

Quantitative and Operational Performance Comparison of Multi-Objective Evolutionary Algorithms NSGA-II, MOEA/D, and AGE-MOEA in Water Distribution Network Pressure Management Optimization

Farzin Sayad Beyranvand¹, Masoud Shakarami^{2*}

Extended Abstract

Introduction:

Water distribution networks in arid regions, like Iran, face significant challenges including water scarcity and leakage management, necessitating efficient network strategies. Advances in multi-objective evolutionary algorithms offer new optimization methods, but the applicability of these algorithms, particularly AGE-MOEA, in real-world contexts has not been thoroughly evaluated. This study introduces a two-phase framework combining hydraulic simulation and evolutionary optimization to assess various algorithms' performance and practical feasibility in water distribution systems.

Materials and Methods:

This study created an integrated framework that combines hydraulic simulation and multi-objective evolutionary optimization for three water distribution networks: the Hanoi benchmark, the Balerna irrigation network, and the real Poldokhtar western zone network. Hydraulic models were built using WaterGEMS and adapted to EPANET 2.2 format, with pressure-driven analysis conducted via the WNTR library. The Poldokhtar model was calibrated against real-world measurements, achieving satisfactory results despite limitations in sensor deployment. Three evolutionary algorithms—NSGA-II, MOEA/D, and AGE-MOEA—were implemented using the DEAP library with a set computational budget for optimizing pipe diameters and pressure schedules. Performance was assessed based on Hypervolume and Inverted Generational Distance metrics, with the aim of minimizing costs and pressure-related penalties across the networks.

Results and Discussions:

Performance evaluation across three water distribution networks demonstrated distinct behaviors among the algorithms used. On the Hanoi network, NSGA-II delivered the only fully feasible solution with zero pressure deviation and superior navigation of hydraulic constraints, while AGE-MOEA excelled in Pareto front quality. In the larger Balerna network, AGE-MOEA again showed quantitative superiority, contrasting with MOEA/D, which struggled in high-dimensional design spaces. The Poldokhtar analysis revealed AGE-MOEA's dominance in achieving lower excess pressures for similar hydraulic penalties, while NSGA-II offered better solution diversity. Hypervolume convergence indicated MOEA/D had the highest cumulative HV, showcasing deep convergence but weaker overall Pareto front coverage. Ultimately, the study highlighted that algorithm selection must consider operational stability and practical applicability; AGE-MOEA is best for coverage, NSGA-II for feasibility, and MOEA/D for stable valve settings..

Conclusion:

This study evaluated NSGA-II, MOEA/D, and AGE-MOEA for optimizing water distribution networks using a WaterGEMS-EPANET-Python framework. AGE-MOEA excelled in Pareto front coverage for large-scale networks, while NSGA-II performed best for constraint-heavy problems needing feasible solutions; MOEA/D produced stable PRV scheduling patterns despite weaker diversity. Algorithm selection should depend on priorities: AGE-MOEA for Pareto quality, NSGA-II for constraint satisfaction, and MOEA/D for operational stability, with future research suggesting the need for pressure-leakage modeling for leakage reduction.

Keywords: Multi-objective optimization; Operational implementability; Poldokhtar city; Pressure management; Water distribution network

1- M.Sc. Graduate in Hydraulic Structures Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2- Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural, Lorestan University, Lorestan, Iran.

*corresponding author Email: Shakarami.mas@lu.ac.ir

Author Contributions:

First Author: Data collection for Poldasht network, implementation of metaheuristic algorithms, execution of simulations, pressure and cost analysis, manuscript writing.

Second Author: Supervision, data acquisition from Lorestan Province Water and Wastewater Company, results verification, manuscript editing and revision, response to reviewer comments.

Data Availability Statement:

Data related to the Poldokhtar city water distribution network were provided by Lorestan Province Water and Wastewater Company.

Funding:

The authors would like to express their sincere gratitude to the Research Group of Lorestan Province Water and Wastewater Organization for providing the data used in this study.

Ethical Considerations:

The authors declare that all ethical principles have been observed in the conduct and publication of this work, and this is confirmed by all authors.

How to cite this paper:

Sayad Beyranvand, F., Shakarami, M. (2026). Quantitative and Operational Performance Comparison of Multi-Objective Evolutionary Algorithms NSGA-II, MOEA/D, and AGE-MOEA in Water Distribution Network Pressure Management Optimization. *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*. 35: 1-24. <https://dx.doi.org/10.2203>.

Copyright:

© Authors, Published by Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery. This is an open-access article distributed under the CC-BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Citation: این قسمت توسط دفتر مجله تکمیل خواهد شد.



مقایسه عملکرد کمی و عملیاتی الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه NSGA-II، MOEA/D و AGE-MOEA در بهینه‌سازی مدیریت فشار شبکه‌های توزیع آب

فرزین صیاد بیرانوند^۱ و مسعود شاکرمی^{۲*}

چکیده:

در این پژوهش، عملکرد سه الگوریتم تکاملی چندهدفه NSGA-II، AGE-MOEA و MOEA/D برای بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب با هدف همزمان کمینه‌سازی هزینه و انحراف فشار ارزیابی شده است. نتایج بر روی شبکه‌های پنج‌مارک هانوی و بالرما نشان می‌دهد که AGE-MOEA از نظر شاخص‌های کمی ابرحجم (HV) و فاصله نسلی معکوس (IGD) پوشش کلی بهتری بر جبهه پارتو دارد، اما در شبکه هانوی تنها NSGA-II موفق به یافتن جواب کاملاً موجه با انحراف فشار صفر شد. در شبکه بالرما، MOEA/D به دلیل حساسیت به اختلاف مقیاس اهداف و ضعف در مدیریت قیود، ضعیف‌ترین عملکرد را ثبت کرد. بررسی الگوهای تنظیم ساعتی شیرهای فشارشکن شبکه پلدختر نشان داد که علی‌رغم برتری NSGA-II و AGE-MOEA در کیفیت جبهه پارتو، نوسانات شدید تنظیمات آن‌ها از منظر عملیاتی می‌تواند موجب استهلاک تجهیزات و ناپایداری شبکه شود، در حالی که MOEA/D الگویی محافظه‌کارانه‌تر ارائه می‌دهد. تحلیل روند HV نشان داد MOEA/D به بالاترین مقدار تجمعی در فرآیند همگرایی دست می‌یابد که با برتری AGE-MOEA در HV جبهه پارتو نهایی متفاوت بوده و ناشی از تفاوت این دو معیار است. کاهش فشارهای مازاد حاصل از بهینه‌سازی، پتانسیل کاهش نشت پس‌زمینه را فراهم می‌آورد، هرچند کمی‌سازی دقیق آن مستلزم مدل‌سازی مستقیم نشت است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی چندهدفه، شبکه توزیع آب، شهرستان پلدختر، قابلیت بهره‌برداری عملیاتی، مدیریت فشار.

ارجاع: این قسمت توسط دفتر مجله تکمیل خواهد شد.

مقدمه

اندازه‌گیری و مصرف غیرمجاز قرار دارد (Adedeji et al., 2017). اگرچه نشت آب اجتناب‌ناپذیر است، اما با مدیریت مناسب می‌توان آن را در سطحی اقتصادی کنترل کرد (Bergant, 2001). از آنجا که نشت و مصرف آب به فشار شبکه وابسته‌اند، مدیریت فشار یکی از مؤثرترین راهکارهای کاهش تلفات محسوب می‌شود. در این راستا، مدل‌های شبیه‌سازی مبتنی بر تقاضا، به دلیل فرض استقلال تقاضا از فشار، در شرایط بحرانی دقت کافی ندارند (Todini, 2003). مطالعات اولیه عواملی نظیر شرایط زمین، اقلیم، خوردگی، کیفیت لوله‌ها، بسترگذاری نامناسب، ضربه قوچ و فرسودگی زیرساخت‌ها را از عوامل اصلی نشت معرفی کرده‌اند (Morris, 1967).

آب یکی از اساسی‌ترین منابع طبیعی و عامل کلیدی در سلامت، توسعه اقتصادی و توسعه انسانی است و مدیریت پایدار آن، به‌ویژه در کشورهای خشک، اهمیت فراوانی دارد (Fatahi et al., 2024). ایران با میانگین بارش سالانه حدود ۲۴۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر، با محدودیت جدی منابع آب مواجه است؛ از این رو، کاهش تلفات در شبکه‌های توزیع آب به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهکارهای افزایش بهره‌وری منابع آبی مطرح می‌شود. تشدید کمبود آب و افزایش هزینه‌های تأمین، توجه به مسئله آب به حساب نیامده را افزایش داده است (Goharimoghadam et al., 2023). تلفات آب در شبکه‌های تحت تأثیر عواملی مانند فرسودگی زیرساخت‌ها، رشد شهرنشینی، محدودیت منابع مالی، ضعف سامانه‌های

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران.

* نویسنده مسئول: shakarami.mas@lu.ac.ir

تنظیمات شیرهای فشارشکن توجه کمتری شده است. این پژوهش به مقایسه سه الگوریتم چندهدفه NSGA-II، MOEA/D و AGE-MOEA در بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب زون غربی شهرستان پلدختر می‌پردازد و برای نخستین بار AGE-MOEA را در این حوزه معرفی و ارزیابی می‌کند. این مطالعه کیفیت جبهه پارتو را با قابلیت اجرای عملی راهکارها توأماً بررسی کرده و در شبکه‌های پنج‌مارک و یک شبکه واقعی کاربرد آن‌ها را ارزیابی می‌نماید.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، جهت بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب زون غربی شهرستان پلدختر یک چارچوب یکپارچه شبیه‌سازی هیدرولیکی-بهینه‌سازی تکاملی توسعه داده شد. ابتدا مدل هیدرولیکی هر سه شبکه در WaterGEMS ایجاد و پس از تحلیل اولیه، به فرمت EPANET تبدیل شد. سپس الگوریتم‌های NSGA-II، MOEA/D و AGE-MOEA در محیط Python پیاده‌سازی شدند.

الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نسخه دوم (NSGA-II)

الگوریتم NSGA-II که توسط Deb et al. (2002) معرفی شد، یکی از کارآمدترین روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه است و بر اساس مفهوم تسلط پارتو عمل می‌کند. در این الگوریتم، هر راه‌حل شامل پیکربندی متغیرهای تصمیم شبکه است و بر اساس معیارهای هزینه و انحراف فشار در شبکه‌های مختلف ارزیابی می‌شود. مراحل اصلی NSGA-II شامل مرتب‌سازی نامغلوب برای تعیین جبهه‌ها، محاسبه فاصله ازدحام برای حفظ تنوع، انتخاب والدین از طریق فرآیند تورنمنت، و نهایتاً انتخاب نخبگان برای نسل بعد است.

الگوریتم تکاملی چندهدفه مبتنی بر تجزیه (MOEA/D)

الگوریتم MOEA/D که توسط Zhang and Li (2007) توسعه یافته، به مسئله بهینه‌سازی چندهدفه (MOP) به جای مرتب‌سازی نامغلوب، به زیرمسائل تک‌هدفه تجزیه و آن‌ها را همزمان حل می‌کند. این الگوریتم شامل تعریف بردارهای وزن برای هر زیرمسئله، مشخص کردن همسایگی برای هر بردار وزن و استفاده از توابع تجمیع برای ترکیب اهداف به یک عدد اسکالر است. همچنین، در فرآیند تکامل مشارکتی، راه‌حل‌های جدید از همسایگی تولید می‌شوند و در صورت بهبود عملکرد، جایگزین راه‌حل‌های قبلی می‌گردند.

با توسعه رویکردهای مدیریتی، نقش فشار به‌عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر بر نشت مورد توجه قرار گرفت. در همین راستا، Vitkovsky et al. (2000) روش نشت‌یابی مبتنی بر کالیبراسیون مدل هیدرولیکی و الگوریتم ژنتیک را ارائه کردند. Vugelin et al. (2009) اثربخشی مدیریت فشار با شیرهای فشارشکن را در صرفه‌جویی قابل توجه آب گزارش کردند. در ادامه، پژوهش‌ها به سمت روش‌های هوشمند و بهینه‌سازی چندهدفه حرکت کردند؛ به‌گونه‌ای که Deidda et al. (2014) مفهوم نشت بهینه اقتصادی را معرفی کردند و Armadodi et al. (2018) نقش داده‌های فشار، الگوریتم ژنتیک و جانمایی مناسب حسگرها را در افزایش دقت مدل‌سازی نشت نشان دادند. در ایران نیز مطالعات متعددی در زمینه مدیریت فشار و نشت‌یابی انجام شده است Boustani (2015) and Khodashenas (2015) بر اهمیت کیفیت داده‌های فشار و الگوی مصرف در مکان‌یابی نشت تأکید کردند، Azadfar et al. (2019) با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی، کاهش نشت و بهبود عملکرد شبکه را گزارش کردند. Hedayati Marzouni et al. (2022) نیز کارایی شبکه‌های عصبی مصنوعی، مدیریت هوشمند فشار و ترکیب شیرهای فشارشکن با پمپ‌های دور متغیر را در کاهش نشت و نوسانات فشار تأیید کردند. در پژوهش‌های جدید، تمرکز اصلی بر توسعه روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه است.

مطالعات اخیر بر توسعه روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه و هوشمند برای مدیریت فشار و نشت متمرکز بوده‌اند. Maziotis et al. (2022) کاهش نشت را عاملی مؤثر در ارتقای پایداری اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی شبکه‌های توزیع آب معرفی کردند. همچنین، Pei et al. (2024) با تلفیق یادگیری ماشین و بهینه‌سازی تکاملی، چارچوبی برای زمان‌بندی بهینه پمپ‌ها ارائه دادند که تعادل مناسبی میان تاب‌آوری شبکه و هزینه بهره‌برداری ایجاد می‌کند. در زمینه مقایسه الگوریتم‌های تکاملی، Du et al. (2025) ضمن ارزیابی و بهبود الگوریتم‌های چندهدفه، محدودیت‌های روش‌های متداول در شبکه‌های بزرگ مقیاس را نشان داده و بر مزیت رویکردهای بهبودیافته و ترکیبی در افزایش کیفیت جبهه پارتو و عملکرد بهینه‌سازی تأکید کرده‌اند. با وجود کاربرد گسترده الگوریتم‌هایی مانند NSGA-II و MOEA/D در مهندسی آب، الگوریتم نسل جدید AGE-MOEA-II مبتنی بر تخمین هندسه تطبیقی جبهه پارتو (Panichella, 2022) تاکنون در بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب به‌کار گرفته نشده است.

با وجود تحقیقات گسترده در طراحی شبکه‌های توزیع آب و مدیریت فشار، به بهینه‌سازی همزمان قطر لوله‌ها و

الگوریتم تکاملی چندهدفه هدایت شده با تقریب (AGE-MOEA)

الگوریتم AGE-MOEA^۱ یک روش نوین در بهینه سازی است که برای رفع مشکلات الگوریتم های سنتی طراحی شده است. این الگوریتم با تقریب هندسه جبهه پارتو و استفاده از آن برای هدایت جستجو عمل می کند. مراحل کار آن شامل تخمین هندسه جبهه پارتو با هنجار L_p ، محاسبه امتیاز بقا (که شامل فاصله از مبدأ و نزدیکی به همسایه هاست) و انتخاب محیطی برای حفظ راه حل های برتر می باشد. در هر نسل، ۲۰۰ راه حل با بالاترین امتیاز بقا انتخاب می شوند و مقدار p^* به طور تطبیقی به روز می شود تا به تغییرات هندسه جبهه پارتو پاسخ دهد. هدف این الگوریتم ایجاد تعادل مناسب بین کیفیت هیدرولیکی، هزینه و تنوع در راهکارها است (Panichella, 2022).

شاخص های ارزیابی کیفیت جبهه پارتو

دو شاخص استاندارد برای مقایسه عملکرد الگوریتم های بهینه سازی چندهدفه به کار می روند:

شاخص ابرحجم (HV): این شاخص حجم فضایی که مجموعه جواب های غیرمغلوب و یک نقطه مرجع مشخص را محاط می کند، اندازه گیری می کند. مقدار بالای HV نشان دهنده عملکرد بهتر الگوریتم است (Zitzler and Thiele, 1998).

شاخص فاصله نسلی معکوس (IGD): این شاخص میانگین فاصله هر نقطه از جبهه پارتوی مرجع تا نزدیک ترین جواب تولید شده توسط الگوریتم را محاسبه می کند. مقادیر کمتر IGD نشان دهنده همگرایی بیشتر به جبهه مرجع است (Coello and Reyes-Sierra, 2004).

در نتیجه، HV و IGD با هم اطلاعات کاملی از کیفیت جبهه پارتو ارائه می دهند.

شبکه های توزیع آب مورد مطالعه

شبکه های توزیع آب مورد مطالعه در این پژوهش شامل یک شبکه کوچک مقیاس مرجع هانوی و دو شبکه بزرگ مقیاس بالرها و در نهایت شبکه توزیع آب شهرستان پلدختر می باشد. در ادامه این شبکه ها توصیف شده اند.

شبکه هانوی

شبکه توزیع آب هانوی، یک شبکه واقعی در شهر هانوی ویتنام، شامل ۳۴ لوله و ۳۲ گره متصل در سه حلقه است که به صورت ثقلی از مخزنی با بار هیدرولیکی ۱۰۰ متر تغذیه می شود. این شبکه نخستین بار توسط Fujiwara and Khang (1987) معرفی شد. در این پژوهش، افت اصطکاک با رابطه هیزن-ویلیامز و با فرض ضریب زبری ۱۳۰ برای تمامی لوله ها محاسبه شده، حداقل فشار مجاز در گره ها ۲۰ متر در نظر گرفته شده و جانمایی شبکه در شکل (۱-الف) ارائه شده است.

طول لوله های شبکه در جدول (۱) ارائه شده است. برای این شبکه ۶ قطر تجاری (۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۴، ۳۰ و ۴۰ اینچ) در نظر گرفته شده که با توجه به ۳۴ لوله، تعداد ۶۳۴ حالت طراحی ممکن ایجاد می شود؛ از این رو، الگوریتم بهینه سازی باید بهترین ترکیب با حداقل هزینه را در این فضای جستجوی بسیار بزرگ بیابد. هزینه لوله ها بر اساس رابطه ارائه شده توسط Fujiwara and Khang (1990) محاسبه شده است:

$$C_i = 1.1 \times L_i \times (D_i)^{1.5} \quad (12)$$

که در آن C_i هزینه ی لوله، L_i طول لوله و D_i قطر لوله می باشد. ارتفاع گره ها صفر فرض می شود. در جدول (۲) مقادیر هزینه در واحد طول هر لوله برای قطرهای تجاری قابل انتخاب ارائه شده است.

جدول ۱- قطر مربوط به طول لوله های شبکه هانوی (Fujiwara and Khang, 1990)

شماره لوله	طول لوله (متر)	شماره لوله	طول لوله (متر)	شماره لوله	طول لوله (متر)
۱	۱۰۰	۱۳	۸۰۰	۲۵	۱/۳۰۰
۲	۱/۳۵۰	۱۴	۵۰۰	۲۶	۸۵۰
۳	۹۰۰	۱۵	۵۵۰	۲۷	۳۰۰
۴	۱/۱۵۰	۱۶	۲/۷۳۰	۲۸	۷۵۰
۵	۱/۴۵۰	۱۷	۱/۷۵۰	۲۹	۱/۵۰۰
۶	۴۵۰	۱۸	۸۰۰	۳۰	۲/۰۰۰

^۱ Approximation-Guided Evolutionary MOEA

شبکه توزیع آب بالرما،
اقتباس شده از یک
شبکه آبیاری در استان
آلمریا اسپانیا،
نخستین بار توسط
Reca and Martinez

۱/۶۰۰	۳۱	۴۰۰	۱۹	۸۵۰	۷
۱۵۰	۳۲	۲/۲۰۰	۲۰	۸۵۰	۸
۸۶۰	۳۳	۱/۵۰۰	۲۱	۸۰۰	۹
۹۵۰	۳۴	۵۰۰	۲۲	۹۵۰	۱۰
		۲/۶۵۰	۲۳	۱/۲۰۰	۱۱
		۱/۲۳۰	۲۴	۳/۵۰۰	۱۲

جدول ۲- سایز و هزینه
واحد لوله‌های قابل
انتخاب برای شبکه
هانوی (Fujiwara and
(Khang, 1990)

شماره لوله	قطر (mm)	قطر (in)	هزینه واحد طول (m/\$)
۱	۳۴۰/۸	۱۲	۴۵/۷۲۶
۲	۴۰۶/۴	۱۶	۷۰/۴۰۰
۳	۵۰۸	۲۰	۹۸/۳۷۸
۴	۶۰۹/۶	۲۴	۱۲۹/۳۳۳
۵	۷۶۲	۳۰	۱۸۰/۷۴۸
۶	۱۰۱۶	۴۰	۲۷۸/۲۸۰

(2006) معرفی شد. این شبکه شامل ۴۵۴ لوله PVC، ۴۴۳
گره و چهار مخزن با هدهای ثابت ۱۱۲، ۱۱۷، ۱۲۲ و ۱۲۷ متر
است و میانگین تقاضای سالانه آن ۲۵،۲ میلیون گالن در روز
می‌باشد. ضریب زبری دارسی-وایسباخ برای تمامی لوله‌ها
۰،۰۰۲۵ و حداقل هد فشاری مجاز در گره‌ها ۲۰ متر در نظر
گرفته شده است (شکل ۱-ب). هر لوله می‌تواند یکی از ۱۰ قطر
تجاری موجود (جدول ۳) را انتخاب کند.

شبکه بالرما

جدول ۳- قطرهای تجاری و هزینه واحد طول لوله در شبکه بالرما (Reca and Martinez, 2006)

هزینه واحد (\$)	قطر (mm)	هزینه واحد (\$)	قطر (mm)
۲۸/۶	۲۲۶/۲	۷/۲۲	۱۱۳
۴۵/۳۹	۲۸۵	۹/۱۰	۱۲۶/۶
۷۶/۳۲	۳۶۱/۸	۱۱/۹۲	۱۴۴/۶
۱۲۴/۶۴	۴۵۲/۲	۱۴/۸۴	۱۶۲/۸
۲۱۵/۸۵	۵۸۱/۸	۱۸/۳۸	۱۸۰/۸

ایجاد فشارهای بالا در بخش‌هایی از شبکه شده است؛ از این رو،
دو شیر فشارشکن، که یکی از آن‌ها قابلیت کنترل هوشمند و
تنظیم الگوی ساعتی از راه دور را دارد، در شبکه به کار گرفته
شده‌اند. مشخصات لوله‌ها در جدول (۴) ارائه شده است. در این
مطالعه، مسئله به صورت یک بهینه‌سازی سه‌هدفه با ۵۳ متغیر
تصمیم شامل ضرایب تنظیم ساعتی دو شیر فشارشکن طی ۲۴
ساعت و قطر پنج لوله منتخب شبکه تعریف شد.

$$\min Z_1 = \sum_{i=1}^{N_p} C_i L_i \quad (13)$$

که در آن Z_1 هزینه کل شبکه، N_p تعداد لوله‌ها، L_i
طول لوله i و C_i هزینه واحد طول متناظر با قطر انتخابی آن
است. به منظور تأمین شرایط مناسب هیدرولیکی، تابع هدف
دوم برای شبکه هانوی به صورت مجموع مربعات انحراف فشار
گره‌ها از بازه مجاز فشار تعریف شد:

(۱۴)

$$\min Z_2 = \sum_{j=1}^{N_n} [\max(0, 20 - P_j)^2 + \max(0, P_j - 60)^2]$$

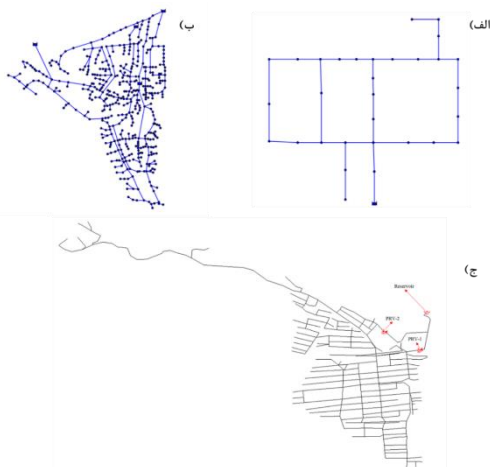
شبکه توزیع آب شهرستان پلدختر

شبکه توزیع آب شهرستان پلدختر به دو زون شرقی و غربی
تقسیم شده است و در این پژوهش، زون غربی به عنوان مطالعه
موردی انتخاب شد (شکل ۱-ج). آب این زون به صورت ثقلی از
یک مخزن ۵۰۰۰ مترمکعبی تأمین شده و شبکه دارای یک
نقطه ورودی مستقل است. اختلاف ارتفاع حدود ۸۰ متری بین
مخزن (۷۳۵ متر) و پایین‌ترین نقطه شبکه (۶۵۵ متر) موجب

فرمول‌بندی مسئله

در این پژوهش، طراحی شبکه توزیع آب به صورت یک مسئله
بهینه‌سازی چندهدفه با دو تابع هدف متضاد فرموله شد. هدف
اول، حداقل‌سازی هزینه کل اجرای شبکه و هدف دوم، بهبود
عملکرد هیدرولیکی از طریق حداقل‌سازی میزان تخطی فشار
گره‌ها از محدوده مجاز بهره‌برداری است. تابع هدف اول به
صورت مجموع هزینه تمامی لوله‌های شبکه بر اساس طول و
قطر انتخابی آن‌ها تعریف می‌شود:

۵	آزیست	۱۵۰	۱۵۶۴
۶	آزیست	۵۰۰	۱۵۷۱



شکل ۱- نمای کلی شبکه توزیع آب؛ الف) شبکه هانوی؛ ب) شبکه بالما؛ ج) زون غربی شهرستان پلدختر

تصادفی متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نهایی بر اساس عملکرد حاصل از مجموعه اجراها گزارش شد. در الگوریتم MOEA/D نیز برای تعریف ساختار همسایگی، تعداد همسایه‌ها برابر ۱۵ و احتمال جفت‌گیری در همسایگی برابر ۰/۷ در نظر گرفته شد. جدول (۵) پارامترهای مورد استفاده در اجرای الگوریتم‌های بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

شبکه هانوی

شکل (۲) بررسی عملکرد سه الگوریتم مذکور را در جبهه پارتو نشان می‌دهد. تقابل میان دو هدف هزینه و انحراف فشار را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است هرچه هزینه شبکه کاهش می‌یابد (به دلیل انتخاب لوله‌هایی با قطر کمتر)، افت فشار در شبکه بیشتر شده و در نتیجه میزان انحراف از فشار مجاز به شدت افزایش می‌یابد. نکته حائز اهمیت در این نمودار، برتری الگوریتم NSGA-II در توزیع و گسترش جبهه پارتو به سمت ناحیه موجه است. در حالی که الگوریتم‌های AGE-MOEA و MOEA/D پیش از رسیدن به انحراف فشار صفر متوقف شده‌اند، الگوریتم NSGA-II توانسته است یک جواب کاملاً موجه (بدون هیچ‌گونه انحراف فشار) با هزینه حدود ۷۷/۵۵۱ دلار بیابد که نشان‌دهنده قدرت بالای این الگوریتم در عبور از محدودیت‌های سخت‌گیرانه مسئله است.

جدول ۵- پارامترهای مورد استفاده در اجرای الگوریتم‌های بهینه‌سازی

پارامتر	NSGA-II	AGE-MOEA	MOEA/D
تعداد اهداف	۲ یا ۳ (برحسب مسئله)	۲ یا ۳ (برحسب مسئله)	۲ یا ۳ (برحسب مسئله)

که در آن N_n تعداد گره‌های شبکه و P_j فشار در گره j است. در این رابطه، فشارهای کمتر از ۲۰ متر و بیشتر از ۶۰ متر به عنوان تخطی از محدوده مجاز در نظر گرفته شده و به صورت مربعی جریمه می‌شوند. همچنین برای شبکه بالما، تابع هدف دوم به منظور حداقل‌سازی انحراف فشار از محدوده مجاز بهره‌برداری (۲۰ تا ۶۰ متر) به صورت زیر تعریف گردید:

$$\min Z_2 = \sum_{j=1}^{N_n} [\max(0, 20 - P_j) + \max(0, P_j - 60)] \quad (15)$$

که در آن فشارهای کمتر از ۲۰ متر و بیشتر از ۶۰ متر موجب افزایش مقدار تابع هدف می‌شوند.

جدول ۴- مشخصات لوله‌های منطقه غربی شهرستان پلدختر

ردیف	جنس لوله	قطر لوله (میلی‌متر)	طول لوله (متر)
۱	پلی اتیلن	۷۵	۱۳۷۵۰
۲	پلی اتیلن	۹۰	۸۲۳۹
۳	پلی اتیلن	۱۱۰	۶۷۰۰
۴	پلی اتیلن	۱۶۰	۲۷۱۱

همچنین در مطالعه موردی شبکه پلدختر، مسئله به صورت یک مدل سه‌هدفه تعریف شد. متغیرهای تصمیم شامل ضرایب تنظیم ساعتی دو شیر فشارشکن طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز و قطر پنج لوله منتخب شبکه بودند. تابع هدف اول شامل حداقل‌سازی مجموع تخطی فشار و سرعت از حدود مجاز بهره‌برداری بود:

(۱۶)

$$\min Z_1 = \sum \max(0, 20 - P) + \sum \max(0, P - 30) + \sum \max(0, 0.3 - V) + \sum \max(0, V - 3)$$

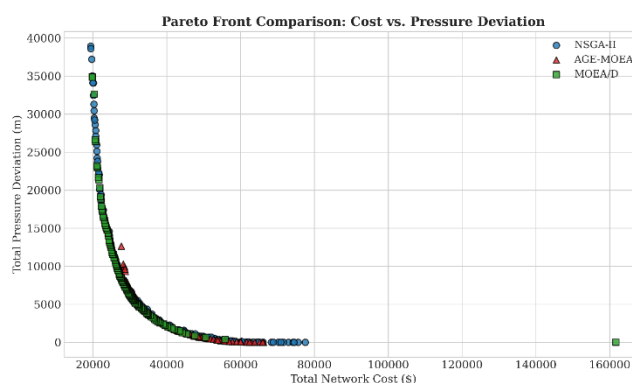
که در آن فشار مجاز بین ۲۰ تا ۳۰ متر و سرعت مجاز بین ۰.۳ تا ۳ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. تابع هدف دوم به منظور کاهش فشارهای اضافی شبکه به صورت زیر تعریف شد:

$$\min Z_2 = \sum \max(0, P - 20) \quad (17)$$

بدین ترتیب، الگوریتم‌های بهینه‌سازی با ایجاد تعادل میان اهداف اقتصادی و هیدرولیکی، مجموعه‌ای از راه‌حل‌های غیرمغلوب را تولید کردند که جبهه پارتوی مسئله را تشکیل می‌دهد.

به‌منظور حصول اطمینان از پایداری نتایج و کاهش اثرات ناشی از ماهیت تصادفی الگوریتم‌های تکاملی، تمامی الگوریتم‌ها با اندازه جمعیت ۲۰۰ و حداکثر ۱۰۰۰ نسل اجرا شدند. همچنین هر الگوریتم طی ۳۰ اجرای مستقل با بذره‌ای

اندازه جمعیت	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
تعداد نسل‌ها	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
تعداد اجراهای مستقل	۳۰	۳۰	۳۰
معیار توقف	۱۰۰۰ نسل	۱۰۰۰ نسل	۱۰۰۰ نسل
بذرهای تصادفی	۱ تا ۳۰	۱ تا ۳۰	۱ تا ۳۰
نرخ تقاطع	۰/۹	۰/۹	۰/۹
نرخ جهش	۱/ n	۱/ n	۱/ n
نوع عملگر تقاطع	SBX ($\eta_c=20$)	SBX ($\eta_c=20$)	SBX ($\eta_c=20$)
نوع عملگر جهش	PM ($\eta_m=20$)	PM ($\eta_m=20$)	PM ($\eta_m=20$)
بودجه محاسباتی کل	۲۰۰,۰۰۰	۲۰۰,۰۰۰	۲۰۰,۰۰۰
تعداد همسایه	۱۵	-	-
احتمال جفت‌گیری همسایگی	۰/۷	-	-



شکل ۲- مقایسه جبهه‌های پارتو به دست آمده از الگوریتم‌های مختلف برای شبکه توزیع آب هانوی

پیش‌تر در تحلیل جبهه پارتو اشاره شد، با وجود برتری نسبی AGE-MOEA در شاخص‌های کلی، تنها الگوریتم NSGA-II قادر به عبور از محدودیت‌های سخت‌گیرانه فشار و یافتن جواب کاملاً موجه بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که NSGA-II در جستجوی محلی در نواحی مرزی و یافتن جواب‌های اکسترمم مقید، عملکرد کارآمدتری برای این شبکه خاص داشته است.

جدول ۶- ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها بر اساس شاخص‌های کمی در شبکه هانوی

Algorithm	HV	IGD
NSGA-II	۴/۶	۲/۲۹
MOEA-D	۳/۶	۳/۷۵
AGE-MOEA	۴/۷	۱/۸۷

بهترین طراحی موجه یافت‌شده توسط الگوریتم NSGA-II در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به توزیع

برای مقایسه دقیق‌تر و کمی کیفیت جبهه‌های پارتوی به دست آمده توسط سه الگوریتم، از دو شاخص استاندارد آبر حجم^۱ و فاصله نسلی معکوس^۲ استفاده شده است. نتایج آن‌ها در جدول (۶) نشان داده شده است. شاخص HV توانایی الگوریتم در دستیابی همزمان به همگرایی و تنوع جواب‌ها را ارزیابی می‌کند، در حالی که شاخص IGD میزان فاصله جبهه پارتوی حاصل از جبهه مرجع را اندازه‌گیری می‌نماید. مقادیر بیشتر HV و مقادیر کمتر IGD بیانگر عملکرد بهتر الگوریتم هستند.

هرچند شاخص‌های HV و IGD نشان می‌دهند که الگوریتم AGE-MOEA در ایجاد تنوع و همگرایی در سراسر جبهه پارتو (پوشش کلی فضای هدف) عملکرد نسبتاً بهتری داشته است، اما باید توجه داشت که در شبکه‌های توزیع آب مانند هانوی، یافتن حداقل یک جواب کاملاً موجه (با انحراف فشار صفر) از اهمیت حیاتی برخوردار است. همان‌طور که

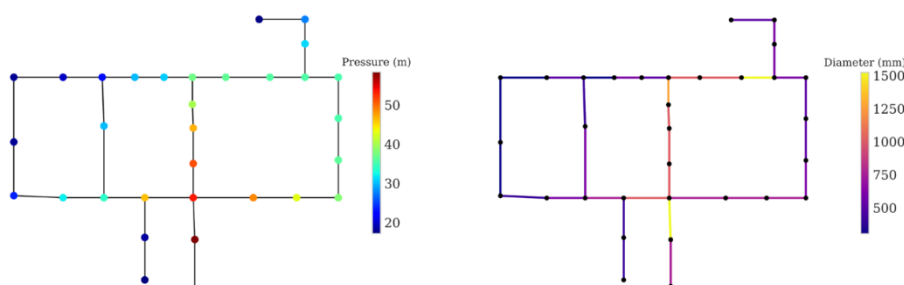
² Inverted Generational Distance

¹ Hypervolume

نشان می‌دهد که طراحی انجام شده یک طراحی کاملاً موجه است؛ زیرا در بحرانی‌ترین گره‌ها در انتهای مسیر، فشار آب همچنان در محدوده مجاز بالای ۲۰ متر قرار دارد. تخصیص بهینه قطرها سبب شده تا ضمن کاهش چشمگیر هزینه‌ها، انرژی هیدرولیکی در سراسر شبکه به نحوی توزیع شود که هیچ گرهی دچار افت فشار غیرمجاز نگردد.

قطرلوله‌ها (۳-الف)، مشخص است که الگوریتم بهینه‌ساز به صورت هوشمندانه‌ای قطرهای بزرگتر را به لوله‌های اصلی که بار انتقال حجم زیادی از آب را بر عهده دارند اختصاص داده است تا از افت فشار در مسیرهای اصلی جلوگیری کند. در مقابل، برای شاخه‌های فرعی و انتهایی شبکه که دبی کمتری از آن‌ها عبور می‌کند، از لوله‌هایی با قطرهای بسیار کوچکتر استفاده شده است تا هزینه اجرای شبکه کمترین گردد. همچنین توزیع فشار هیدرولیکی در گره‌های شبکه (۳-ب)

الف) Network Pipe Diameters (Best Feasible Solution) ب) Network Pressure Distribution (Best Feasible Solution)



شکل ۳- تحلیل فیزیکی بهترین جواب شبکه هانوی؛ الف) توزیع قطر لوله‌ها در سراسر شبکه؛ ب) توزیع فشار هیدرولیکی در گره‌های شبکه شبکه بالرما توانایی بیشتر در حفظ تنوع جواب‌ها، کارایی و پایداری بالاتری ارائه می‌کنند.

جدول ۷- ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها بر اساس شاخص‌های کمی

در شبکه بالرما

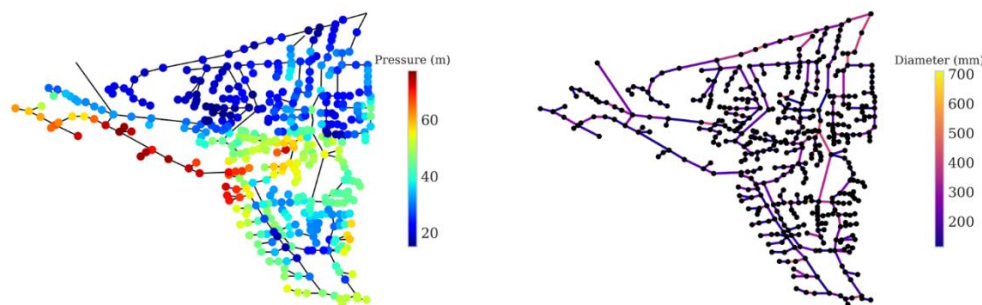
Algorithm	HV	IGD
NSGA-II	۰/۸۲	۰/۰۲۴
MOEA-D	۰/۶۱	۰/۰۴۱
AGE-MOEA	۰/۸۵	۰/۰۱۹

بهترین طرح بهینه در شکل (۴) ارائه شده است. مطابق شکل (۴-الف)، الگوریتم برای کاهش هزینه‌ها، حداقل قطر را به اغلب لوله‌ها، به‌ویژه شاخه‌های فرعی، اختصاص داده و تنها در خطوط انتقال اصلی از قطرهای بزرگ‌تر برای تأمین فشار و کاهش افت اصطکاک استفاده کرده است. توزیع فشار شبکه نیز نشان می‌دهد که تمامی گره‌ها ضمن رعایت حداقل فشار مجاز، در نزدیک‌ترین سطح ممکن به این حد قرار دارند (شکل ۴-ب). این نتایج بیانگر آن است که الگوریتم با کاهش فشار مازاد، ضمن تأمین قیود هیدرولیکی، از به‌کارگیری غیرضروری لوله‌های با قطر بزرگ و پرهزینه جلوگیری کرده است.

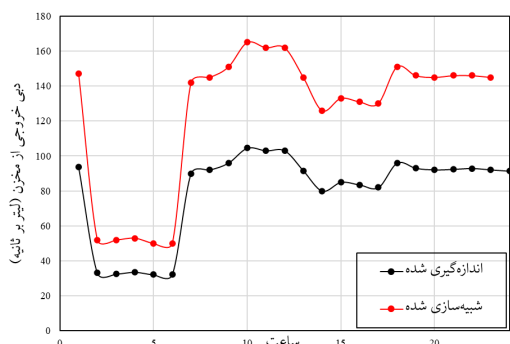
شبکه بالرما به دلیل ابعاد بزرگ (۴۵۴ لوله و ۴۴۳ گره) و فضای جستجوی بسیار وسیع، یکی از مسائل پنج‌مارک پیچیده در بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب است. در این پژوهش، هدف، تعیین قطر بهینه لوله‌ها با کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی شاخص تاب‌آوری شبکه است. جدول (۷) عملکرد سه الگوریتم را بر اساس شاخص‌های آماری و معیارهای کیفیت جبهه پارتو مقایسه می‌کند.

نتایج نشان داد AGE-MOEA با کسب بیشترین مقدار HV (۰/۸۵) و کمترین مقدار IGD (۰/۰۱۹)، بهترین تعادل را میان همگرایی و تنوع جواب‌ها ایجاد کرده است. NSGA-II نیز عملکردی نزدیک و پایدار داشته و همچنان گزینه‌ای قابل‌اعتماد برای این شبکه محسوب می‌شود، در حالی که MOEA/D به دلیل کاهش تنوع جواب‌ها، ضعیف‌ترین عملکرد را در شبکه بزرگ و پیچیده بالرما نشان داد. این یافته‌ها در مقایسه با نتایج Yazdi (2015) بیانگر آن است که اگرچه الگوریتم‌های مبتنی بر تجزیه مانند MOEA/D در شبکه‌های کوچک‌تر (مانند هانوی) عملکرد رقابتی دارند، اما با افزایش ابعاد و پیچیدگی مسئله، AGE-MOEA و NSGA-II به دلیل

الف) Network Pipe Diameters (Best Feasible Solution) ب) Network Pressure Distribution (Best Feasible Solution)



شکل ۴- تحلیل فیزیکی بهترین جواب شبکه بالرما؛ الف) پیکربندی و توزیع قطر لوله‌ها در سراسر شبکه؛ ب) توزیع فشار هیدرولیکی در گره‌های شبکه



شکل ۵- نمودار دبی خروجی از مخزن و شبیه‌سازی شده

این موضوع ضرورت ایجاد اتصالات تقویتی و تکمیل حلقه‌های شبکه را برای بهبود توزیع فشار و عملکرد هیدرولیکی نشان می‌دهد.

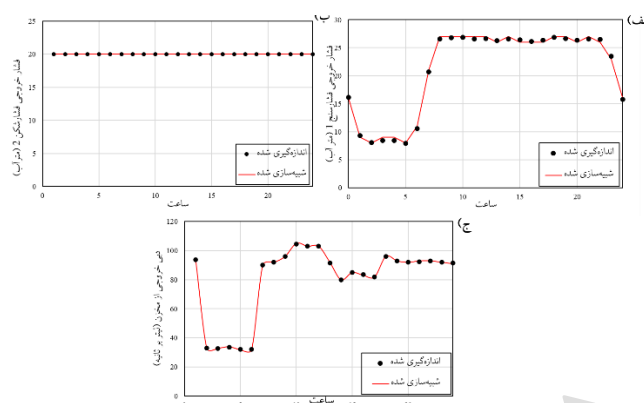
پس از ارزیابی عملکرد شبکه در شرایط پایدار، تحلیل شبیه‌سازی توسعه‌یافته (EPS) با در نظر گرفتن تغییرات مصرف شبانه‌روزی انجام شد. نتایج فشار شبکه با اعمال تنظیمات شیرهای فشارشکن و خروجی مخزن در شکل (۸) ارائه شده است. در ساعات کم‌مصرف (۲ تا ۴)، حدود ۶۰/۶۸ درصد از گره‌ها دارای فشار ۱/۵ تا ۲ بار و ۳۰/۵۸ درصد دارای فشار ۲ تا ۲/۵ بار هستند که این وضعیت عمدتاً ناشی از تنظیم نامناسب الگوی عملکرد شیرهای فشارشکن است. در مقابل، در ساعات اوج مصرف، ۹۰/۳ درصد از گره‌ها فشاری بیش از ۳ بار و ۵۶/۸ درصد فشاری بیش از ۳/۵ بار دارند که بیانگر وجود فشار مازاد در شبکه و احتمال افزایش نشت و وقوع شکستگی در شبکه توزیع آب زون غربی پلدختر است.

کالیبراسیون مدل هیدرولیکی شبکه پلدختر

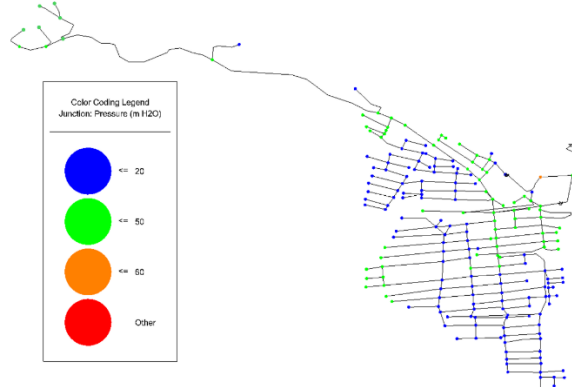
پس از توسعه مدل هیدرولیکی، به منظور ارزیابی صحت شبیه‌سازی، دبی خروجی مخزن و شیرهای فشارشکن با داده‌های میدانی مقایسه شد (شکل ۵). اختلاف اولیه بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده ناشی از عواملی مانند نشت شبکه، خطای کالیبراسیون دبی‌سنج‌ها و عدم تطابق ضرایب زبری لوله‌ها بود. با اصلاح ضرایب زبری و در نظر گرفتن نشت پس‌زمینه به صورت تقاضای اضافی در گره‌ها، تطابق مناسبی بین مدل و داده‌های میدانی حاصل شد. با این حال، به دلیل نبود داده‌های فشار در گره‌های مختلف، کالیبراسیون کامل توزیع فشار امکان‌پذیر نبود و این موضوع به عنوان یکی از محدودیت‌های پژوهش در نظر گرفته شد.

پس از بهینه‌سازی پارامترهای نشت و دبی، کالیبراسیون ضرایب زبری لوله‌ها نیز انجام شد. شکل (۶) نتایج کالیبراسیون دبی خروجی مخزن و فشار ثبت شده توسط فشارسنج‌های آنالین (۱) و (۲) را نشان می‌دهد. همخوانی مناسب بین داده‌های میدانی و نتایج شبیه‌سازی، بیانگر دقت مطلوب مدل کالیبره شده در بازتولید رفتار هیدرولیکی شبکه و عملکرد شیرهای فشارشکن است.

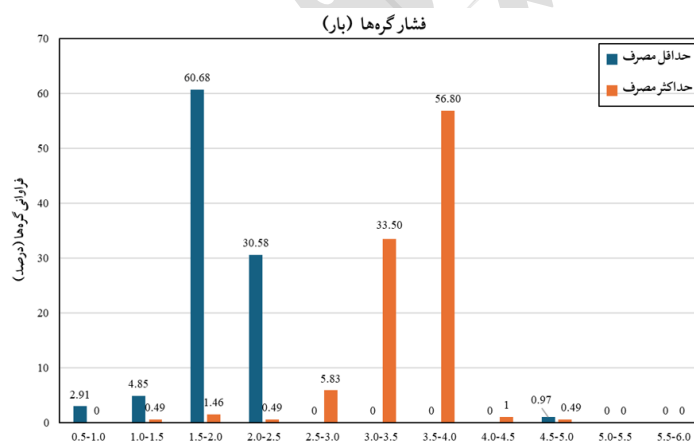
شکل (۷) وضعیت فشار شبکه در یک سناریوی ساعتی را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که بخش قابل توجهی از شبکه با فشار پایین مواجه است که عمدتاً ناشی از ساختار غیرحلقوی و نبود پیوستگی هیدرولیکی مناسب میان خطوط اصلی است.



شکل ۶- نتایج کالیبره مقادیر دبی و فشار اندازه گیری شده و شبیه سازی



شکل ۷- فشار در نقاط مختلف شبکه توزیع آب در سناریو ساعتی



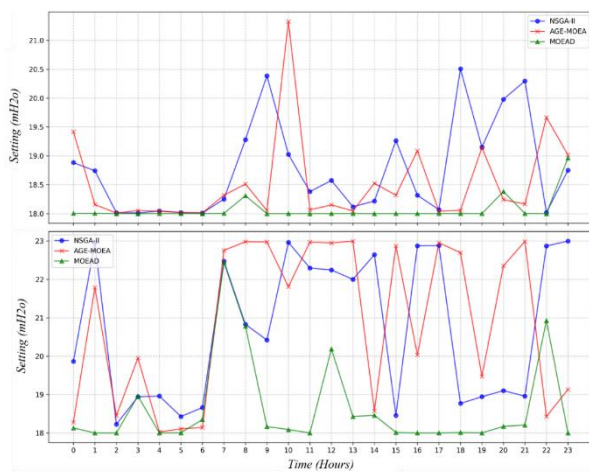
شکل ۸- نمودار فراوانی فشار گرہها در شبکه در ساعات حداقل و حداکثر

مقایسه و ارزیابی نهایی الگوریتم های بهینه سازی

به منظور انتخاب مناسب ترین روش مدیریت فشار شبکه، عملکرد الگوریتم های NSGA-II، AGE-MOEA و MOEA/D از نظر کیفیت جبهه پارتو و قابلیت اجرای عملی راهکارها مقایسه شد. همان گونه که در شکل (۹) مشاهده می شود، AGE-MOEA در بخش عمده ای از فضای هدف، عملکردی برتر از NSGA-II داشته است؛ به طوری که در بازه جریمه کل (Z_1) بین ۵۷۵۰ تا ۶۰۰۰، جبهه پارتو آن در

موقعیتی غالب قرار گرفته و برای مقادیر مشابه جریمه هیدرولیکی، فشار مازاد (Z_2) کمتری ایجاد کرده است. هر دو الگوریتم NSGA-II و AGE-MOEA با ایجاد جبهه پارتویی گسترده، مجموعه متنوعی از راه حل ها را از کمینه جریمه هیدرولیکی (Z_1) تا کمینه فشار مازاد (Z_2) در اختیار تصمیم گیرنده قرار می دهند. در مقابل، MOEA/D اگرچه در ناحیه ای با جریمه های بالاتر و فشار مازاد کمتر همگرایی مناسبی دارد، اما به دلیل کاهش قابل توجه تنوع، تنها

که می‌تواند موجب افزایش استهلاک شیرهای فشارشکن و ناپایداری فشار شبکه شود. در مقابل، MOEA/D با وجود عملکرد ضعیف‌تر در کیفیت جبهه پارتو، الگوی تنظیمی یکنواخت‌تر و عملیاتی‌تری ارائه می‌دهد؛ به گونه‌ای که تغییرات فشار محدود و تدریجی بوده و از دیدگاه بهره‌برداری، فشار کمتری به تجهیزات و اپراتورهای شبکه وارد می‌کند. ضعیف‌تری نسبت به دو الگوریتم دیگر نشان داده است. بنابراین، برتری MOEA/D در شاخص HV با ضعف آن در پوشش کامل جبهه پارتو (شکل ۹) منافاتی ندارد، زیرا HV تجمعی بیانگر حجم فضای کاوش شده در کل فرآیند همگرایی است، نه گستردگی جبهه پارتوی نهایی.

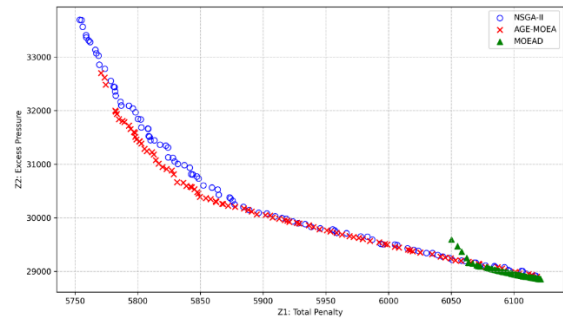


شکل ۱۰- مقایسه الگوهای ساعتی تنظیم شیرهای فشارشکن

شکل (۱۳) تأثیر بهینه‌سازی بر توزیع فشار شبکه را نشان می‌دهد. در شبکه پایه، بخش قابل‌توجهی از گره‌ها دارای فشارهای نسبتاً بالا هستند که می‌تواند موجب افزایش نشت و استهلاک تجهیزات شود. پس از اعمال تنظیمات بهینه شیرهای فشارشکن، فشار شبکه به صورت یکنواخت کاهش یافته و توزیع مناسب‌تری پیدا کرده است. این مقایسه، اثربخشی فرآیند بهینه‌سازی را در کاهش فشار مازاد و بهبود عملکرد عملیاتی شبکه به خوبی نشان می‌دهد.

بخشی از جبهه پارتو را پوشش داده و در مقایسه با دو الگوریتم دیگر عملکرد ضعیف‌تری در مسائل چندهدفه نشان می‌دهد.

مقایسه الگوهای تنظیم ساعتی شیرهای فشارشکن (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که اگرچه NSGA-II و AGE-MOEA جبهه‌های پارتوی با کیفیتی تولید کرده‌اند، اما تنظیمات ساعتی آن‌ها نوسانات و تغییرات ناگهانی زیادی دارد



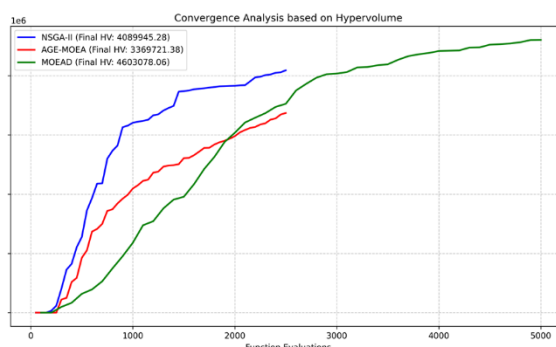
شکل ۹- مقایسه جبهه‌های پارتو به دست آمده از الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه

شکل (۱۱) تغییرات شاخص ابر حجم (HV) را بر حسب تعداد ارزیابی توابع هدف برای الگوریتم‌های NSGA-II، MOEA/D و AGE-MOEA نشان می‌دهد. NSGA-II در مراحل اولیه همگرایی سریع‌تری داشته، اما در ادامه روند بهبود آن متوقف شده است. در مقابل، MOEA/D با وجود همگرایی اولیه کندتر، در نهایت به بیشترین مقدار HV دست یافته که بیانگر کاوش عمیق‌تر فضای جستجو است، هرچند این امر با تمرکز بر بخشی از جبهه پارتو و کاهش پوشش کلی آن همراه بوده است. AGE-MOEA نیز در این شاخص عملکرد

شکل (۱۲) جبهه‌های پارتوی حاصل از الگوریتم‌های مختلف را در فضای دوهدفه شامل جریمه کل (Z_1) و فشار مازاد (Z_2) نشان می‌دهد. نتایج بیانگر رابطه متضاد این دو تابع هدف است؛ به طوری که کاهش Z_1 با افزایش Z_2 و بالعکس همراه است. نقاط غیرمغلوب، گزینه‌های مختلف مصالحه میان این دو هدف را در اختیار تصمیم‌گیرنده قرار می‌دهند. برای انتخاب راهکار نهایی، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره با وزن‌دهی مساوی (۰.۵ و ۰.۵) پس از نرمال‌سازی توابع هدف استفاده شد و راه‌حلی انتخاب گردید که بهترین تعادل را میان تأمین فشار استاندارد و کنترل فشار مازاد برقرار می‌کند.

رابطه فشار-نشت، این امر بیانگر پتانسیل کاهش نشت از طریق مدیریت فشار است؛ با این حال، به دلیل اندازه‌گیری یا مدل‌سازی نشدن مستقیم نشت در این پژوهش، امکان ارائه برآورد کمی از میزان کاهش نشت وجود نداشت.

• نتایج نشان داد انتخاب الگوریتم بهینه به ماهیت مسئله و اولویت تصمیم‌گیرنده وابسته است؛ به‌طوری که برای مسائل طراحی با قیود سخت (مانند هانوی)، AGE-MOEA برای مسائل بزرگ‌مقیاس طراحی (مانند بالراما) و MOEA/D برای مسائل بهره‌برداری با ملاحظات اجرایی (مانند پلدختر)، به دلیل ارائه الگوهای عملی‌تر برای تنظیم شیرهای فشارشکن، مناسب‌تر هستند.

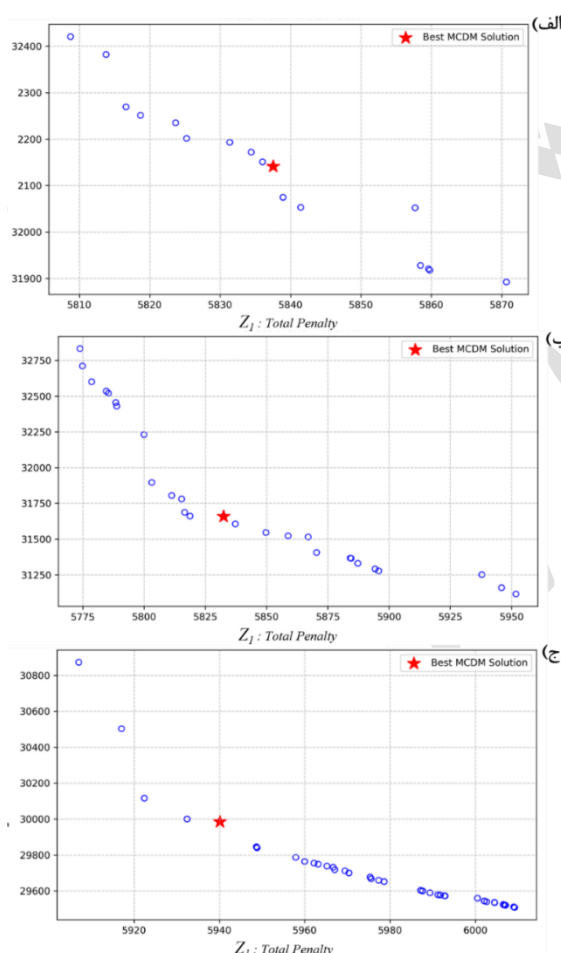


شکل ۱۱- تحلیل روند همگرایی الگوریتم‌ها بر اساس شاخص ابرحجم

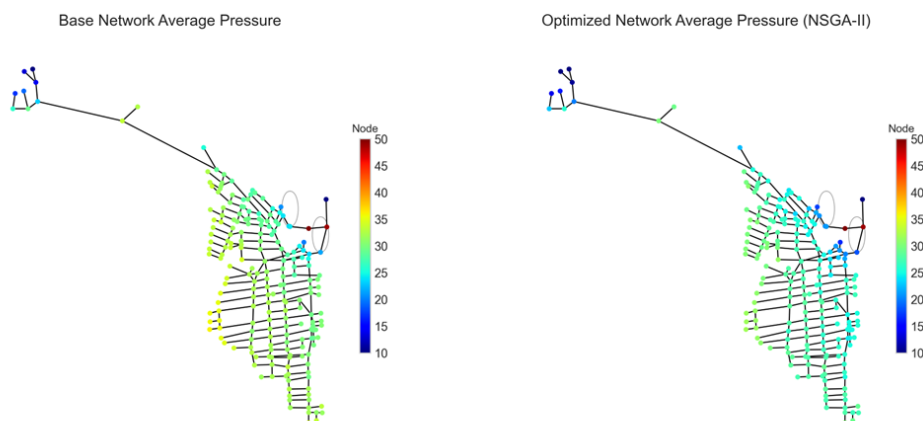
نتیجه‌گیری

طراحی و بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع آب مستلزم ایجاد تعادل میان تأمین فشار استاندارد، کاهش هزینه‌ها و کنترل هدررفت آب است. در این پژوهش، یک چارچوب جامع دو مرحله‌ای برای بهبود عملکرد هیدرولیکی و اقتصادی شبکه توزیع آب زون غربی شهرستان پلدختر توسعه یافت. مهم‌ترین یافته‌های حاصل از به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی به شرح زیر ارائه می‌شود:

- تحلیل جبهه‌های پارتو نشان داد که میان کاهش هزینه‌های احداث و بهبود عملکرد هیدرولیکی شبکه، یک رابطه مبادله‌ای وجود دارد؛ به‌گونه‌ای که دستیابی به فشار مازاد کمتر و کاهش تخطی‌های هیدرولیکی، مستلزم صرف هزینه بیشتر برای انتخاب پیکربندی بهینه‌تر است.
- نتایج نشان داد تفاوت عملکرد الگوریتم‌ها به سازوکار جستجوی آن‌ها وابسته است؛ به‌طوری که AGE-MOEA به دلیل حفظ بهتر تنوع جواب‌ها و تقریب هندسی جبهه پارتو، بهترین کیفیت جبهه را ارائه داد، NSGA-II با بهره‌گیری از مرتب‌سازی غیرمغلوب و فاصله ازدحام، عملکردی پایدار و قابل اعتماد داشت و MOEA/D به دلیل محدودیت رویکرد تجزیه‌ای در مسائل با توابع هدف پیچیده و فضای جستجوی بزرگ، در برخی شبکه‌ها عملکرد ضعیف‌تری نشان داد.
- نتایج بهینه‌سازی نشان داد که تنظیم بهینه شیرهای فشارشکن و انتخاب مناسب قطر لوله‌ها، فشارهای مازاد شبکه را کاهش می‌دهد. با توجه به



شکل ۱۲- تحلیل جبهه‌های پارتو و انتخاب جواب مصالحه‌آمیز: الف) AGE-MOEA، ب) NSGA-II، ج) MOEA/D



شکل ۱۳- وضعیت هیدرولیکی شبکه پس از اعمال بهینه‌سازی

- city, Ilam province), *Iranian Water Research Journal*, 18(4), pp. 1-8. [In Persian]. doi: 10.22034/iwrj.2024.14845.2623
- 2- Adedeji, K. B., Hamam, Y., Abe, B., and Abu-Mahfouz, A. M. 2017. Leakage detection algorithm integrating water distribution networks hydraulic model. In *SimHydro 2017: Choosing the right model in applied hydraulics* (pp. 1–9). Sophia Antipolis.
 - 3- goharimoghadam S., qaderi K., Rahimpour M., ahmadi M., 2023. Fuzzy Analysis of Pressure-Deficient Water Distribution Networks, *Iranian Water Research Journal*, 17(2), e11455. [In Persian]. doi: 10.22034/iwrj.2023.13998.2435
 - 4- Armadodi Nardo, D., Di Natale, M., Santonastaso, G. F., and Creaco, E. 2018. Calibration of water distribution network models for leakage assessment using pressure and flow measurements. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(9), 04018054.
 - 5- Azadfar, M. S., Barani, G. A., and Hesami Kermani, M. R. 2019. Optimization of leakage in urban water distribution network by pressure management using multi-objective genetic algorithm. *2nd International Conference on Civil Engineering, Structures and Earthquakes*, Tehran. [In Persian].
 - 6- Bergant, A., 2001. Water leakage and pressure management in distribution networks. *Urban Water*, 3(2), 109–114.
 - 7- Boostani, A. and Khodashenas, S. R. 2015. Studying a leakage detection method in pressurized water networks based on the pressure-leakage relation (Presentation of Optimization Code for Locating Leakage).

تقدیر و تشکر

نویسندگان از سازمان آب و فاضلاب لرستان به خاطر در اختیار قرار دادن داده تشکر می‌نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منفعی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

اطلاعات مربوط به شبکه توزیع آب شهرستان پلدختر از شرکت آب و فاضلاب استان لرستان دریافت شد.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

نویسنده اول: جمع‌آوری داده‌های شبکه پلدختر، پیاده‌سازی الگوریتم‌های فرا ابتکاری، اجرای شبیه‌سازی‌ها، تحلیل فشار و هزینه، نگارش مقاله

نویسنده دوم: راهنمایی، دریافت اطلاعات از آب و فاضلاب استان لرستان، کنترل نتایج، ویرایش و بازبینی متن مقاله، پاسخ به پرسش‌های داوران.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آن‌ها می‌باشد.

منابع

- 1- Fatahi H., Mamizadeh J., Baqi A., Abdullahi H. 2024. Field measurement and hydraulic simulation of drinking water transmission lines and distribution network (case study: Chavar

3657. [In Persian].
<https://doi.org/10.22060/ceej.2022.19743.7250>
- 16- Maziotis, A., Molinos-Senante, M., and Sala-Garrido, R., 2021. Assessing the impact of leakage reduction on the performance of water utilities. *Water Resources Management*, 35(2), 637–652.
- 17- Pei, S., Hoang, L., Fu, G., and Butler, D., 2024. Real-time multi-objective optimization of pump scheduling in water distribution networks using neuro-evolution. *Journal of Water Process Engineering*, 68, 106315. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106315>
- 18- Du, K., Yang, S., Xu, W., Zheng, F., and Duan, H., 2025. A novel optimization framework for efficiently identifying high-quality Pareto-optimal solutions: maximizing resilience of water distribution systems under cost constraints. *Reliability Engineering & System Safety*, 261, 111136. <https://doi.org/10.1016/j.res.2025.111136>
- 19- Morris Jr., R. E., 1967. Principal causes and remedies of water main breaks. *Journal American Water Work Association*, 59(7), 782–798.
- 20- Todini, E., 2003. A more realistic approach to the extended period simulation of water distribution networks. *Advances in Water Resources*, 26(8), 785–800.
- 21- Vitkovsky, J. P., Simpson, A. R., and Lambert, F. M. 2000. Leak detection & calibration using transients & genetic algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 126(4), 262–265. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2000\)126:4\(262\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2000)126:4(262))
- 22- Vugelin, R., Stephenson, D., and Van Zyl, J. E., 2009. Pressure management for leakage reduction in water distribution systems: Field study results. *Water Science and Technology: Water Supply*, 9(5), 547–554.
- 23- Yazdi, J., 2015. Multi-objective Optimization Strategies based on Decomposition for the Design of Water Distribution Systems, *Journal of Hydraulics*, 10(3), pp. 27-40. doi: 10.30482/jhyd.2016.14863
- 24- Zhang, Q., and Li, H., 2007. MOEA/D: A multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 11(6), 712–731. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2007.892759>
- Journal of Water and Sustainable Development*, 2(1), 59-66. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v2i1.39106>
- 8- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., and Meyarivan, T. 2000. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA2. *KanGAL Report*, 200001. https://doi.org/10.1007/3-540-45356-3_83
- 9- Klise, K. A., Murray, R., & Haxton, T. 2018. An Overview of the Water Network Tool for Resilience (WNTR); Sandia National Lab. SNL-NM); Albuquerque, NM, USA.
- 10- Panichella, A. 2022. An improved Pareto front modeling algorithm for large-scale many-objective optimization. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO), pp. 565–573. <https://doi.org/10.1145/3512290.3528732>
- 11- Deidda, D., Sechi, G. M., and Zucca, R. 2014. Finding economic optimality in leakage reduction: A cost-simulation approach for complex urban supply systems. *Procedia Engineering*, 70, 477–486. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.053>
- 12- Zitzler, E., and Thiele, L., 1998. Multiobjective optimization using evolutionary algorithms — A comparative case study. In Parallel Problem Solving from Nature (PPSN V), Lecture Notes in Computer Science, vol. 1498, pp. 292–301. Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/BFb0056872>
- 13- Coello, C. A. C., and Reyes-Sierra, M., 2004. A study of the parallelization of a coevolutionary multi-objective evolutionary algorithm. In Proceedings of the 3rd Mexican International Conference on Artificial Intelligence (MICA I 2004), Lecture Notes in Artificial Intelligence, vol. 2972, pp. 688–697. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-24694-7_71
- 14- Fujiwara, O., and Khang, D. B., 1990. A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks. *Water Resources Research*, 26(4), 539–549. <https://doi.org/10.1029/WR026i004p00539>
- 15- Hedayati Marzouni, N., Jalili Ghazi Zadeh, M. R., Moslehi, I., and Komili, M., 2022. Intelligent pressure management in water distribution networks to reduce temporal and spatial pressure fluctuations. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(10), 3654–