده و طرح پیشنهادی انتخاب شد.

روش پژوهش: در تحقیق حاضر یک روش جدید جهت ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری در شبکه توزیع آب موجود با رویکردهای کاهش هزینه و کاهش نشت ارائه‌شده است. ایجاد نواحی با این دو رویکرد کمتر در تحقیقات گذشته مورد بررسی قرار گرفته است. این روش شامل مراحل خوشه‌بندی، ناحیه‌بندی فیزیکی و همچنین تجزیه‌وتحلیل نتایج است. روش ارائه شده بر روی شبکه توزیع آب زدجی در کشور چین بکار گرفته شد. همچنین با توجه به اثرگذاری انتخاب الگوریتم دو هدفه بر نتایج بهینه‌سازی برای اولین بار به مقایسه نتایج الگوریتم‌های دو هدفه در ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری پرداخته شده است. جهت انتخاب بهترین الگوریتم بهینه‌سازی در بخش ناحیه‌بندی فیزیکی از الگوریتم‌های NSGAII[2]، MOGWO[3]، SPEA2[4]، MOPSO[5] استفاده شد که نتایج نشان داد الگوریتم SPEA2 نسبت به سایر الگوریتم‌ها عملکرد بهتری داشته است. سپس با بررسی نتایج ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری با تغییر تعداد و هندسه نواحی در شبکه، حالت بهینه نواحی با توجه به دو هدف بهینه‌سازی و همچنین شاخص‌هایی نظیر پیمانگی و مقادیر فشار گره‌ای مورد محاسبه قرار گرفت و طرح پیشنهادی انتخاب گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که با انتخاب بهینه تعداد وهندسه نواحی با روش ارائه شده، میزان انحراف معیار فشار گرهی شبکه ۱۴/۸ درصد و میزان نشت گرهی شبکه ۵/۸ درصد نسبت به حالت بدون ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری کاهش‌یافته است. درواقع ایجاد نواحی علاوه بر کنترل نشت در شبکه، موجب مدیریت فشار و کاهش نشت در شبکه گردیده است.

نتایج: روش ارائه شده ضمن ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری با کمترین هزینه، میزان نشت و انحراف معیار فشار گرهی در شبکه را نیز کاهش داده است که به ایجاد عدالت توزیع آب در شبکه کمک می‌کند. همچنین الگوریتم دو هدفه SPEA2 به‌عنوان الگوریتم برتر از بین چهار الگوریتم بررسی‌شده جهت ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری پیشنهاد می‌گردد.

کلمات کلیدی: نواحی مجزای اندازه‌گیری، شبکه توزیع آب، SPEA2، نشت، مدیریت فشار

شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

پست الکترونیک:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

سال چهاردهم
شماره ۱ (۵۳)

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۰۷/۲۱

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۱۰/۰۱

صفحات: ۸۸-۷۷

مقدمه

در سال‌های اخیر کمبود شدید منابع و افزایش هزینه‌های تولید آب باعث شده که موضوع آب بدون درآمد موردتوجه قرار گیرد. بنابراین در کنار تأمین آب از منابع جدید، باید از هدر رفتن آب در مراحل مختلف انتقال، تصفیه، ذخیره و توزیع جلوگیری کرد (Pearson, 2019). شبکه‌های توزیع آب مجموعه‌ای به‌هم‌پیوسته و پیچیده است که توسعه سنتی آن در اغلب شبکه‌های توزیع آب شهری بر پیچیدگی‌های آن افزوده است. اکثر اجزای شبکه توزیع آب مدفون هستند و این موضوع نیز بر پیچیدگی‌های مدیریت شبکه توزیع آب می‌افزاید (Kakeshpour et al., 2023). یکی از نگرانی‌های اصلی در شبکه توزیع آب کاهش میزان هدر رفت واقعی آب است که اغلب بیش از ۳۰ درصد حجم ورودی به شبکه توزیع آب است (Gopan, 2010). هدر رفت واقعی شامل سه جزء هدر رفت آب ناشی از نشت و شکستگی‌های گزارش‌شده، هدر رفت آب ناشی از نشت و شکستگی‌های گزارش نشده و نشت زمینه آب در شبکه توزیع است. تعیین محل و رفع هدر رفت آب ناشی از شکستگی گزارش نشده و نشت زمینه پیچیده و زمان‌بر است. توصیه انجمن بین‌المللی آب برای تخمین هدر رفت روش‌های نشت‌یابی و اندازه‌گیری جریان شبانه با استفاده از نواحی مجرای اندازه‌گیری (DMA) است. یک ناحیه مجزای اندازه‌گیری یک ناحیه مشخص‌شده از شبکه توزیع آب است که به‌وسیله شیرهای مجزاساز و کنتور از شبکه مجزا شده و امکان اندازه‌گیری میزان آب ورودی و خروجی به آن منطقه وجود دارد. در این نواحی کنترل و کاهش هدر رفت واقعی، مورد پایش قرار می‌گیرد (Kakeshpour et al., 2023). با توجه به افزایش جمعیت، اکثر شبکه‌های توزیع به‌صورت مرحله‌ای و سنتی و بدون توجه به مفهوم نواحی مجزای اندازه‌گیری گسترش‌یافته‌اند. به این معنی که ممکن است در شبکه‌های توزیع لوله‌هایی وجود داشته باشد که اگر از شبکه توزیع حذف شوند، شبکه همچنان با رعایت قیدهای هیدرولیکی ازجمله فشار در گره‌ها و سرعت در لوله‌های شبکه در محدوده مجاز قرار داشته باشد. انجام روش‌های مدیریت فشار و ازجمله آن ناحیه‌بندی ازجمله راهکارهای مؤثری است که در شناسایی و جلوگیری از تلفات ناشی از آب بدون درآمد نقشی اساسی ایفا می‌کند. از مهم‌ترین مزایای مدیریت فشار کاهش نشت، کاهش نرخ خرابی‌ها، افزایش عمر تجهیزات، کاهش مصرف آب و افزایش رضایت‌مندی مشترکین است. از مزایای ایجاد DMA در شبکه می‌توان به نشت‌یابی، مدیریت فشار، کاهش تعداد شیرهای فشارشکن و به طبع آن کاهش هزینه ناشی از آن و همچنین مدیریت بحران نام برد. اما ایجاد نواحی DMA در شبکه‌های در حال طراحی و در به‌ویژه شبکه‌های اجراشده که دارای پیچیدگی زیادی هستند بسیار پیچیده خواهد بود. چراکه تعیین محل قرارگیری شیرهای مجزاساز و کنتورها باید به نحوی باشد که قیود هیدرولیکی نظیر حداقل فشار گرهی در شبکه تأمین گردد. ضابطه تائید شده‌ای در خصوص اندازه نواحی مجزای اندازه‌گیری وجود ندارد. اما اگر این نواحی خیلی کوچک در نظر گرفته شود سبب افزایش هزینه‌های پایش نظیر کنتورها، شیرهای مجزاساز و هزینه‌های اجرایی شده و اگر خیلی بزرگ در نظر گرفته شود عملیات نشت‌یابی و بهره‌برداری مشکل‌تر خواهد شد (Kakeshpour et al., 2023). بنابراین ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری به‌نحوی‌که با هزینه و ابعاد بهینه تشکیل‌شده باشد ضروری است. تحقیقات زیادی در خصوص بهینه‌سازی چندهدفه جهت ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری انجام‌شده است.

فراری و ساویچ (۲۰۱۵)، به ارائه چند طرح پیشنهادی از DMA با تعداد و ابعاد متفاوت پرداخته و بر تأثیر آن بر کاهش نشت پرداختند (Ferrari & Savic, 2015). لوسلی و همکاران (۲۰۱۷) با رویکرد سه هدفه به کاهش نشت به‌عنوان یک هدف در ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری پرداختند (Laucelli et al., 2017). کریاکو و حیدر (۲۰۱۹) به کمک الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی خطی و نظریه گراف به ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری به کاهش میزان نشت در شبکه پرداختند (Creaco & Haidar, 2019). ژانگ و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی بر روی ناحیه‌بندی خودکار شبکه توزیع آب با بهینه‌سازی چندهدفه پرداختند. روش ارائه شده از الگوریتم لووین برای ناحیه‌بندی که مبتنی بر معیار پیمانگی است، استفاده کرد. در نهایت شیرهای مجزاساز و کنتورها در لوله‌های مرزی بین DMA ها با به‌کارگیری یک الگوریتم فراکاوشی برای کمینه‌سازی تعداد لوله‌های مرزی و بیشینه‌سازی فشار شبکه و یکنواختی سن آب تعیین شد. نتایج نشان داد که این روش در ناحیه‌بندی شبکه با فشار و سن آب مشابه مؤثر بوده است (Zhang et al., 2017). رحمانی و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی بر روی عملکرد بهینه شبکه توزیع آب شهری با استفاده از ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری پرداختند. در این تحقیق یک چهارچوب نوین بر اساس تئوری گراف و مدل‌های بهینه‌سازی جهت طراحی DMA و یافتن عملکرد بهینه شبکه‌های بزرگ توزیع آب برای فصل‌های خشک و بارانی ارائه شد. روش ارائه شده شامل سه بخش اصلی بود: تحلیل مقدماتی، ساختار DMA و عملگر بهینه بود. روش ارائه شده از الگوریتم چندهدفه NSGA-II برای بهینه‌سازی شبکه توزیع آب استفاده کرد. توابع هدف مورد استفاده شامل: کمینه کردن مجموع هزینه سالانه نوسازی، سن آب و یکنواختی فشار بودند. روش پیشنهاد شده در شبکه توزیع آب E-Town بکار برده شد

(Rahmani et al., 2018). سانتوناستاسو و همکاران (۲۰۱۹) به تحقیق بر روی وضعیت جغرافیایی دوگانه برای ناحیه‌بندی شبکه‌های توزیع آب با در نظر گرفتن موقعیت واقعی شیرها پرداختند. در این تحقیق یک ساختار عمومی برای اصلاح الگوریتم ناحیه‌بندی شبکه توزیع آب جهت محاسبه موقعیت واقعی شیرهای جداساز ارائه شد (Saldarriaga et al., 2019). لیو و لانسی (۲۰۲۰) به تحقیق بر روی طراحی DMA بر اساس تئوری گراف و بهینه‌سازی چندین هدفه پرداختند. روش ارائه شده به تعیین نواحی با در نظر گرفتن لوله‌هایی که بیشترین عدم هماهنگی فشار و پیمانگی بین خوشه‌ها را دارند و همچنین کمترین تعداد قطع بین مرزهای نواحی می‌پردازند. در نهایت تحلیل عملکرد راه‌حل‌های ارائه شده را بر اساس در دسترس بودن، کیفیت آب و نشت روزانه مقایسه می‌کند (Liu & Lansey, 2020). زیدان و همکاران (۲۰۲۱) به تحقیق بر روی ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری با رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه بر روی سن آب، اضافه فشار، هزینه عملیاتی پمپ در شبکه توزیع آب پرداختند. در مرحله اول یک روش ابتکاری برای تقسیم‌بندی شبکه به چند ناحیه بر اساس تحلیل همبندی ارائه گردید. در مرحله دوم به‌کارگیری روش بهینه‌سازی چندهدفه تکاملی الگوریتم NSGAII برای کاهش تبادل هزینه‌های عملیاتی، اضافه فشار (جهت کاهش نشت) و سن آب (کنترل کیفیت آب) در شبکه توزیع آب پرداخته شد. روش پیشنهادی بر روی سه شبکه پیچیده بکار برده شد (Zeidan et al., 2021). بیانچوتی و همکاران (۲۰۲۱) به تحقیق بر روی ناحیه‌بندی شبکه توزیع آب شهری با چندین منبع با بررسی و مقایسه چندین شاخص پرداختند. در این تحقیق یک رویکرد دومرحله‌ای برای طراحی DMA ها ارائه شد. در گام اول خوشه‌بندی بر اساس الگوریتم لوین بر مبنای بیشینه‌سازی پیمانگی انجام شد. در گام دوم تقسیم‌بندی فیزیکی سیستم بر اساس مسئله بهینه‌سازی دوهدفه استفاده گردید. هدف اول در بخش ناحیه‌بندی فیزیکی تعداد شیرهای جداسازی بود. جهت انتخاب دومین هدف سه شاخص تحلیل و مقایسه شد: انحراف معیار استاندارد، ضریب جینی، تاب‌آوری. نتایج نشان داد که در شبکه‌های توزیع آب واقعی، استفاده از تاب‌آوری، نسبت به استفاده از هدف یکنواختی فشار و تشابه تقاضا برای هر ناحیه عملکرد بهتری داشته است (Bianchotti et al., 2021).

بررسی بر روی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری با رویکردهای مختلفی در بخش ناحیه‌بندی فیزیکی انجام‌شده است. در بخش ناحیه بندی فیزیکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه مختلفی جهت ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری استفاده‌شده است. لیکن در خصوص اینکه انتخاب این الگوریتم‌های چندهدفه چه تأثیری بر نتایج داشته و اصولاً استفاده از کدامیک از الگوریتم‌های چندهدفه نتایج بهتری در حل این‌گونه مسائل داشته‌اند در تحقیقات گذشته بررسی نشده است. لازم به ذکر است که انتخاب الگوریتم بهینه‌سازی برتر با توجه به غیرقطعی بودن جواب‌ها در الگوریتم‌های بهینه‌سازی از اهمیت زیادی برخوردار بوده و بر کیفیت نتایج نهایی مؤثر است. همچنین توانایی این‌گونه الگوریتم‌ها در حوزه‌های مختلف متفاوت بوده و لذا در حوزه ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری در شبکه توزیع آب نیز باید موردبررسی قرار گیرد. همچنین در بهینه‌سازی با رویکرد دو هدفه، توابع هدف با رویکردهای مختلفی انتخاب و مورداستفاده قرارگرفته است. لیکن استفاده از توابع هدف با رویکرد کاهش میزان نشت و هزینه در ایجاد نواحی کمتر موردبررسی قرارگرفته است. لذا در این تحقیق به انتخاب الگوریتم دوهدفه برتر با استفاده از توابع هدف با رویکرد کاهش هزینه و میزان نشت جهت ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری در شبکه توزیع آب پرداخته‌شده است. این نواحی با حفظ تمامی قیدهای هیدرولیکی بر روی شبکه موجود ارائه و نتایج آن از جهت هزینه، نرخ نشت و پارامترهای هیدرولیکی و با حداقل قطع لوله‌های مرزی در بین نواحی موردبررسی قرار گرفته است. در این تحقیق از تحلیل مبتنی بر تقاضا (DDA[1]) استفاده شده است. همچنین یکی از قیود الگوریتم پیشنهادی تأمین فشار همه گره‌ها در تمامی طول شبانه‌روز است.

مواد و روش‌ها

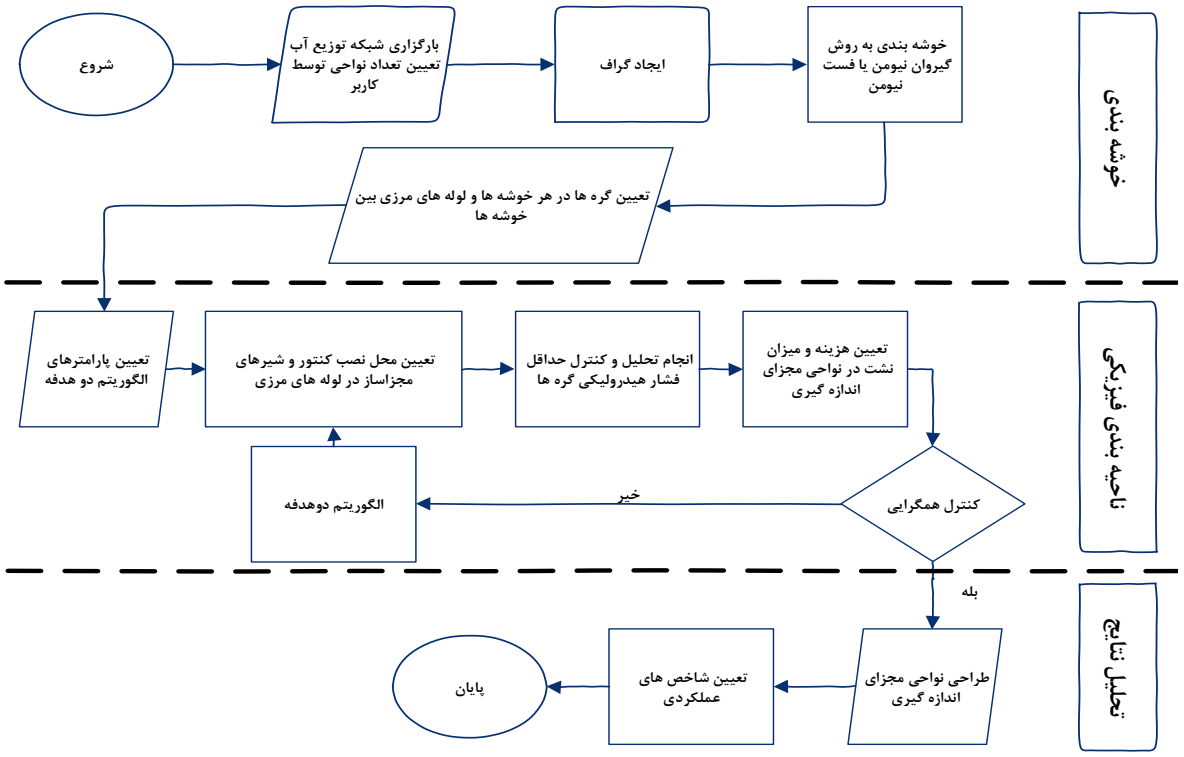
به‌طورکلی ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری شامل سه مرحله است: ۱-خوشه‌بندی یا تفکیک هندسی شکل شبکه توزیع آب ۲-ناحیه‌بندی فیزیکی شامل تعیین قرارگیری شیرهای مجزاساز و یا کنتورها در مرزهای نواحی ۳-تحلیل نتایج ناشی از ایجاد نواحی مجرای اندازه‌گیری. در مرحله اول روش‌های مختلف خوشه‌بندی در شبکه جهت تفکیک هندسی شبکه استفاده می‌شود. این مرحله صرفاً شامل تفکیک هندسی شبکه به لحاظ قرارگیری المان‌های گرهی ولوله‌های شبکه است. در مرحله دوم پس از تعیین هندسه و ابعاد نواحی و به جهت تعیین تکلیف لوله‌های مرزی بین نواحی به لحاظ قرارگیری شیرهای مجزاساز و یا کنتورها به ناحیه‌بندی فیزیکی پرداخته می‌شود. این مرحله به کمک الگوریتم‌های فراابتکاری با رویکردهای یک و یا چندهدفه و همچنین با اهداف مختلف انجام می‌پذیرد. در مرحله سوم به تحلیل نتایج با توجه به تعداد و هندسه مختلف نواحی به لحاظ هزینه و هیدرولیک نواحی پرداخته شده و سپس به انتخاب حالت بهینه از این میان پرداخته می‌شود. در شکل (۱) روندنمای انجام پهنه‌بندی بر روی شبکه توزیع آب نشان داده‌شده است. پس از بارگذاری شبکه در نرم‌افزار MATLAB و با استفاده از EPANET-MATLAB Toolkit و تبدیل شبکه به گراف، خوشه‌بندی به

روش گیروان-نیومن انجام‌شده و هندسه نواحی و همچنین لوله‌های مرزی تعیین می‌گردند. در مرحله ناحیه‌بندی فیزیکی با مشخص شدن لوله‌های مرزی، به کمک الگوریتم بهینه‌سازی دو هدفه لوله‌های مرزی ازنظر قرارگیری کنتور و شیرهای مجزاساز تعیین و هزینه و میزان نشت گره‌ای محاسبه می‌گردد. سپس قید رعایت حداقل فشار گره‌ای در این مرحله کنترل‌شده و بهینه‌سازی تا رسیدن به جواب بهینه و همگرایی ادامه می‌یابد. درنهایت با مشخص شدن DMA ها با تعداد مختلف نواحی تجزیه‌وتحلیل نتایج جهت تعیین حالت بهینه پهنه‌بندی با توجه به شاخص‌های هیدرولیکی، هزینه، پیمانگی و نشت در نظر گرفته می‌شود.

مرحله خوشه‌بندی

تئوری گراف

یکی از تحلیل‌های مهمی که روی گراف‌ها انجام می‌شود خوشه‌بندی گراف است. به مسئله خوشه‌بندی در گراف‌ها، تشخیص جوامع نیز گفته می‌شود. روش‌های خوشه‌بندی، کاربردهای مختلفی ازجمله ساده‌سازی داده‌ها، تحلیل داده‌ها، شباهت‌سنجی داده‌ها و همچنین یافتن الگوها کاربرد دارند. اصطلاحات خوشه‌ها شامل گروه‌هایی بافاصله‌های کم بین اعضای خوشه، مناطق متراکم فضای داده، فواصل و یا توزیع‌های آماری خاص است. بنابراین خوشه‌بندی می‌تواند به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه صورت گیرد. گراف یک ساختاری مجزا از یال‌ها و رأس‌ها است که رأس‌ها از طریق یال‌ها به هم متصل می‌شوند. هر گراف به‌صورت زوج مرتبی مانند $G(V,E)$ نشان داده می‌شود. V زیرمجموعه‌ای از رأس‌ها و E زیرمجموعه‌ای از یال‌ها به‌صورت اعضای دو عضوی V است. با توجه به اینکه شبکه‌های توزیع آب مجموعه‌ای از گره‌ها ولوله‌ها است، می‌توان آن‌ها را به‌عنوان یک گراف در نظر گرفت. در شبیه‌سازی شبکه آب با استفاده از تئوری گراف می‌توان گره‌های مصرف و مخازن شبکه را رأس‌های گراف (V) ولوله‌ها، پمپ‌ها و شیرهای شبکه را همچون یال‌های گراف (E) در نظر گرفت. استفاده از تئوری گراف برای شبکه‌های توزیع باعث سرعت تحلیل شبکه‌های بزرگ و پیچیده توزیع آب می‌شود و این امکان را می‌دهد که بتوان از الگوریتم‌های خوشه‌بندی در شبکه‌های توزیع نیز استفاده کرد (Bader et al., 2013).



شکل ۱. روندنمای انجام روش تحقیق

روش گیروان-نیومن

الگوریتم گیروان-نیومن به خوشه‌بندی گراف‌ها بر مبنای معیار پیمانگی می‌پردازد. ازآنجایی‌که لزوماً الگوریتم‌های مختلف تعداد خوشه‌های یکسانی را تولید نمی‌کنند، بسیاری از معیارهای موجود جوابگوی مقایسه روش‌های مختلف خوشه‌بندی نیستند و امکان استفاده از آن‌ها برای ارزیابی این روش‌ها وجود ندارد. از طرفی، معیار پیمانگی، این امکان را می‌دهد که بتوان از آن برای تعیین تعداد خوشه‌ها نیز استفاده نمود. روند کلی الگوریتم پیشنهادی با استفاده از الگوریتم جستجوی اول سطح به‌صورت: ۱ – محاسبه امتیاز کل یال‌های شبکه ۲ – یافتن یالی که بیشترین امتیاز را دارد و حذف آن از شبکه ۳ – محاسبه مجدد امتیاز یال‌های باقیمانده ۴ – تکرار مراحل از گام دوم. روش گیروان-نیومن از شاخص پیمانگی برای ارزیابی ناحیه‌بندی شبکه استفاده می‌کند. این شاخص به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$M = \sum_{S=1}^{C} [\frac{l_s}{m} - \left(\frac{d_s}{2m}\right)^2] \qquad (۱)$$

که M پیمانگی، c نشان‌دهنده تعداد خوشه‌ها، ls برابر با تعداد یال‌های موجود s، ds برابر با مجموع درجه‌های کلیه گره‌های موجود در جامعه s و m برابر با تعداد کل یال‌ها است. هرچه مقدار M بیشتر باشد ناحیه‌بندی بهتری صورت گرفته است. پیمانگی ابتدا به‌عنوان معیاری جهت تعیین مرحله توقف الگوریتم گیروان-نیومن استفاده شد، ولی به‌سرعت به یکی از مهم‌ترین معیارهای الگوریتم‌های تشخیص جوامع تبدیل شد. حداکثر مقدار پیمانگی زمانی به دست می‌آید که تمامی رئوس خوشه به هم متصل باشند و یالی خوشه‌ها را به هم متصل نکند. یکی از ویژگی‌های اساسی پیمانگی، امکان مقایسه خوشه‌بندی‌های مختلف با تعداد خوشه‌های متفاوت که در بسیاری از روش‌های دیگر این مهم امکان‌پذیر نیست (Newman & Girvan, 2004). شاخص پیمانگی به‌منظور ایجاد حداقل لوله مرزی بین نواحی در شبکه توزیع آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. حداقل شدن لوله‌های مرزی به دلیل کاهش هزینه‌های اجرایی و هزینه تجهیزات در بین نواحی (شیرهای مجزاساز و کنتورها) از اهمیت زیادی برخوردار است.

ناحیه‌بندی فیزیکی

روش ارائه شده در بخش ناحیه‌بندی فیزیکی شامل شبیه‌ساز هیدرولیکی و همچنین بهینه‌ساز است. شبیه‌سازی هیدرولیکی به‌صورت یکپارچه، همراه با الگوریتم بهینه‌سازی تا دستیابی به برنامه عملکردی بهینه تجهیزات نصب شده در مرز بین نواحی با در نظر داشتن قوانین حاکم بر هیدرولیک جریان اجرا می‌شود. در این زمینه، استفاده از ابزار رابط EPANET-MATLAB Toolkit، عملکرد توأمان مجموعه مدل‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی هیدرولیکی را باوجود کدنویسی مستقل مدل‌های یادشده، میسر می‌سازد (Eliades et al., 2016). بخش شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار EPANET و بخش بهینه‌سازی به کمک الگوریتم دو هدفه در محیط برنامه‌نویسی MATLAB صورت پذیرفت. در مرحله پایانی نیز، نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از شاخص‌های ارزیابی شرایط هیدرولیکی، پیمانگی، هزینه، نشت و تعداد لوله‌های مرزی در شبکه توزیع آب در هر حالت مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند.

مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی

تحلیل هیدرولیک جریان در شبکه‌های توزیع آب مبتنی بر معادلات حاکم بر این شبکه‌ها و حل آن‌ها با بهره‌گیری از روش‌های عددی، صورت می‌پذیرد. مجموعه قوانین پایستگی جریان و همچنین بقای انرژی مطابق رابطه (۲) که معادلات حاکم بر جریان در شبکه است، با به‌کارگیری روش گرادیان سراسری (GGA[۲]) و در بستر نرم‌افزار EPANET حل گردید. با اجرای روش گرادیان در بستر مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی، معادلات افت انرژی در حلقه‌ها به‌صورت تابع هدف و معادلات پیوستگی نیز به‌صورت قید در یک مسئله بهینه‌سازی تعریف می‌شود. در این حالت با استفاده از ضرایب لاگرانژ، مجموعه قیدها از مسئله بهینه‌سازی حذف گردیده و با مشتق‌گیری از تابع هدف حاصله، معادلات کلی شبکه آبرسانی بر اساس مؤلفه‌های دبی- هد به‌دست‌آمده و با به کار بردن روش نیوتن-رافسون قابل‌حل خواهند بود.

$$\begin{cases} A_{11}Q + A_{12}P = -A_{10}P_0 \\ A_{21}Q = -q \end{cases} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، بردار Q شامل مقادیر دبی مجهول در لوله‌ها، P دربردارنده فشارهای گره‌ای مجهول، P_0 بیانگر فشارهای گره‌ای معلوم و درنهایت بردار q نیز مشتمل بر تقاضای گره‌ای است. همچنین ماتریسA_{11}، بیانگر ماتریس ضرایب Q متناسب با دبی و افت هد لوله‌ها و ماتریس A_{12} نیز ماتریس ضرایب H دربردارنده اعداد متناظر با جهت چرخش جریان است. ماتریس A_{21} برابر ترانهاده ماتریس A_{12} است (Rossman, 2000). لازم به توضیح است در تحقیق حاضر از تحلیل مبتنی بر تقاضا با رعایت قید حداقل فشار گره‌ای در تمامی گره‌های مصرف استفاده شد.

مدل بهینه‌ساز

با توجه به گستردگی و پیچیدگی فضای جستجو جهت تعیین شرایط مرزی بین نواحی مجزای اندازه‌گیری، استفاده از

الگوریتم‌های فرا ابتکاری جهت تعیین شرایط مرزی بین نواحی امری اجتناب‌ناپذیر است. همچنین اهمیت بالا و اثرگذاری بهینه‌ساز بر روی حل درروش ارائه شده سبب شد تا در این تحقیق، از چهار الگوریتم فرا ابتکاری دو هدفه جهت انتخاب بهترین الگوریتم فرا ابتکاری در مدل بهینه‌ساز استفاده شود. الگوریتم‌های دو هدفه مورد بررسی در این تحقیق شامل: ۱- NSGAII (Deb et al., 2000; Deb et al., 2002) ۲- MOGWO (Mirjalili et al., 2014; Mirjalili et al., 2016) ۳- SPEA2 (Zitzler et al., 2001; Zitzler & Thiele, 1998) ۴- MOPSO (Coello & Lechuga, 2002) بودند.

توابع هدف

با توجه به اهمیت میزان نشت در شبکه‌های توزیع آب و همچنین هزینه‌های ناشی از تصفیه و انتقال آن در شبکه توزیع آب تابع هدف f_1مطابق رابطه (۳) جهت محاسبه نشت- فشار انتخاب گردید. همچنین به منظور کاهش هزینه‌های ناشی از ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری مطابق تابع هدف f_2مطابق رابطه (۴) تعریف گردید. به منظور رعایت حداقل فشار گرهی دو تابع هدف مطابق رابطه (۳) و (۴) بر اساس رابطه (۵) مقید شده‌اند.

$$\min f_1 = \frac{\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_n} C_L L_i P_{i,t}^{\gamma}}{T} \quad (۳)$$

$$\min f_2 = \sum_{fm=1}^{N_{fm}} [C_{fm}(D_{fm})] + \sum_{gv=1}^{N_{gv}} [C_{gv}(D_{gv})] \quad (۴)$$

$$Subject\ to: h_i \geq h_i^* \quad (۵)$$

در رابطه (۳)، N_n تعداد گره‌ها موجود در شبکه که در آن‌ها نشت وجود دارد، C_L ضریب نشت در طول لوله تحت اثر فشار گرها ای که میزان آن 10^{-5}در نظر گرفته‌شده است، L_i نصف مجموع طول لوله‌های متصل به گره i ام، γتوان نمایی نشت که مقدار آن ۱/۱۸ در نظر گرفته می‌شود، $P_{i,t}$ فشار گره‌ای در گره iام و در زمان t ام، T زمان کلی محاسبه بر اساس ساعت است (Zhang et al., 2021).

در رابطه (۴) هزینه کل برای ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری در شبکه مجموع هزینه نصب کنتور و شیرهای مجزاسازی در لوله‌های مرزی است. در رابطه (۴)، N_{fm} تعداد کنتورهای نصب‌شده در نواحی مرزی، $C_{fm}(D_{fm})$ هزینه کنتورهای نصب‌شده بر اساس قطر، N_{gv}تعداد شیرهای مجزاساز نصب‌شده در نواحی مرزی$C_{gv}(D_{gv})$ هزینه شیرهای مجزاساز نصب‌شده بر اساس قطر است (Bui et al., 2021). در جدول (۱) هزینه تهیه و نصب کنتورها و شیرهای مجزاساز بر اساس قطر نشان داده‌شده است. در رابطه (۵) h_i فشار هیدرولیکی در گره i، فشار h_i^* حداقل فشار متوسط گرهی است و در تحقیق حاضر ۱۵ متر در نظر گرفته شد (Saldarriaga et al., 2016).

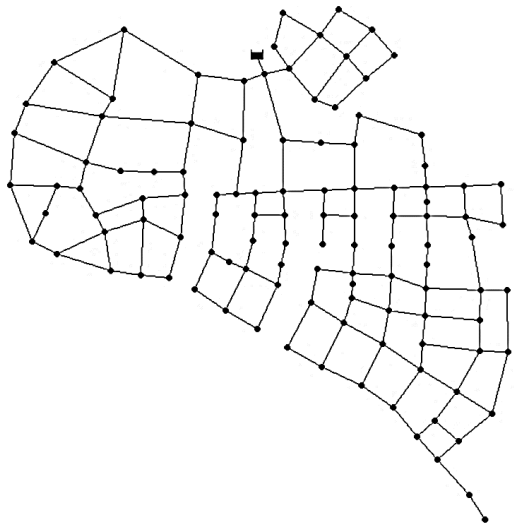
جدول ۱. هزینه تهیه و نصب کنتورها و شیرهای مجزاساز بر اساس قطر

قطر (mm)	شیر مجزاساز($)	قیمت کنتور($)	قطر (mm)	شیر مجزاساز ($)	قیمت کنتور ($)
۱۵۰	۹۵	۱۷۷	۶۰۰	۸۳۵	۲۰۲۳
۲۰۰	۱۳۴	۲۵۶	۷۰۰	۱۱۹۶	۲۹۰۳
۲۵۰	۱۸۶	۳۵۶	۸۰۰	۱۵۳۵	۳۹۵۳
۳۰۰	۲۵۰	۵۳۵	۸۵۰	۱۸۷۴	۴۰۶۶
۴۰۰	۳۷۳	۸۹۱	۹۰۰	۲۲۱۴	۴۸۴۲
۴۵۰	۴۸۱	۱۱۱۷	۱۰۰۰	۳۱۹۱	۷۱۲۲
۵۰۰	۵۰۶	۱۱۶۰	۱۲۰۰	۵۶۹۳	۱۲۳۵۵

(Zhou et al., 2022)

شبکه‌های موردبررسی

به‌منظور استفاده از روش پیشنهادی در این تحقیق از شبکه مرجع زدجی در کشور چین استفاده شد (Sugishita et al., 2021). در شکل (۲) و جدول (۲) مشخصات شبکه موردمطالعه نشان داده‌شده است. در شکل (۳) الگوی مصرف روزانه برای شبکه زدجی نشان داده‌شده و در تحلیل با کمک روش پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است.

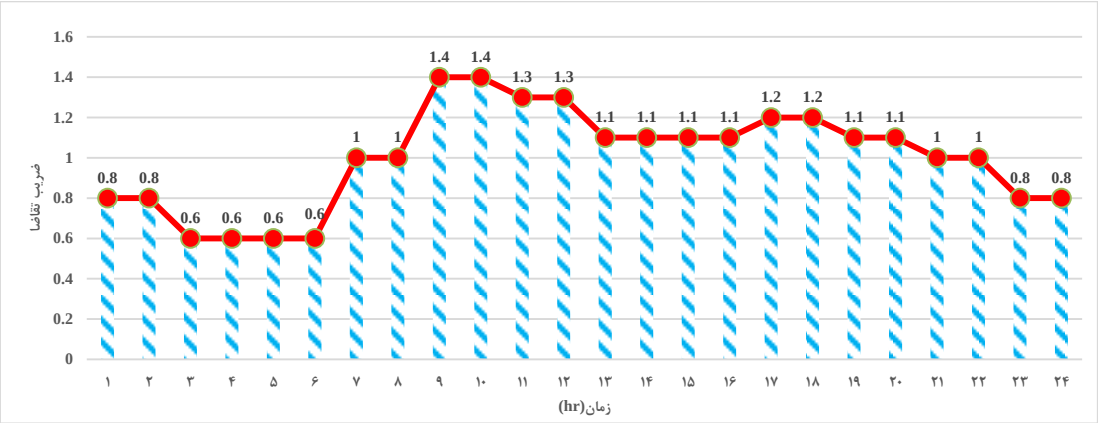


شکل۲.نمای کلی از شبکه زدجی (Sugishita et al., 2021)

جدول۲. مشخصات شبکه زدجی

عنوان	مقدار	عنوان	مقدار
تعداد گره‌ها	۱۱۳	حداقل فشار (m)	۱۶/۵۳
تعداد لوله‌ها	۱۶۴	متوسط فشار (m)	۴۳/۹۷
تعداد مخازن	۱	حداکثر فشار (m)	۷۸/۹۸
بیشترین مصرف گره‌ای (l/s)	۴۹	حداکثر فشار اضافی (m)	۱۳/۷۳
مصرف گره‌ای پایه (l/s)	۳۵	×	×

(Sugishita et al., 2021)



شکل۳.الگوی مصرف شبکه توزیع آب زدجی

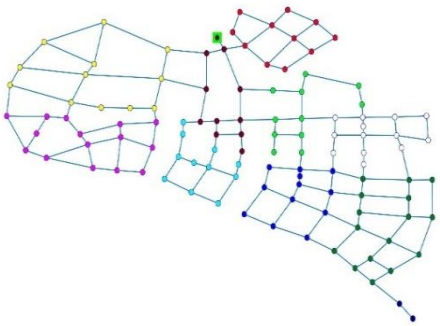
نتایج

انتخاب الگوریتم دو هدفه برتر

در این بخش عملکرد چهار الگوریتم فرا ابتکاری دو هدفه NSGAII، MOGWO، SPEA2، MOPSO جهت استفاده در روش پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از شبکه توزیع آب شهری زدجی استفاده شد. تابع هدف مطابق رابطه (۳) و (۴) و مقید مطابق رابطه (۵)، مورد استفاده و نتایج آن مطابق جدول (۳) محاسبه شد. مطابق شکل (۴) نتایج با فرض تعداد ۱۰ ناحیه مجزای اندازه‌گیری مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. جهت انتخاب الگوریتم برتر با توجه حداقل شدن همزمان دو هدف هزینه و نشت و همچنین شاخص حداقل شدن میزان انحراف معیار فشار گرهی مقایسه بین الگوریتم‌ها صورت گرفت. حداقل شدن همزمان سه پارامتر مذکور، حالت بهینه جهت ایجاد بهینه DMA در شبکه را موجب می‌گردد اما درصورتی‌که یکی از این پارامترها به‌طور همزمان حداقل نشود اهداف مدنظر در بهینه‌سازی به‌طور کامل تأمین نمی‌شود. همان‌گونه که نتایج نشان داد، الگوریتم‌های SPEA2 نتایج بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌های دو هدفه در حداقل شدن مقادیر هزینه، میزان نشت و مقادیر انحراف معیار فشار گرهی داشت. هرچند الگوریتم MOPSO ازنظر هزینه بهترین عملکرد را نسبت به سایر الگوریتم‌ها نشان می‌دهد، لیکن ازنقطه‌نظر میزان نشت گرهی و انحراف معیار فشار نسبت به الگوریتم‌های SPEA2 و NSGAII نتایج با مقادیر بالاتری داشته است. پس از الگوریتم SPEA2 الگوریتم NSGAII نتایج مناسبی درمجموع مقادیر یادشده نسبت به سایر الگوریتم‌ها داشته است. درنهایت الگوریتم SPEA2 به‌عنوان الگوریتم برتر انتخاب و در تحقیق حاضر از آن استفاده شد. ضمناً نتایج حاکی از آن است که انتخاب الگوریتم بهینه‌سازی بر بهبود نتایج کاملاً مؤثر بوده است.

جدول ۳.نتایج الگوریتم‌های دو هدفه در هزینه و میزان نشت و مقادیر فشار

الگوریتم	هزینه ($)	نشت (lit/s)	حداقل فشار (m)	فشار متوسط (m)	فشار حداکثر (m)	انحراف معیار فشار (m)
NSGAII	۳۰۲۵۰	۱۱۴/۵۸	۱۵/۱۹	۴۵/۸۱	۷۶/۷۹	۶/۷
MOGWO	۲۹۰۶۲	۱۱۵/۷۲	۱۵/۶۹	۴۶/۲	۷۷/۰۶	۶/۸۵
SPEA2	۲۹۰۶۲	۱۱۴/۴۸	۱۵/۰۳	۴۵/۷۶	۷۶/۸۵	۶/۶۵
MOPSO	۱۲۳۹۶	۱۱۵/۶۶	۱۵/۸۹	۴۶/۱۹	۷۷/۲۱	۶/۸۹



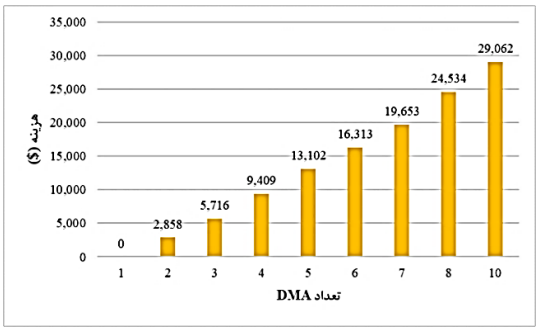
شکل ۴. نتایج ایجاد ۱۰ ناحیه مجزای اندازه‌گیری در شبکه توزیع آب زدجی

نتایج شبکه توزیع آب شهری زدجی

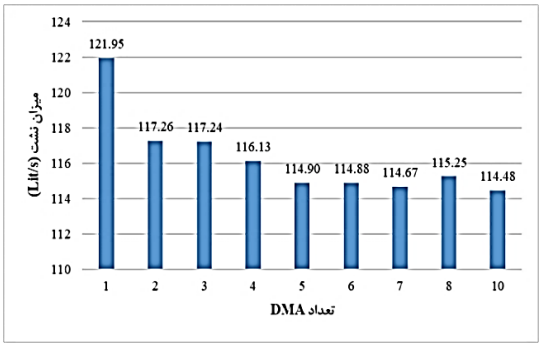
پس از انتخاب الگوریتم SPEA2 به‌عنوان الگوریتم برتر و به منظور تعیین تعداد بهینه تعداد نواحی مجزای اندازه‌گیری مطابق جدول (۵)، نتایج میزان نشت، هزینه، پیمانگی، تعداد لوله‌های مرزی، تعداد کنتورها و شیرهای مجزاساز، میزان حداقل و حداکثر و متوسط و انحراف معیار فشار با تغییر تعداد و هندسه نواحی نشان داده‌شده است. در شکل (۵) تغییرات هزینه ایجاد نواحی با تغییر تعداد DMA و در شکل (۶) تغییرات میزان نشت با تغییر تعداد DMA نشان داده‌شده است. مطابق شکل(۵) با توجه به افزایش تعداد تجهیزات ایجاد نواحی با افزایش تعداد نواحی به‌طور طبیعی هزینه ایجاد نواحی بالا می‌رود. از طرفی مطابق شکل(۶) کاهش میزان نشت با افزایش نواحی تا تعداد ۵ ناحیه کاهش محسوس داشته و پس‌ازآن با افزایش تعداد نواحی کاهش چندانی از خود نشان نمی‌دهد. مطابق جدول (۴) در تعداد ۵ ناحیه میزان نشت به میزان ۱۱۴/۹۰ لیتر بر ثانیه کاهش‌یافته و پس‌ازآن با افزایش تعداد نواحی کاهش زیادی پیدا نکرده است. ازنقطه‌نظر معیار پیمانگی در تعداد ۶ ناحیه مقدار بهینه محاسبه گردیده است و از طرفی میزان هزینه نیز متناسب با آن افزایش‌یافته است. درمجموع با در نظر گرفتن کمترین میزان نشت و کمترین میزان هزینه، تعداد ۵ ناحیه به‌عنوان تعداد بهینه پیشنهاد می‌گردد. با انتخاب این تعداد از ناحیه‌بندی میزان انحراف معیار فشار گرهی به میزان ۱/۱۷ متر معادل ۱۴/۸ درصد کاهش نسبت به حالت بدون ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری یافته است. میزان نشت در شبکه ۷/۰۵ لیتر بر ثانیه معادل ۵/۸ درصد نسبت به حالت بدون ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری کاهش‌یافته است. ضمن اینکه با توجه به ایجاد امکان نشت‌یابی بهتر در شبکه به‌واسطه ایجاد نواحی کنترل میزان نشت شبکه نیز مهیا گردیده است. در شکل (۷) نتایج ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری به ازای تعداد ۲، ۵، ۶، ۸ ناحیه نشان داده شده است.

جدول ۴.نتایج ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری با تعداد مختلف در شبکه زدجی

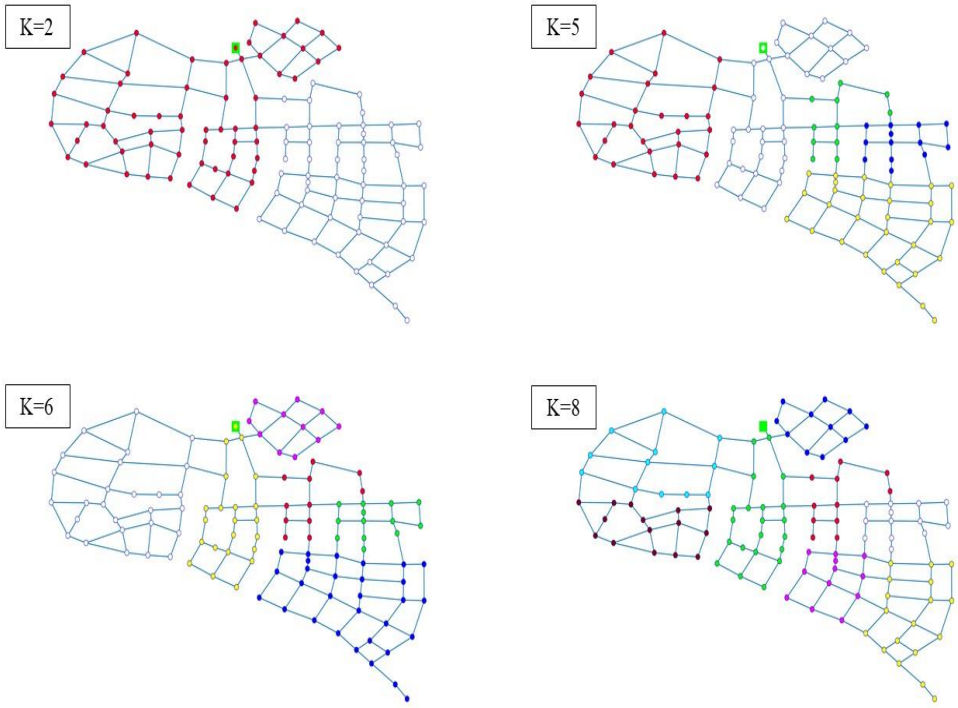
تعداد نواحی	هزینه ($)	نشت (lit/s)	حداقل فشار (m)	متوسط فشار (m)	حداکثر فشار (m)	انحراف معیار فشار (m)	شاخص پیمانگی	تعداد لوله مرزی	تعداد کنتور	تعداد شیرها
×	×	۱۲۱/۹۵	۱۶/۵۳	۴۸/۴۰	۷۸/۹۸	۷/۹۲	×	×	×	×
۲	۲۸۵۸	۱۱۷/۲۶	۱۶/۲۲	۴۶/۶۹	۷۷/۵۸	۷/۲۹	۰/۴۷	۲	۱	۱
۳	۵۷۱۶	۱۱۷/۲۴	۱۶/۲۶	۴۶/۵۲	۷۷/۵۹	۷/۳۰	۰/۶	۴	۲	۲
۴	۹۴۰۹	۱۱۶/۱۳	۱۵/۲۳	۴۶/۳۰	۷۷/۳۴	۷/۰۷	۰/۶۴	۷	۳	۴
۵	۱۳۱۰۲	۱۱۴/۹۰	۱۵/۰۸	۴۵/۹۰	۷۶/۸۱	۶/۷۵	۰/۶۸	۱۰	۴	۶
۶	۱۶۳۱۳	۱۱۴/۸۸	۱۵/۱۹	۴۵/۹۱	۷۶/۸۳	۶/۷۶	۰/۷۳	۱۱	۶	۵
۷	۱۹۶۵۳	۱۱۴/۶۷	۱۵/۰۸	۴۵/۸۳	۷۶/۷۳	۶/۶۹	۰/۷۲	۱۵	۶	۹
۸	۲۴۵۳۴	۱۱۵/۲۶	۱۵/۳۰	۴۵/۰۵	۷۶/۸۲	۶/۸۳	۰/۷۳	۱۸	۸	۱۰
۱۰	۲۹۰۶۲	۱۱۴/۴۸	۱۵/۰۳	۴۵/۷۶	۷۶/۸۵	۶/۶۵	۰/۷۲	۲۲	۹	۱۳



شکل ۵.تغییرات هزینه ایجاد نواحی با افزایش تعداد DMA

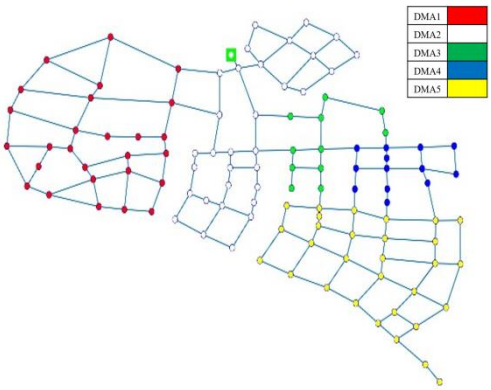


شکل ۶.تغییرات میزان نشت در شبکه با افزایش تعداد DMA



شکل ۷. نتایج ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری به ازای تعداد ۲، ۵، ۶، ۸ ناحیه

شاخص (DSI[۳]) تشابه یکنواختی ابعاد DMA ها در شبکه در شکل (۸) طراحی نواحی مجزای اندازه‌گیری با ۵ ناحیه نشان داده شده است. در جدول (۶) درصد و تعداد قرارگیری گره‌های مصرف در نواحی مختلف نشان داده شده است.



شکل ۸. طراحی نواحی مجزای اندازه‌گیری با ۵ ناحیه

جدول۵. درصد و تعداد قرارگیری گره‌های مصرف در نواحی

شرح	تعداد گره مصرفی	درصد قرارگیری گره‌های مصرف در نواحی
DMA1	۲۷	٪۲۴
DMA2	۳۲	٪۲۸
DMA3	۱۱	٪۱۰
DMA4	۱۳	٪۱۲
DMA5	۳۰	٪۲۷

توزیع آب شهری است. شاخص DSI از انحراف معیار برای مقایسه تقاضا با متوسط تقاضا استفاده می‌کند. مطابق رابطه (۶) مقدار شاخص DSI محاسبه می‌گردد (Liu & Han, 2018).

$$DSI = \sqrt{\frac{\sum_{d=1}^{K}(Q_d - Q_{mean})^2}{k}} \qquad (۶)$$

که K تعداد DMA و Q_d تقاضای گرهی در DMA ام k و Q_{mean} متوسط تقاضای گرهی در کل شبکه توزیع آب شهری است. با توجه به آنکه مصرف پایه هر گره ۳۲ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است، و با توجه به رابطه (۶) مقدار شاخص یکنواختی ۸/۸۲ محاسبه گردیده است. البته باید در نظر داشت علاوه بر شاخص یکنواختی سایر پارامترهای نظیر حداقل قطع در لوله‌های مرزی و سایر شاخص‌های هیدرولیکی نیز باید در نظر گرفته شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی بر روی ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری در شبکه‌های توزیع آب با رویکرد دو هدفه کاهش هزینه ایجاد نواحی و کاهش نشت پرداخته شد. با توجه به اهمیت و اثرگذاری استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی در نتایج برای اولین بار به مقایسه نتایج حاصل از تغییر الگوریتم‌های بهینه‌سازی جهت ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری در شبکه توزیع آب پرداخته شد. پس از بررسی بین الگوریتم‌های

NSGAII، MOGWO، SPEA2، MOPSO و با استفاده از شبکه توزیع آب شهر زدجی نتایج به لحاظ میزان نشت، هزینه ایجاد نواحی و مقادیر انحراف معیار فشار گرهی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که برای پروژه‌های موردمطالعه، الگوریتم SPEA2 کمترین میزان نشت، هزینه ایجاد نواحی و همچنین انحراف معیار گرهی در شبکه را نسبت به سایر الگوریتم‌های دو هدفه دارد. در گام بعد نتایج ایجاد نواحی بین با تعداد نواحی مختلف به لحاظ هزینه ایجاد، نشت، فشار گرهی و شاخص پیمانگی مورد تحلیل قرار گرفت و تعداد ۵ ناحیه به‌عنوان حالت بهینه پیشنهاد گردید. نتایج نشان داد که میزان نشت در شبکه به میزان ۵/۸ درصد و میزان انحراف معیار فشار در شبکه به میران ۱۴/۸ درصد نسبت به حالت بدون ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری کاهش‌یافته است. نتایج نشان داد که انتخاب تابع هدف کاهش نشت موجب کاهش نشت و مدیریت فشار در شبکه توزیع گردید. روش پیشنهادی علاوه بر ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری که موجب کنترل و کاهش نشت در شبکه می‌شود، باعث مدیریت فشار در شبکه با کاهش مقدار انحراف معیار فشار گرهی در شبکه توزیع آب می‌شود. به دلیل محدودیت در تأمین داده‌های شبکه‌های بومی از شبکه مرجع زدجی استفاده گردید.

Reference:

Bader, D. A., Meyerhenke, H., Sanders, P., & Wagner, D. (2013). *Graph partitioning and graph clustering* (Vol. 588). American Mathematical Society Providence, RI.

Bianchotti, J. D., Denardi, M., Castro-Gama, M., & Puccini, G. D. (2021). Sectorization for water distribution systems with multiple sources: A performance indices comparison. *Water*, *13*(2), 131.

Bui, X. K., Marlim, M. S., & Kang, D. (2021). Optimal design of district-metered areas in a water distribution network using coupled self-organizing map and community structure algorithm. *Water*, *13*(6), 836.

Coello, C. C., & Lechuga, M. S. (2002). MOPSO: A proposal for multiple objective particle swarm optimization. Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. CEC'02 (Cat. No. 02TH8600),

Creaco, E., & Haidar, H. (2019). Multiobjective optimization of control valve installation and DMA creation for reducing leakage in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *145*(10), 04019046.

Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., & Meyarivan, T. (2000). A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI: 6th International Conference Paris, France, September 18–20, 2000 Proceedings 6,

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, *6*(2), 182-197.

Eliades, D. G., Kyriakou, M., Vrachimis, S., & Polycarpou, M. M. (2016). EPANET-MATLAB toolkit: An open-source software for interfacing EPANET with MATLAB. Proc. 14th International Conference on Computing and Control for the Water Industry (CCWI),

Ferrari, G., & Savic, D. (2015). Economic performance of DMAs in water distribution systems. *Procedia Engineering*, *119*, 189-195.

Gopan, A. (2010). Pressure control for leakage minimization in water distribution network.

Kakeshpour, M., Jalili Ghazizadeh, M. R., Hoseyni, S. A., & Sharafati, A. (2023). Creating Districted Metered Areas in the Water Distribution Network Using Optimal Selection Indexes. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*[In Persian].

Laucelli, D. B., Simone, A., Berardi, L., & Giustolisi, O. (2017). Optimal design of district metering areas for the reduction of leakages. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *143*(6), 04017017.

Liu, J., & Han, R. (2018). Spectral clustering and multicriteria decision for design of district metered areas. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *144*(5), 04018013.

Liu, J., & Lansey, K. E. (2020). Multiphase DMA design methodology based on graph theory and many-objective optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *146*(8), 04020068.

Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, *69*, 46-61.

Mirjalili, S., Saremi, S., Mirjalili, S. M., & Coelho, L. d. S. (2016). Multi-objective grey wolf optimizer: a novel algorithm for multi-criterion optimization. *Expert systems with applications*, *47*, 106-119.

Newman, M. E., & Girvan, M. (2004). Finding and evaluating community structure in networks. *Physical review E*, *69*(2), 026113.

Pearson, D. (2019). *Standard Definitions for Water Losses*. IWA Publishing London, UK.

Rahmani, F., Muhammed, K., Behzadian, K., & Farmani, R. (2018). Optimal operation of water distribution systems using a graph theory–based configuration of district-metered areas. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *144*(8), 04018042.

Rossman, L. A. (2000). EPANET 2: users manual.

Saldarriaga, J., Bohorquez, J., Celeita, D., Vega, L., Paez, D., Savic, D., Dandy, G., Filion, Y., Grayman, W., & Kapelan, Z. (2019). Battle of the water networks district metered areas. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *145*(4), 04019002.

Saldarriaga, J., Páez, D., Bohórquez, J., Páez, N., París, J. P., Rincón, D., Salcedo, C., & Vallejo, D. (2016). Rehabilitation and leakage reduction on C-town using hydraulic criteria. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *142*(5), C4015013.

Sugishita, K., Abdel-Mottaleb, N., Zhang, Q., & Masuda, N. (2021). A growth model for water distribution networks with loops. *Proceedings of the Royal Society A*, *477*(2255), 20210528.

Zeidan, M., Li, P., & Ostfeld, A. (2021). DMA segmentation and multiobjective optimization for trading off water age, excess pressure, and pump operational cost in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *147*(4), 04021006.

Zhang, Q., Wu, Z. Y., Zhao, M., Qi, J., Huang, Y., & Zhao, H. (2017). Automatic partitioning of water distribution networks using multiscale community detection and multiobjective optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *143*(9), 04017057.

Zhang, T., Yao, H., Chu, S., Yu, T., & Shao, Y. (2021). Optimized DMA partition to reduce background leakage rate in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *147*(10), 04021071.

Zhou, H., Liu, Y., Yao, H., Yu, T., & Shao, Y. (2022). Comparative Analysis on the DMA Partitioning Methods Whether Trunk Mains Participated. *Water*, *14*(23), 3876.

Zitzler, E., & Thiele, L. (1998). An evolutionary algorithm for multiobjective optimization: The strength pareto approach. *TIK report*, *43*.

Zitzler, E., Laumanns, M., & Thiele, L. (2001). SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm. *TIK report*, *103*.

یادداشت ها

[1] *Demand Driven Analysis*
[2] *Global Gradient Algorithm*
[3] *Demand Similarity Index*