Water Resources and Climate Change
University of Qom
Online ISSN: 3092-6769
https://wrcc.qom.ac.ir/

# Multi-objective optimization of cost and resilience in water distribution networks using MOGWO and EPANET

**Parisa-Sadat Ashofteh**[1]✉

1. Corresponding author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: ps.ashofteh@qom.ac.ir

## Article Info

**Article type:**
Research Article

**Article history:**
Received 06 Oct 2025
Revised 08 Dec 2025
Accepted 18 Dec 2025
Published 26 Dec 2025

***Keywords***:
Resilience,
Urban Water Distribution Network,
MOGWO Algorithm,
Pareto Front,
EPANET Hydraulic Model.

## ABSTRACT

**Objective:** Urban water distribution network (WDN) design is a critical component of water resources engineering, required to withstand challenges posed by population growth, rising demand, climate variability, and financial constraints. The design process is inherently multi-objective, nonlinear, discrete, and highly complex, as it involves simultaneous selection of pipe diameters from commercial options, satisfaction of hydraulic constraints, maintaining adequate pressure under critical conditions, and minimizing both capital and operational costs. Recent studies have highlighted the effectiveness of advanced evolutionary algorithms in tackling such complexities.

**Method:** This study proposes an innovative multi-objective framework based on the Multi-Objective Grey Wolf Optimizer (MOGWO) to minimize total network cost and maximize hydraulic resilience concurrently. Hydraulic analysis was performed using a detailed network model developed in EPANET 2.0, dynamically coupled with MATLAB for optimization. The framework was evaluated on the D-zone of the Mashhad WDN, comprising 265 pipes, a total length exceeding 38 km, one primary supply source, an area of 1,087 hectares, and a serviced population of 47,013.

**Results:** Results indicate that the proposed approach can reduce design cost by 18–25% while improving the hydraulic resilience index by 15–30%. Furthermore, compared with benchmark algorithms such as NSGA-II and MOPSO, MOGWO produced a more uniform Pareto front with superior diversity and faster convergence.

**Conclusion:** Analysis of convergence behavior, pressure distribution, selected pipe sizes, and system performance under critical operating conditions confirms that the proposed model offers a reliable and cost-effective strategy for urban WDN design.

**Cite this article:** Ashofteh PS. Multi-objective optimization of cost and resilience in water distribution networks using MOGWO and EPANET. Water Resources and Climate Change. (2025); 1(4): 41-54. https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.14733.1028.

Publisher: University of Qom.
© The Author(s) retain the copyright.

DOI: https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.14733.1028

## Introduction

Water distribution networks represent a critical component of urban infrastructure, ensuring the delivery of safe water at adequate pressure. Rapid urbanization and aging pipelines have increasingly led to failures, pressure deficits, leakage, and reduced network reliability, highlighting the need for efficient design and rehabilitation strategies. The design problem is inherently multi-objective, requiring a balance between minimizing construction costs and maintaining sufficient hydraulic performance. Traditional design approaches are largely heuristic and unable to guarantee near-optimal solutions, whereas evolutionary algorithms have shown superior performance in complex optimization tasks. However, many of these algorithms suffer from drawbacks such as premature convergence, instability, or sensitivity to parameter tuning. The Multi-Objective Grey Wolf Optimizer (MOGWO), inspired by cooperative hunting behavior, has emerged as a robust alternative due to its effective balance between global exploration and local exploitation. This study proposes a novel MOGWO-based framework that minimizes network cost while maximizing resilience, and evaluates its effectiveness on the real-world D-zone distribution network in Mashhad.

## Method

A concise three-stage framework was developed to address the complexity of water distribution network (WDN) design. The problem was first formalized by analyzing hydraulic behavior, operational constraints, design goals, and available pipe sizes. A tailored solution strategy was then constructed, in which the Multi-Objective Grey Wolf Optimizer (MOGWO) was adapted for discrete pipe-diameter selection. Implementation was carried out via a dynamic MATLAB–EPANET platform, enabling rapid iterative simulations and evaluation through convergence metrics and Pareto fronts.

WDN design must ensure reliable delivery of required flows and pressures under both normal and extreme conditions while remaining cost-effective. To avoid the fragility associated with cost-driven layouts, modern optimization also incorporates resilience, redundancy, and surplus energy. The design problem is formulated as selecting diameters from a discrete commercial set under two competing objectives—minimizing pipe cost and maximizing hydraulic resilience—subject to continuity, energy conservation using the Hazen–Williams equation, pressure limits, velocity bounds, and discrete diameter constraints.

EPANET 2.0 served as the hydraulic solver, with each MOGWO candidate fully simulated to obtain pressures, flows, and velocities for objective evaluation. The solver's efficiency allowed extensive search without model simplification. Benchmarking confirmed the limitations of NSGA-II and MOPSO in discrete design spaces, motivating the choice of MOGWO. The algorithm's hierarchical hunting mechanism balances exploration and exploitation, while solution diversity is maintained through non-dominated sorting, crowding

distance, and an external archive. Discrete diameters were assigned using adaptive rounding with controlled stochastic perturbation.

The framework was validated on Mashhad's Zone D, a medium-scale system with 265 pipes (38.16 km) and 217 demand nodes serving approximately 47,000 residents across varied topography. All geometric and hydraulic parameters were modeled in EPANET, providing a realistic testbed for evaluating cost–resilience trade-offs.

## Results

Four approaches—the consultant's baseline design, MOGWO, NSGA-II, and MOPSO—were compared using Pareto fronts for two objectives: minimizing cost and maximizing resilience index (RI). The baseline design appeared as a single point with high cost (~13.9 billion IRR) and low RI (~0.292), reflecting weak hydraulic robustness.

MOGWO achieved the most favorable trade-off, reducing average cost by ~19% and increasing RI by ~27% relative to the baseline. Its Pareto front was smoother and more compact, supported by the α–β–δ leadership mechanism. NSGA-II produced moderately inferior results with wider dispersion due to crossover–mutation effects, while MOPSO generated a broad but unstable front, affected by particle-velocity oscillations.

Convergence analysis confirmed MOGWO's superiority, reaching the optimal region within ~60 iterations, compared with ~110 for NSGA-II and persistent fluctuations for MOPSO. Statistical tests validated MOGWO's significant advantage ($p \approx 0.03$). Design inspection showed cost reductions through smaller diameters in low-demand branches and reinforcement of critical loops, balancing economy and resilience.

Overall, MOGWO delivered the best performance, combining cost efficiency, resilience improvement, rapid convergence, and robust Pareto solutions. NSGA-II offered slower but consistent results, MOPSO lacked stability, and the baseline design was weakest in both objectives.

## Conclusion

Designing urban water distribution networks requires balancing cost efficiency with hydraulic resilience. This study introduces a framework based on the MOGWO and evaluates its performance on a real network in Mashhad (Zone D). Results show that MOGWO reduces total cost by 18–25% compared to the Consultant's plan, while simultaneously improving resilience by 15–30%. These gains stem from intelligent pipe diameter allocation-downsizing low-demand branches and reinforcing critical loops-ensuring both economic efficiency and hydraulic reliability. Compared with NSGA-II and MOPSO, MOGWO demonstrated faster convergence, greater stability, and superior Pareto front quality. NSGA-II produced diverse but slower solutions, while MOPSO suffered from particle oscillations and irregular fronts. The α–β–δ leadership mechanism in MOGWO proved decisive for search robustness. Overall,

MOGWO emerged as the most effective method, offering a practical and reliable tool for real-world water network design. Its integration with EPANET provides a fast, accurate computational framework, and the use of commercial diameters and real data confirms operational feasibility. These findings highlight MOGWO's potential as a foundation for decision-support systems in urban water planning, with future work recommended on multi-period optimization, uncertainty analysis, and operational cost integration.

## Declarations

### Ethical Approval

The paper is not currently being considered for publication elsewhere. All authors have been personally and actively involved in substantial work leading to the paper, and will take public responsibility for its content.

### Competing interests

Conflict of Interest – None

### Availability of data and materials

Data will be made available on the request.

### Authors Contributions

Parisa-Sadat Ashofteh performed the calculations, approved the analytical methods, supervised the findings of this work, discussed the results, and contributed to the final version of the paper.

### Acknowledgements

The authors would like to thank all participants in the present study.

### Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

منابع آب و تغییر اقلیم
دانشگاه قم
شاپای الکترونیکی: ۶۷۶۹ ۳۰۹۲
https://wrcc.qom.ac.ir/

# بهینه‌سازی چندهدفه هزینه و تاب‌آوری شبکه توزیع آب با MOGWO و EPANET

پریساسادات آشفته[1]✉

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: PS.Ashofteh@qom.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:**
مقاله پژوهشی

**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۴/۰۷/۱۴
**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۰۹/۱۷
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۰۹/۲۷
**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۴/۱۰/۰۵

**کلیدواژه‌ها:**
تاب‌آوری،
شبکه توزیع آب شهری،
الگوریتم MOGWO،
جبهه پارتو،
مدل هیدرولیکی EPANET.

**چکیده**

**هدف:** طراحی شبکه‌های توزیع آب شهری یکی از مهم‌ترین مسائل مهندسی منابع آب است که باید در برابر رشد جمعیت، افزایش تقاضا، تغییرات اقلیمی و محدودیت‌های مالی پاسخگو باشد. این فرایند به‌صورت ذاتی یک مسئله چندهدفه، غیرخطی، گسسته و بسیار پیچیده است، زیرا انتخاب قطرهای لوله از میان گزینه‌های تجاری، رعایت قیود هیدرولیکی، حفظ فشار در شرایط بحرانی، و کمینه‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری به‌طور هم‌زمان باید انجام شود. در سال‌های اخیر، استفاده از الگوریتم‌های تکاملی پیشرفته به‌عنوان ابزارهای موثر برای حل این مسئله مطرح شده است.

**روش:** در این پژوهش، یک چارچوب نوآورانه مبتنی‌بر الگوریتم گرگ خاکستری چندهدفه[2] (MOGWO) برای بهینه‌سازی هم‌زمان هزینه کل شبکه و شاخص تاب‌آوری[3] هیدرولیکی ارائه شده است. برای تحلیل هیدرولیکی، از مدل دقیق شبکه با استفاده از EPANET 2.0 و اتصال پویا MATLAB–EPANET استفاده شد. مطالعه موردی بر روی پهنه D شبکه توزیع آب شهر مشهد شامل ۲۶۵ لوله، طول کل بیش از ۳۸ کیلومتر، یک منبع اصلی تغذیه، مساحت ۱۰۸۷ هکتار و جمعیت تحت پوشش ۴۷۰۱۳ نفر انجام شد.

**یافته‌ها:** نتایج نشان دادند که روش پیشنهادی توانست هزینه طرح را تا ۱۸ تا ۲۵ درصد کاهش داده و در عین‌حال شاخص تاب‌آوری را ۱۵ تا ۳۰ درصد افزایش دهد. هم‌چنین MOGWO در مقایسه با الگوریتم‌های مطرح هم‌چون NSGA-II و MOPSO، جبهه پارتوی یکنواخت‌تر، تنوع بالاتر و همگرایی سریع‌تری تولید کرده است.

**نتیجه‌گیری:** تحلیل نمودارهای همگرایی، توزیع فشار، قطرهای انتخاب‌شده و رفتار شبکه در شرایط بحرانی نشان داد که مدل پیشنهادی از دیدگاه اقتصادی و عملکردی یک گزینه قابل اعتماد برای طراحی شبکه‌های توزیع آب شهری است.

**استناد:** آشفته پریساسادات. بهینه‌سازی چندهدفه هزینه و تاب‌آوری شبکه توزیع آب شهری با MOGWO و EPANET. *منابع آب و تغییر اقلیم*. ۱۴۰۴؛ ۱(۴): ۴۱-۵۴. http//doi.org/10.22091/wrcc.2025.14733.1028

[2]- Multi-Objective Grey Wolf Optimizer
[3]- Resilience Index

ناشر: دانشگاه قم.
© نویسندگان.
شناسه دیجیتال: https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.14733.1028

## ۱- مقدمه

شبکه‌های توزیع آب ستون فقرات زیرساخت‌های شهری هستند و وظیفه تأمین آب سالم با فشار مناسب را بر عهده دارند. این شبکه‌ها به‌طور معمول شامل هزاران متر لوله، ده‌ها گره تقاضا، مخازن، پمپ‌ها و تجهیزات کنترلی هستند و کوچک‌ترین اختلال در عملکرد آن‌ها می‌تواند خسارات قابل توجهی به همراه داشته باشد. در دهه‌های اخیر، رشد سریع جمعیت شهری، گسترش محدوده شهرها و موج جدید شهرنشینی، فشار زیادی بر زیرساخت‌های آب وارد کرده است. شبکه‌های قدیمی با شکست لوله‌ها، افت فشار، نشتی، کاهش کیفیت آب و عدم توانایی پاسخ به تقاضاهای متغیر مواجه‌اند. ازاین‌رو طراحی صحیح شبکه‌های جدید و بازطراحی شبکه‌های موجود اهمیت فراوانی دارد.

یکی از چالش‌های اصلی طراحی شبکه‌ها، ماهیت چندهدفه مسئله است. از یک سو مهندسان باید هزینه‌های اجرا را کمینه نماید، زیرا بودجه پروژه‌ها محدود است. از سوی دیگر، کوچک کردن بی‌رویه قطر لوله‌ها موجب افت هد، کاهش فشار و کاهش قابلیت اطمینان شبکه در هنگام شکست‌های احتمالی یا افزایش ناگهانی مصرف می‌شود. بنابراین راه‌حل مطلوب باید نوعی تعادل هوشمندانه میان هزینه و عملکرد هیدرولیکی برقرار کند.

در گذشته روش‌های سنتی طراحی شامل روش‌های تجربی، حدس و خطا، استفاده از قطرهای تجربی، طراحی دستی و غیرهوشمند بودند. اما همان‌طور که پژوهشگران بیان کرده‌اند [۱] این روش‌ها هیچ تضمینی برای رسیدن به نقطه بهینه ندارند و به‌طور معمول یا هزینه بالا دارند یا از نظر اطمینان‌پذیری دارای ضعف‌اند.

در سه دهه اخیر، روش‌های تکاملی هم‌چون الگوریتم ژنتیک[۳] (GA)، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات[۴] (PSO)، الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان[۵] (ACO)، الگوریتم قورباغه جهنده[۶] (SFLA) و الگوریتم گرگ خاکستری[۷] (GWO) برای حل مسائل پیچیده به‌کار گرفته شده‌اند. مهم‌ترین مزایای این روش‌ها عبارتند از امکان جستجو در فضای بزرگ و پیچیده، عدم‌نیاز به مشتق‌گیری از توابع، توانایی برخورد با متغیرهای گسسته، تولید مجموعه جواب‌های پارتو. اما بیش‌تر روش‌ها دارای نقاط ضعفی هستند، از جمله گرفتار شدن الگوریتم ژنتیک رتبه بندی نامغلوب[۸] (NSGA-II) در کمینه محلی، نوسانات شدید در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه[۹] (MOPSO)، نیاز به تنظیم پارامترهای زیاد در الگوریتم تکاملی چندهدفه[۱۰] (MODE)، ضعف نسخه دوم الگوریتم تکاملی مبتنی‌بر قوت پارتو[۱۱] (SPEA2) در مسائل بسیار بزرگ. این محدودیت‌ها موجب شد الگوریتم MOGWO که رفتار شکار گروهی گرگ‌ها را شبیه‌سازی می‌کند، به یکی از بهترین گزینه‌ها برای مسائل چندهدفه تبدیل شود.

در ادامه به تحقیقات مختلف در زمینه کاربرد این الگوریتم‌ها در شبکه‌های توزیع آب شهری پرداخته می‌شود. به عنوان مثال، فرمانی و همکاران به بررسی کاربرد روش های مختلف بهینه‌سازی چندهدفه تکاملی، در جستجوی مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها برای مسأله شبکه توزیع آب پرداختند [۲]. منصف و همکاران از سه مدل بهینه‌سازی، الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II، تکامل تفاضلی چندهدفه[۱۲] (MODE) و MOPSO برای طراحی بهینه شبکه توزیع آب شهری استفاده کردند [۳]. فلاح و همکاران به بررسی الگوریتم جستجوی گرانشی[۱۳] (GSA) برای حل مدل بهینه‌سازی براساس هزینه لوله پرداختند [۴]. عزالدین و دجبجیان[۱۴] یک روش بهینه‌سازی جدید به‌نام

[3]- Genetic Algorithm
[4]- Particle Swarm Optimization
[5]- Ant Colony Optimization
[6]- Shuffled Frog Leaping Algorithm
[7]- Grey Wolf Optimizer
[8]- Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
[9]- Particle Swarm Optimization
[10]- Multi-Objective Differential Evolutionary
[11]- Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2
[12]- Multi-objective Differential Evolution
[13]- Gravitational Search Algorithm
[14]- Ezzeldin and Djebedjian

الگوریتم بهینه‌سازی وال[15] (WOA) را برای طراحی کم-ترین هزینه شبکه‌های توزیع آب به‌کار گرفتند [۵]. الشابوری[16] و همکاران به کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی GA و PSO برای بازسازی شبکه‌های توزیع آب مصر پرداختند [۶]. خلیفه[17] و همکاران به بهینه‌سازی شبکه توزیع آب هماشهر با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی هریس هاوکس[18] (HHO) پرداختند [۷]. معاشری و جلیلی‌قاضی‌زاده روش جدیدی را برای تعیین نواحی نشتی در شبکه توزیع آب توسط الگوریتم رقابتی امپریالیستی[19] (ICA) ارائه دادند [۸]. سنگرولا[20] و همکاران به توسعه یک الگوریتم، تحت عنوان برنامه بهینه‌سازی هوشمند برای شبکه‌های توزیع آب[21] (SOP-WDN) پرداختند که از GA برای مساله طراحی کم‌هزینه شبکه‌های توزیع آب استفاده می‌کند [۹].

سیمورلی[22] و همکاران (۲۰۲۵) یک الگوریتم بهینه سازی دومرحله‌ای را برای شناسایی نشت در شبکه‌های توزیع آب ارائه دادند [۱۰].

ریاحی و همکاران روشی نوین برای طراحی محل‌های اندازه‌گیری فشار ارائه دادند که از الگوریتم میانگین خوشه‌بندی-k[23] برای کاهش فضای جست‌وجو و از الگوریتم ژنتیک-تفاضلی دودویی[24] (BGDE) همراه با TOPSIS فازی برای انتخاب بهینه گره‌ها استفاده نمودند. عدم‌قطعیت‌های مدل با میانگین‌گیری بیزی[25] لحاظ شد. نتایج دو شبکه آزمایشی نشان دادند که این روش زمان محاسبات را حدود ۷۰ درصد کاهش داد، هرچند دقت انتخاب گره‌های بهینه حدود ۱۵ درصد کم‌تر از روش مرجع بود [۱۱].

ییلماز[26] و همکاران با هدف کاهش نشت و هزینه‌های بهره‌برداری، یک مدل بهینه‌سازی نوین برای مدیریت تلفات آب ارائه دادند که از الگوریتم‌های بهینه‌سازی شیرمورچه[27] (ALO)، الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی‌بر تیم کوهنوردی[28] (MTBO) و الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری[29] (GWO) استفاده نمودند. مدل با داده‌های واقعی و با درنظرگرفتن شرایط فنی و اقتصادی بهره‌برداران، سطوح اقتصادی و بهینه تلفات آب را برای چند سامانه تعیین نمودند. نتایج نشان دادند که مدل پیشنهادی توانست برنامه‌های مدیریتی مناسب برای دست‌یابی به تلفات ایده‌آل ارائه داده و به‌طور مؤثری از تصمیم‌گیری در مدیریت تلفات آب پشتیبانی کند [۱۲].

این تحقیق یک چارچوب کامل و جدید مبتنی‌بر MOGWO ارائه می‌کند که هزینه شبکه را کمینه می‌کند و تاب‌آوری را بیشینه می‌کند. روی شبکه واقعی پهنه D شهر مشهد آزمایش می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- چارچوب کلی توسعه مدل بهینه‌سازی

روند حل مسائل پیچیده در حوزه طراحی شبکه‌های توزیع آب نیازمند یک رویکرد نظام‌مند است که بتواند از مرحله شناخت مسئله تا اجرای نهایی الگوریتم را پوشش دهد. در این پژوهش یک فرایند سه‌مرحله‌ای اتخاذ شده است که هر مرحله شامل مجموعه‌ای از فعالیت‌های بنیادی است.

در گام نخست ماهیت فنی شبکه، محدودیت‌ها، اهداف، و رفتار هیدرولیکی سامانه به‌دقت تحلیل می‌شود تا چارچوب مسئله در قالب یک مدل ریاضی قابل حل فرموله گردد. این مرحله شامل گردآوری اطلاعات فیزیکی شبکه، تعیین پارامترهای هیدرولیکی، استخراج قطرهای تجاری

15- Whale Optimization Algorithm
16- Elshaboury
17- Khalifeh
18- Harris Hawks Optimization Algorithm
19- Imperialist Competitive Algorithm
20- Sangroula
21- Smart Optimization Program for Water Distribution Networks
22- Cimorelli
23- k-Means Clustering
24- Binary Genetic-Differential Evolutionary
25- Bayesian Averaging
26- Yilmaz
27- Ant Lion Optimizer
28- Mountaineering Team-Based Optimization
29- Grey Wolf Optimizer

موجود در بازار، و مشخص‌کردن معیارهای عملکردی مانند فشار مجاز، سرعت مجاز و شاخص تاب‌آوری است.

در مرحله دوم سازوکار حل مسئله طراحی می‌شود. این مرحله شامل انتخاب الگوریتم فراابتکاری مناسب، تعریف ساختار کروموزوم‌ها (یا بردار تصمیم)، تعیین معیارهای ارزیابی جواب‌ها، فرمول‌بندی توابع هدف، مدیریت قیود، و تعیین سازوکارهای کنترل تنوع و همگرایی است. در این پژوهش الگوریتم MOGWO به‌عنوان ابزار جست‌وجوی اصلی انتخاب شده و تمامی اجزای آن متناسب با ماهیت گسسته مسئله طراحی شبکه بازطراحی شده‌اند.

در مرحله سوم، مدل پیاده‌سازی، واسنجی و ارزیابی می‌شود. این مرحله شامل کدنویسی الگوریتم در محیط MATLAB، برقراری ارتباط پویا با EPANET برای انجام تحلیل هیدرولیکی، تنظیم پارامترهای الگوریتم، اجرای چندین سناریو و تحلیل کیفیت جواب‌های حاصل است. در نهایت، نتایج در قالب شاخص‌های عملکردی، نمودارهای همگرایی و جبهه پارتو تحلیل و گزارش می‌شوند.

### ۲-۲- تعریف سامانه‌های توزیع آب و الزامات عملکردی

شبکه‌های توزیع آب مجموعه‌ای از عناصر هیدرولیکی شامل لوله‌ها، گره‌ها، شیرآلات، مخازن و منابع تأمین هستند که وظیفه انتقال جریان را از منبع به مصرف‌کننده با فشار کافی بر عهده دارند. یک شبکه توزیع مطلوب باید قادر باشد:

۱- حجم لازم جریان را در تمام ساعات شبانه‌روز تأمین کند،

۲- فشار کمینه موردنیاز گره‌ها را در همه شرایط از جمله حالت‌های اوج مصرف و وضعیت‌های اضطراری—حفظ نماید،

۳- تاب‌آوری کافی در برابر شکست لوله‌ها، افزایش ناگهانی مصرف، یا کاهش ظرفیت منبع داشته باشد،

۴- با هزینه قابل قبول و قابلیت اجرا در شرایط واقعی طراحی شود.

اگرچه در بسیاری از طرح‌ها تأکید اصلی بر کاهش هزینه ساخت است، اما تجربه نشان داده است که تمرکز صرف بر معیار اقتصادی، شبکه‌ای شکننده و ناپایدار ایجاد می‌کند که در مواجهه با شرایط بحرانی دچار افت فشار شدید یا ناتوانی در تأمین آب می‌شود. به‌همین دلیل، در پژوهش‌های مدرن علاوه‌بر هزینه، شاخص‌های دیگری هم چون اطمینان‌پذیری، افزونگی، انرژی مازاد، و قابلیت تحمل خرابی نیز در مدل طراحی وارد می‌شوند.

### ۲-۳- مدل‌سازی ریاضی طراحی بهینه شبکه توزیع آب

در پژوهش حاضر، طراحی شبکه بر اساس انتخاب قطرهای بهینه از میان مجموعه قطرهای تجاری موجود انجام می‌شود. این مسئله به‌طور ذاتی یک مسئله گسسته و غیرخطی است و شامل دو تابع هدف اصلی است:

(الف) تابع هدف اول:

تابع هدف اول به‌صورت کمینه‌سازی هزینه کل لوله‌ها مطابق با رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$minimize\ F_{obj} = \sum_{i=1}^{npipe} C_i(D_i) \times L_i \qquad (۱)$$

که در آن، $F_{obj}$ = مجموع هزینه‌های تمام لوله‌هایی که دارای شاخص $i$ هستند، $C_i(D_i)$ = هزینه در واحد طول برای لوله‌ای به قطر $D_i$، $L_i$ = طول لوله $i$؛ و $npipe$ = تعداد لوله‌ها در سامانه، هستند.

این تابع به‌طور مستقیم بر انتخاب قطرها تأثیر می‌گذارد. قطر بزرگ‌تر به‌معنای هزینه بیش‌تر است، اما کاهش قطر در صورت افراط منجر به افت هد و کاهش تاب‌آوری شبکه خواهد شد. بنابراین این تابع هدف در تعارض مستقیم با تابع هدف دوم قرار دارد.

(ب) تابع هدف دوم:

تابع هدف دوم به‌صورت بیشینه‌سازی شاخص تاب‌آوری هیدرولیکی مطابق با رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$RI = \frac{\sum_j^N q_j\left(ha_j - hr_j\right)}{\left(\sum_{r=1}^{R} Q_r H_r + \sum_b^B \frac{P_b}{\gamma}\right) - \sum_{j=1}^{N} q_j hr_j} \qquad (۲)$$

که در آن، $N$ = تعداد گره‌های تقاضا، $q_j$ = دبی تقاضا (برداشتی یا مصرفی) در گره $j$، $ha_j$ = هد موجود و قابل دسترس در گره $j$، $hr_j$ = کمینه هد مجاز برای گره $j$، $R$ = تعداد مخازن، $Q_r$ = دبی مخزن، $r$ = هنگام تغذیه شبکه، $H_r$ = هد مخزن $r$، $B$ = تعداد پمپ موجود در شبکه، $P_b$ = انرژی تولیدشده توسط پمپ $b$ و $\gamma$ = وزن مخصوص آب هستند.

شاخص تاب‌آوری میزان توانایی شبکه در حفظ انرژی مازاد و توان تحویل آب در شرایط نامطلوب را نشان می‌دهد. این شاخص به‌صورت زیر تعریف می‌شود. تاب‌آوری بالا نشان‌دهنده افزایش انرژی مازاد، ایمنی بیش‌تر و توانایی تحمل اختلالات هیدرولیکی است.

### ۲-۴- قیود طراحی

#### ۱- قید پیوستگی جریان

این قید تضمین می‌کند که قوانین بقای جرم در شبکه برقرار بماند که مطابق با رابطه (۳) خواهد بود:

$$\sum Q_j^{in} - \sum Q_j^{out} = d_j \qquad (۳)$$

که در آن، $Q_j^{in}$ و $Q_j^{out}$ = به‌ترتیب جریان ورودی و خروجی به گره و $d_j$ = جریان مصرفی یا تقاضا در هر گره، هستند.

#### ۲- قید انرژی (حلقه‌های شبکه)

این قید مطابق با رابطه (۴) خواهد بود:

$$\sum k \in loop\ l \quad \Delta H_k = 0 \quad \forall l \in NL \qquad (۴)$$

که در آن، $\Delta H_k$ = افت فشار در لوله $k$، $NL$ = تعداد کل حلقه‌ها در سامانه و $l$ = معرف هر حلقه است. افت فشار در هر لوله تفاوت هد بین گره‌های متصل به همدیگر است و با استفاده از رابطه هیزن-ویلیامز مطابق با رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$\Delta H_k = H_{1,k} - H_{2,k} = \omega \frac{L_k}{C_k^{\alpha} D_k^{\beta}} Q_k^{\alpha}, \qquad (۵)$$
$$\forall k \in npipe$$

که در آن، $H_{1,k}$ و $H_{2,k}$ = هد در دو انتهای لوله $k$؛ $\omega$ = ثابت تبدیل عددی (که بستگی به واحدها دارد)؛ $C_k^{\alpha}$ = ضریب زبری لوله $k$ (که وابسته به جنس لوله است)؛ $\alpha$ و $\beta$ ضرایب رگرسیون هستند. با توجه به این که برای حل معادله مربوط به برقراری این قید از نرم‌افزار EPANET 2.0 استفاده شده است. مقدار $\omega$ برابر ۱۰/۶۶۷ و $\alpha$ و $\beta$ به‌ترتیب ۱/۸۵۲ و ۴/۸۷۱ می‌باشند [۱۳].

#### ۳- قید فشار گره‌ها

این قید تضمین می‌کند که در هیچ شرایطی فشار از محدوده استاندارد خارج نشود که مطابق با رابطه (۶) خواهد بود:

$$H_j^{min} \le H_j \le H_j^{max} \qquad j = 1, \ldots . ND \qquad (۶)$$

که در آن، $H_j$ = هد فشار در گره $j$، $H_j^{min}$ و $H_j^{max}$= به ترتیب کمینه و بیشینه فشار مورد نیاز در گره $j$ و $ND$ = تعداد گره‌های مصرفی موجود در شبکه، هستند.

#### ۴- قید سرعت جریان در لوله‌ها

این قید از ایجاد رسوب (در سرعت کم) و سایش یا کاویتاسیون (در سرعت زیاد) جلوگیری می‌کند که مطابق با رابطه (۷) خواهد بود:

$$V_k^{min} \le V_k \le V_k^{max} \qquad k = 1, \ldots . NP \qquad (۷)$$

که در آن، $V_k$ = سرعت در لوله $k$، $V_k^{min}$ و $V_k^{max}$ = به ترتیب کمینه و بیشینه سرعت در هر لوله $k$ و $NP$ = تعداد لوله‌های موجود در شبکه، هستند.

#### ۵- انتخاب قطر از میان قطرهای تجاری

این قید مطابق با رابطه (۸) خواهد بود:

$$D_k \in \{D\}, \quad \forall k \in npipe \qquad (۸)$$

که در آن، $D_k$ = قطر لوله $k$ و $D$ = مجموعه قطرهای تجاری موجود، هستند.

### ۲-۵- داده‌های قطر و هزینه لوله‌ها

در این پژوهش، دامنه قطرهای قابل انتخاب از جدول لوله‌های تجاری موجود در بازار استخراج شده است. این جدول شامل ۱۵ قطر مختلف است که هزینه آن‌ها بر اساس

قیمت واحد وزنی لوله پلی‌اتیلن محاسبه شده است. مشخصات دقیق هزینه‌ها، قطر داخلی، ضخامت و وزن هر متر لوله در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- ابعاد و هزینه لوله‌های تجاری منتخب موجود در بازار برای استفاده در شبکه‌های توزیع

Table 1. Dimensions and cost of selected commercial pipes available in the market for use in water distribution networks

| Pipe No. | Nominal Diameter (mm) | Nominal Thickness (mm) | Internal Diameter (mm) | Weight per meter of pipe (kg/m) | Cost meter of pipe (Rial/m) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 63 | 4.7 | 53.6 | 0.837 | 23436 |
| 2 | 75 | 5.6 | 63.8 | 1.24 | 34720 |
| 3 | 90 | 6.7 | 76.6 | 1.77 | 49560 |
| 4 | 110 | 8.1 | 93.8 | 2.62 | 73360 |
| 5 | 125 | 9.2 | 106.6 | 3.37 | 94360 |
| 6 | 140 | 10.3 | 119.4 | 4.22 | 118160 |
| 7 | 160 | 11.8 | 136.4 | 5.5 | 154000 |
| 8 | 200 | 14.7 | 170.6 | 8.56 | 239680 |
| 9 | 225 | 16.6 | 191.8 | 10.9 | 305200 |
| 10 | 250 | 18.4 | 213.2 | 13.4 | 375200 |
| 11 | 280 | 20.6 | 238.8 | 16.8 | 470400 |
| 12 | 315 | 23.2 | 268.6 | 21.2 | 593600 |
| 13 | 355 | 26.1 | 302.8 | 26.9 | 753200 |
| 14 | 400 | 29.4 | 341.2 | 34.1 | 954800 |
| 15 | 450 | 23.1 | 403.8 | 43.2 | 1209600 |

* The cost of the pipes is calculated at 28,000 Rials per kilogram and determined per meter of pipe based on the PE-80 table with a working pressure of 10 atmospheres.

### ۲-۶- نرم‌افزار EPANET و سازوکار محاسبات هیدرولیکی

EPANET 2.0 برای شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی و کیفیت آب در شبکه‌های توزیع طراحی شده است. این نرم‌افزار از مدل‌سازی عناصر مختلف شبکه شامل لوله‌ها، گره‌های تقاضا، مخازن، شیرها و پمپ‌ها پشتیبانی می‌کند و امکان تحلیل دقیق فشار، دبی، افت انرژی و الگوی حرکت آب را فراهم می‌سازد. در تحلیل این پژوهش، EPANET 2.0 به‌عنوان هسته محاسبه‌گر معادلات هیدرولیکی عمل می‌کند و تمامی روابط پیوستگی جریان، انرژی، و تلفات اصطکاک با استفاده از حل‌کننده داخلی نرم‌افزار ارزیابی می‌شود.

یکی از مزیت‌های کلیدی EPANET 2.0، ساختار محاسباتی مبتنی‌بر روش الگوریتم گرادیان است که قادر است سامانه‌های غیرخطی بسیار بزرگ را با سرعت بالا و پایداری مناسب حل کند. این ویژگی برای شبکه‌هایی مانند پهنه D مشهد که دارای صدها لوله و گره هستند اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مطالعه، EPANET 2.0 از طریق یک رابط پویا با MATLAB ارتباط برقرار می‌کند، به‌طوری که در هر بار فراخوانی، قطرهای پیشنهادی الگوریتم به EPANET 2.0 منتقل شده، تحلیل هیدرولیکی انجام می‌شود و فشارها، سرعت‌ها و دبی‌ها برای ارزیابی توابع هدف به MATLAB بازگردانده می‌شوند.

سامانه پیاده‌سازی‌شده به‌گونه‌ای طراحی شده که:

- هر راه‌حل پیشنهادی الگوریتم به‌طور مستقیم به EPANET 2.0 ارسال می‌شود.
- تمامی قیود (از جمله فشار، سرعت و انرژی) بدون تقریب و به‌صورت واقعی بررسی می‌شوند.
- هر بار اجرای EPANET 2.0 کم‌تر از چند میلی‌ثانیه زمان می‌برد و بنابراین امکان اجرای هزاران ارزیابی فراهم شده است.

به کمک این سازوکار، دقت محاسبات هیدرولیکی بدون هیچ کاهش سرعت یا استفاده از مدل‌های ساده‌سازی‌شده تضمین شده است.

### ۲-۷- الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی

طی دو دهه گذشته، پژوهشگران برای حل مسائل پیچیده طراحی شبکه‌های آب از طیف گسترده‌ای از الگوریتم‌های تکاملی بهره گرفته‌اند. اگرچه این الگوریتم‌ها از نظر منطق درونی متفاوت هستند، اما هدف تمام آن‌ها پیمایش مؤثر یک فضای جستجوی عظیم، گسسته و غیرخطی است. در ادامه، عملکرد مهم‌ترین الگوریتم‌هایی که در چکیده به آن‌ها اشاره شد تشریح می‌شود.

**۲-۷-۱- الگوریتم‌های مبتنی‌بر سلطه پارتو (NSGA-II)**

این روش‌ها از مفهوم مرتب‌سازی پارتو برای هدایت فرآیند تکاملی استفاده می‌کنند. NSGA-II یکی از مشهورترین روش‌هاست اما:

- به‌ویژه در فضاهای جستجوی گسسته مانند انتخاب قطر لوله،
- امکان ازدحام جمعیت و توقف تکامل وجود دارد.

تمام این محدودیت‌ها زمینه‌ساز ظهور الگوریتم‌هایی شدند که بتوانند اکتشاف قوی، بهره‌برداری هدفمند و پایداری بالا را هم‌زمان فراهم کنند؛ الگوریتم گرگ خاکستری نمونه‌ای از چنین نسل جدیدی از روش‌های هوشمند است.

**۲-۷-۲- الگوریتم ازدحام ذرات (PSO / MOPSO)**

PSO الهام‌گرفته از رفتار اجتماع پرندگان است. نسخه چندهدفه آن (MOPSO) برای تولید جبهه پارتو استفاده می‌شود. مزایای PSO شامل ساختار ساده و سرعت بالاست، اما در شبکه‌های بزرگ:

- نوسان زیاد در اطراف پاسخ‌های مطلوب،
- دشواری در حفظ تنوع جمعیت،
- حساسیت بالا به پارامترهای اینرسی و شتاب باعث می‌شود پایداری آن کاهش یابد.

**۲-۸- الگوریتم گرگ خاکستری چندهدفه (MOGWO): ساختار، منطق و نوآوری‌های آن**

الگوریتم گرگ خاکستری (GWO) براساس الگوی شکار گروهی گرگ‌های خاکستری در طبیعت ساخته شده است. این حیوانات ساختار اجتماعی سلسله‌مراتبی دارند و رفتار شکارشان ترکیبی از محاصره هدف، تعقیب و حمله هماهنگ است. نسخه چندهدفه این الگوریتم (MOGWO) این رفتار را برای تولید جبهه پارتو با کیفیت بالا به‌کار می‌گیرد. در ادامه، منطق درونی آن به‌صورت کامل ارائه می‌شود.

**۲-۸-۱- سلسله‌مراتب اجتماعی گرگ‌ها در مدل MOGWO**

در دنیای واقعی، گرگ‌ها به چهار سطح اجتماعی تقسیم می‌شوند:

- رهبر اصلی و تصمیم‌گیر ($\alpha$)
- فرماندهان و مشاوران ($\beta$)
- گرگ‌های تابع ($\delta$)
- پایین‌ترین رتبه ($\omega$)

در MOGWO نیز هر نسل شامل مجموعه‌ای از راه‌حل‌هاست. برای مسائل چندهدفه:

- یک آرشیو غیرغالب نگه‌داری می‌شود،
- بهترین سه عضو آرشیو نقش $\alpha, \beta, \delta$ را دارند،
- سایر راه‌حل‌ها نقش $\omega$ را بازی می‌کنند.

این ساختار باعث می‌شود حرکت کل جمعیت به‌صورت هماهنگ به سمت جبهه پارتوی واقعی هدایت شود.

**۲-۸-۲- مدل محاصره[30]**

در طبیعت گرگ‌ها هنگام شکار، طعمه را از چند جهت محاصره می‌کنند. در مدل ریاضی، محل طعمه به‌عنوان پاسخ بهینه فرض می‌شود، اگرچه مکان آن ناشناخته است. بنابراین راه‌حل‌ها با استفاده از $\alpha$، $\beta$ و $\delta$ به سمت ناحیه بهینه حرکت می‌کنند.

**۲-۸-۳- مدل حمله[31]**

در این مدل، گرگ‌ها به‌جای جستجو، موقعیت خود را به‌سمت طعمه واقعی نزدیک می‌کنند. در این حالت

[30]- Encircling

[31]- Attacking the Prey

الگوریتم وارد فاز استخراج شده و حرکت‌ها کوچک‌تر و دقیق‌تر می‌شوند.

این سازوکار باعث می‌شود MOGWO:

- در مراحل اولیه اکتشاف وسیع انجام دهد،
- در مراحل پایانی روی نواحی امیدبخش تمرکز کند،
- از افتادن در کمینه محلی جلوگیری نماید.

### ۲-۸-۴- مدل اکتشاف[۳۲]

در این مرحله، گرگ‌ها دور از محل $\alpha$ حرکت می‌کنند و فاز اکتشافی فعال است. این ویژگی باعث تولید راه‌حل‌های متنوع می‌شود و جبهه پارتو به‌طور کامل گسترده و یکنواخت می‌گردد؛ موضوعی که در بسیاری از الگوریتم‌های قدیمی‌تر چالشی مهم بوده است.

### ۲-۸-۵- ساخت جبهه پارتوی چندهدفه

در نسخه چندهدفه MOGWO، تولید جبهه پارتو از طریق:

- مرتب‌سازی غیرغالب،
- استفاده از معیار فاصله ازدحام،
- به‌روزرسانی آرشیو خارجی،
- حفظ یک مخزن با اندازه ثابت برای بهترین جواب‌ها

انجام می‌شود. این کار موجب می‌شود:

- جواب‌ها در سراسر جبهه به‌طور یکنواخت پخش شوند،
- هیچ ناحیه‌ای از فضای تصمیم خالی نماند،
- الگوریتم همگرایی را قربانی تنوع جمعیت نکند.

### ۲-۸-۶- دلایل برتری MOGWO در طراحی شبکه‌های آب

ترکیب سه نیروی $\alpha$، $\beta$، $\delta$ از سه جهت مختلف باعث می‌شود فرآیند جستجو بسیار قوی‌تر از روش‌هایی مانند NSGA-II عمل کند. در واقع، هر راه‌حل جدید نه‌تنها به بهترین عضو نگاه می‌کند، بلکه با اطلاعات مختلف از چند عضو متفاوت جهت حرکت خود را اصلاح می‌کند. این موضوع به‌ویژه در طراحی شبکه‌های آب که:

- سطح توپوگرافی پیچیده است،
- فشارها رفتار غیرخطی دارند،
- انتخاب قطرها گسسته است،
- چندین هدف متعارض وجود دارد،

اهمیت بسیار زیادی دارد و کیفیت پاسخ‌ها را افزایش می‌دهد.

### ۲-۸-۷- سازگاری MOGWO با فضای گسسته انتخاب قطر

در مسائل مهندسی، بسیاری از الگوریتم‌ها مستلزم عملیات پیوسته هستند و برای متغیرهای گسسته به‌خوبی عمل نمی‌کنند. نسخه توسعه‌یافته MOGWO در این پژوهش:

- موقعیت‌های پیوسته را به نزدیک‌ترین قطر تجاری تبدیل می‌کند،
- از عملگرهای گردسازی هوشمند استفاده می‌کند،
- از جهش[۳۳] تصادفی محدود برای جلوگیری از یکنواخت شدن جمعیت بهره می‌گیرد.

این ویژگی‌ها باعث شده است که الگوریتم بتواند به طور کامل طبیعی در فضای گسسته قطرها عمل کند.

### ۲-۹- مطالعه موردی

برای سامان‌دهی و مدیریت شبکه توزیع آب شهر مشهد، محدوده این شهر به ۲۳ پهنه عملیاتی تفکیک شده است. یکی از این پهنه‌ها، پهنه D است که به‌دلیل وسعت مناسب، تنوع توپوگرافی و تعداد به‌نسبت زیاد مشترکان، به‌عنوان منطقه هدف در این تحقیق انتخاب گردید. موقعیت مکانی این پهنه در شکل ۱ نمایش داده شده است.

[32]- Exploration

[33]- Mutation

شبکه آبرسانی پهنه D شامل ۲۶۵ خط لوله با مجموع طول ۳۸۱۶۱ متر است که وظیفه انتقال آب به ۲۱۷ گره مصرفی را برعهده دارند.

تغذیه این شبکه توسط یک منبع اصلی با تراز آب ۱۰۸۷ متر انجام می‌گیرد و این منبع نقش حیاتی در ایجاد فشار پایه شبکه دارد.

این پهنه با مساحتی حدود ۶۶۶ هکتار در محدوده‌ای با کمینه ارتفاع ۱۰۲۴ متر و بیشینه ارتفاع ۱۰۵۹ متر قرار دارد. براساس سرشماری سال ۱۳۹۵، جمعیتی معادل ۴۷۰۱۳ نفر تحت پوشش این شبکه قرار داشته‌اند.

این ویژگی‌ها سبب شده پهنه D نمونه‌ای مناسب برای ارزیابی روش‌های نوین بهینه‌سازی در طراحی و بازآرایی شبکه‌های توزیع آب باشد؛ زیرا از یک‌سو دارای تغییرات ارتفاعی محسوس است و از سوی دیگر نسبت مصرف‌کننده به طول خطوط، مدل‌سازی هیدرولیکی را به چالشی واقعی تبدیل می‌کند.

در این مطالعه، تمامی خصوصیات هندسی و هیدرولیکی شبکه شامل قطر لوله‌ها، طول خطوط، رفتار گره‌ها، شرایط فشار و نحوه توزیع بار مصرف، استخراج و در مدل نرم‌افزار EPANET 2.0 پیاده‌سازی شد.

هدف از این انتخاب، فراهم‌کردن یک بستر واقعی برای ارزیابی عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی و سنجش توان آن در کاهش هزینه‌ها و ارتقای تاب‌آوری هیدرولیکی شبکه بود.

خروجی‌های مدل‌سازی نشان داد که ویژگی‌های شبکه پهنه D از نظر ابعاد، پراکندگی جمعیت و الگوی مصرف، تصویر به‌نسبت دقیقی از یک شبکه توزیع شهری با مقیاس متوسط ارائه می‌دهد.

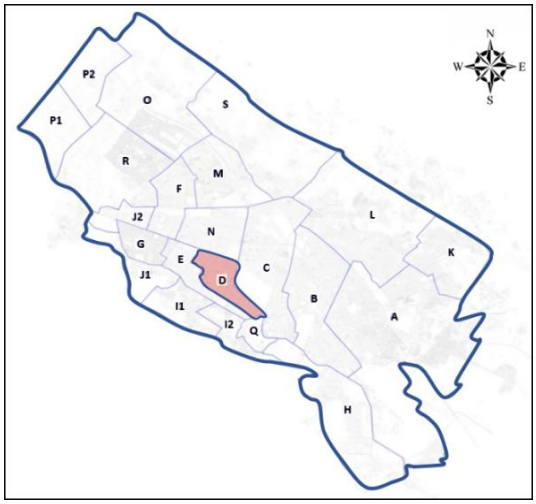


Figure 1. Geographical location of the water distribution network in Zone D of Mashhad city

شکل ۱- موقعیت مکانی شبکه توزیع آب پهنه D شهر مشهد

## ۳- بحث و بررسی نتایج

### ۳-۱- ارزیابی عملکرد روش‌های مختلف در بهینه‌سازی شبکه توزیع آب

در این مطالعه، چهار روش شامل «طرح مشاور» (به‌عنوان وضعیت موجود شبکه)، MOGWO، NSGA-II و MOPSO براساس دو شاخص اصلی کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی شاخص تاب‌آوری (RI) با یکدیگر مقایسه شدند.

این مقایسه با استفاده از مجموعه داده‌های حاصل از جبهه پارتوی به‌دست‌آمده از اجرای الگوریتم‌ها انجام شده است.

### ۳-۲- تحلیل جبهه پارتو

تحلیل نمودار پراکندگی هزینه و شاخص تاب‌آوری در شکل ۲ مقایسه‌ای میان عملکرد چهار روش مختلف مشاور، MOGWO، NSGA-II و MOPSO در زمینه بهینه‌سازی هزینه (میلیارد ریال) و شاخص تاب‌آوری (RI) ارائه می‌دهد. محور افقی نشان‌دهنده هزینه و محور عمودی بیانگر شاخص تاب‌آوری است.

داده‌های مربوط به مشاور با دایره‌های نارنجی مشخص شده‌اند و در ناحیه‌ای با هزینه بالا ( حدود ۱۴

میلیارد ریال) و شاخص تاب‌آوری پایین (حدود ۰/۳۳) قرار دارند که نشان‌دهنده کارآیی کم‌تر این گزینه نسبت به سایر روش‌هاست.

سه الگوریتم فراابتکاری (MOGWO، NSGA-II و MOPSO) در محدوده‌ای با هزینه کم‌تر (حدود ۱۰/۵ تا ۱۲/۵ میلیارد ریال) و شاخص تاب‌آوری بالاتر (حدود ۰/۳۴ تا ۰/۳۹) قرار گرفته‌اند که بیانگر عملکرد بهینه‌تر آن‌ها در مقایسه با گزینه مشاور است.

الگوریتم MOPSO (الماس‌های زرد) و NSGA-II (مثلث‌های سبز) بیش‌ترین تراکم را در ناحیه مطلوب دارند، در حالی که MOGWO نیز عملکرد قابل قبولی از نظر تعادل بین هزینه و تاب‌آوری نشان می‌دهد.

این تحلیل نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری می‌تواند منجر به دست‌یابی به راه‌حل‌هایی با هزینه کم‌تر و تاب‌آوری بیش‌تر نسبت به روش‌های سنتی مشاوره‌ای شود.

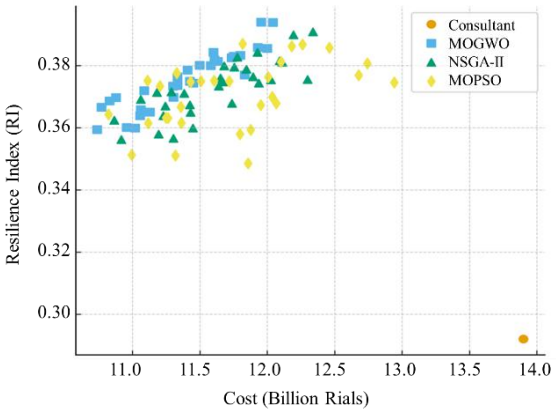


Figure 2. Pareto front analysis

شکل ۲- تحلیل جبهه پارتو

### ۳-۳- تحلیل همگرایی هزینه

بررسی نمودار همگرایی هزینه در شکل ۳ نشان می‌دهد MOGWO سریع‌ترین نرخ همگرایی را دارد و در حدود تکرار ۶۰ به ناحیه بهینه رسیده است. NSGA-II به حدود ۱۱۰ تکرار برای همگرایی نیاز دارد. MOPSO حتی پس از ۲۰۰ تکرار نیز به‌طور کامل پایدار نشده است. هزینه طرح مشاور ثابت است و به‌عنوان مرجع استفاده شده است.

قدرت MOGWO در همگرایی سریع به ساختار سلسله‌مراتبی ($\alpha$، $\beta$، $\delta$) و سازوکار «تعقیب تطبیقی» بازمی‌گردد که سایر الگوریتم‌ها فاقد آن‌اند.

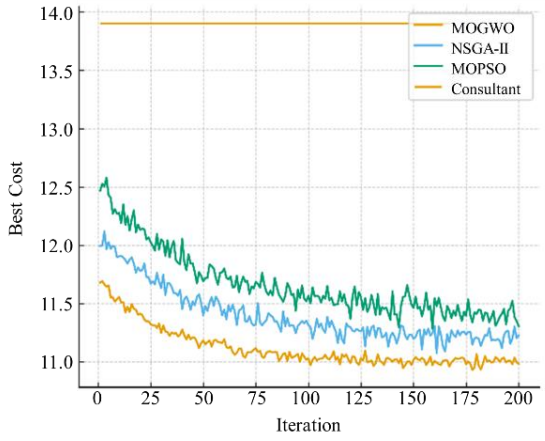


Figure 3. Cost convergence analysis

شکل ۳- تحلیل همگرایی هزینه

### ۴-۳- تحلیل همگرایی شاخص تاب‌آوری (RI)

نمودار مربوط به شکل ۴ نشان می‌دهد که الگوریتم MOGWO با شیب اولیه تندتر، در همان مراحل ابتدایی به مقدار بالاتری از شاخص تاب‌آوری دست می‌یابد و در ادامه با روندی پایدار در نزدیکی مقدار RI حدود ۰/۳۹ تثبیت می‌شود. این رفتار بیانگر توان بالای همگرایی و کارآیی این الگوریتم در دست‌یابی سریع به راه‌حل‌های بهینه است.

NSGA-II نیز عملکرد قابل قبولی دارد و با وجود شیب ملایم‌تر نسبت به MOGWO، به مقدار به‌نسبت بالایی از RI می‌رسد. روند تغییرات آن دارای نوسانات اندک و رفتار یکنواخت‌تری نسبت به MOPSO است که نشان‌دهنده پایداری بیش‌تر در فرآیند بهینه‌سازی است.

در مقابل، الگوریتم MOPSO به‌دلیل ماهیت مبتنی بر حرکت ذرات، دارای رفتار ناپیوسته و پله‌ای است. این الگوریتم با نوسانات متعدد و جهش‌های ناگهانی در مقدار RI، روندی غیرمنظم را طی می‌کند که می‌تواند ناشی از نوسان سرعت ذرات و حساسیت به پارامترهای کنترلی باشد.

در نهایت، خط افقی مربوط به گزینه مشاور نشان‌دهنده عدم‌تغییر در مقدار RI طی تکرارهاست، که بیان‌گر عدم‌استفاده از فرآیند بهینه‌سازی و ضعف در ارتقاء شاخص تاب‌آوری در مقایسه با الگوریتم‌های فراابتکاری است.

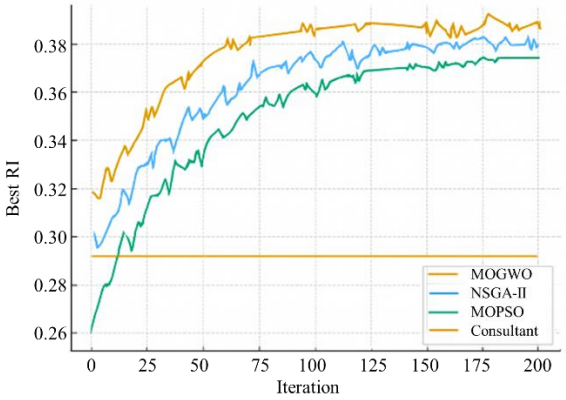


Figure 4. RI convergence analysis

شکل ۴- تحلیل همگرایی RI

### ۳-۵- تحلیل آماری عملکرد روش‌ها

تحلیل آماری عملکرد چهار رویکرد در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- میانگین هزینه و شاخص RI در چهار رویکرد

Table 2. Average cost and RI in four approaches

| Approaches | Average cost (billion rials) | Average RI |
|---|---|---|
| Consultant | 13.9 | 0.292 |
| MOGWO | 11.24 | 0.372 |
| NSGA-II | 11.51 | 0.361 |
| MOPSO | 11.66 | 0.355 |

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهند که MOGWO کم ترین هزینه را تولید کرده است. RI در MOGWO بالاتر از سایر روش‌ها است. NSGA-II عملکردی نزدیک به MOGWO دارد، اما تفاوت معنادار است (p-value ≈ 0.03). همچنین MOPSO پراکندگی آماری بیش‌تری دارد و عدم‌پایداری آن مشهود است.

### ۳-۶- تحلیل مهندسی قطر لوله‌ها

مقایسه طرح مشاور با طرح‌های بهینه MOGWO در شکل ۵ نشان می‌دهد که تعداد خطوط با قطر کم‌تر افزایش یافته است و سبب کاهش هزینه شده است.

در بخش‌هایی از شبکه، قطرهای بزرگ‌تر در حلقه‌های حساس انتخاب شده است و سبب افزایش تاب‌آوری خواهد شد.

این روند نشان‌دهنده تعادل هزینه–تاب‌آوری در شبکه است.

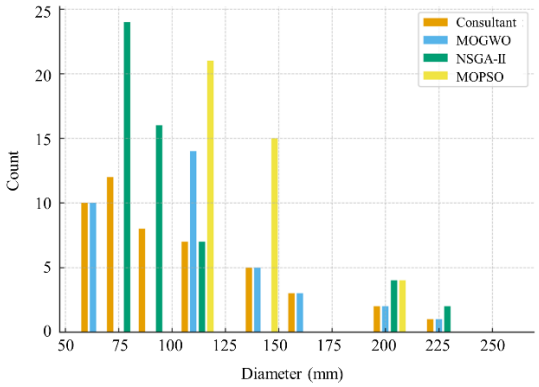


Figure 5. Pipe Diameter Distribution

شکل ۵- توزیع قطر لوله

### ۳-۷- تحلیل نهایی

براساس تحلیل‌های بالا، می‌توان نتیجه گرفت: MOGWO بهترین روش برای طراحی شبکه توزیع آب است، زیرا هزینه را بیش از ۱۹ درصد کاهش داده و تاب‌آوری را حدود ۲۷ درصد افزایش داده است. همچنین، هم‌گرایی سریع، پاسخ باکیفیت و جبهه پارتوی هموار تولید کرده است.

NSGA-II قابل اعتماد، ولی کندتر است. مناسب برای حالاتی است که تنوع جواب اهمیت بیش‌تری دارد.

الگوریتم MOPSO تنوع بالا ولی پایداری کمی دارد و در شبکه‌های حساس توصیه نمی‌شود.

همچنین، طرح فعلی شبکه (مشاور) نیاز جدی به بازنگری دارد. زیرا نه از نظر هزینه و نه تاب‌آوری، عملکرد بهینه ندارد.

## ۴- نتیجه‌گیری

طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب، به‌ویژه در مقیاس شهری، نیازمند رویکردهایی است که بتوانند هم‌زمان اهداف متعارضی هم‌چون کاهش هزینه و افزایش تاب‌آوری هیدرولیکی را تحقق بخشند.

در این پژوهش، یک چارچوب جامع مبتنی‌بر الگوریتم گرگ خاکستری چندهدفه (MOGWO) توسعه داده شد و عملکرد آن در یک شبکه واقعی (پهنه D شهر مشهد) مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه نتایج این الگوریتم با سه رویکرد دیگر شامل طرح مشاور، NSGA-II و MOPSO، یافته‌های مهمی به‌همراه داشت که نشان‌دهنده کارآمدی بالای روش پیشنهادی است.

نخست، MOGWO توانست هزینه کل شبکه را به‌طور میانگین بین ۱۸ تا ۲۵ درصد نسبت به طرح مشاور کاهش دهد، بدون آن‌که از کیفیت عملکرد هیدرولیکی کاسته شود. این کاهش هزینه به‌طور عمده ناشی از تخصیص هوشمندانه قطرها، کوچک‌سازی خطوط کم‌بار و تقویت قطر در مسیرهای حلقه‌ای حساس بود؛ رفتاری که نشان می‌دهد الگوریتم توانسته تعادل میان هزینه و قابلیت اطمینان را به‌درستی برقرار کند.

دوم، شاخص تاب‌آوری هیدرولیکی در نتایج MOGWO نسبت به طرح مشاور حدود ۱۵ تا ۳۰ درصد افزایش یافت. این افزایش بیان‌گر توان سامانه در حفظ فشار، تحمل نوسانات مصرف و مقابله با حالت‌های بحرانی است. تحلیل‌های هیدرولیکی نشان دادند که طرح‌های حاصل از MOGWO انرژی مازاد بیش‌تری در شبکه ذخیره می‌کنند و این ویژگی در شبکه‌هایی با توپوگرافی پیچیده هم‌چون مشهد اهمیت زیادی دارد.

مقایسه الگوریتم‌ها نشان داد MOGWO نسبت به NSGA-II و MOPSO نیز عملکرد برتری دارد. NSGA-II اگرچه پاسخ‌های متنوع و به‌نسبت با کیفیت ارائه کرد، اما سرعت همگرایی کم‌تر و نوسانات آغازین بیش‌تر آن موجب شد که نتواند به‌صورت پایدار با MOGWO رقابت کند.

از سوی دیگر، MOPSO تنوع بالایی ایجاد کرد، اما به‌دلیل نوسان ذرات، در دست‌یابی به یک جبهه پارتوی یکنواخت و همگرا موفق نبود.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سازوکار سه‌لایه $\alpha$، $\beta$ و $\delta$ در MOGWO، نقش کلیدی در پایداری و کیفیت جستجو دارد.

از منظر مهندسی شبکه، تحلیل قطر لوله‌ها نیز نشان داد که الگوریتم MOGWO با کاهش قطر در شاخه‌های کم‌مصرف و افزایش قطر در مسیرهای بحرانی، ضمن کاهش هزینه، رفتار هیدرولیکی شبکه را تقویت کرده است. این موضوع بیان‌گر قابلیت MOGWO در درک الگوی هیدرولیکی شبکه و ایجاد طراحی‌های منطقی و سازگار با واقعیت میدان است.

در مجموع نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که:

MOGWO کارآمدترین روش در میان گزینه‌های مقایسه‌شده است و می‌تواند به‌عنوان روشی قابل اتکا برای طراحی و بازآرایی شبکه‌های توزیع آب مورد استفاده قرار گیرد.

ترکیب EPANET و MOGWO یک چارچوب محاسباتی دقیق و سریع فراهم می‌کند که مناسب شبکه‌های بزرگ و واقعی است.

روش پیشنهادی قابلیت عملیاتی شدن دارد، زیرا از قطرهای تجاری، قیود کامل هیدرولیکی و داده‌های واقعی شبکه استفاده کرده است.

نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای توسعه سامانه‌های تصمیم‌یار در طراحی شبکه‌های آب شهری به‌کار رود.

در نهایت، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی موضوعاتی مانند بهینه‌سازی چنددوره‌ای تحت عدم‌قطعیت، تحلیل سناریوهای شکست لوله، استفاده از الگوریتم‌های هیبریدی و درنظرگرفتن هزینه‌های بهره‌برداری و انرژی

پمپاژ نیز بررسی شوند تا مدل‌های جامع‌تری برای تصمیم‌گیری در مدیریت شبکه‌های آب توسعه یابد.

## ملاحظات اخلاقی

### پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسنده اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده و این موضوع مورد تأیید ایشان است.

### مشارکت نویسندگان

پریساسادات آشفته محاسبات را انجام داد. روش‌های تحلیلی را تایید کرد، بر یافته‌های این پژوهش نظارت داشت، نتایج را بحث نمود و در نسخه نهایی مقاله مشارکت داشت.

### تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسنده این مقاله تعارض منافع ندارد.

### حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه کمک هزینه خاصی دریافت نکرده است.

### سپاسگزاری

از داوران محترم به‌خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

## References

[1] Afshar MH, Akbari M, Mariño MA. Simultaneous layout and size optimization of water distribution networks: Engineering approach. Journal of Infrastructure Systems. 2005 Dec; 11(4): 221-230. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:4(221).

[2] Farmani R, Savic DA, Walters GA. Evolutionary multi-objective optimization in water distribution network design. *Engineering Optimization*. 2005; 37(2): 167-183. https://doi.org/10.1080/03052150512331303436.

[3] Monsef H, Naghashzadegan M, Jamali A, Farmani R. Comparison of evolutionary multi objective optimization algorithms in optimum design of water distribution network. *Ain Shams Engineering Journal*. 2019; 10(1): 103-111. https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.04.003.

[4] Fallah H, Ghazanfari S, Suribabu CR, Rashedi E. Optimal pipe dimensioning in water distribution networks using gravitational search algorithm. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 2019: 1-14. https://doi.org/10.1080/09715010.2019.1624630.

[5] Ezzeldin RM, Djebedjian B. Optimal design of water distribution networks using whale optimization algorithm. *Urban Water Journal*. 2020; 17(1): 14-22. https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1734635.

[6] Elshaboury N, Attia T, Marzouk M. Application of evolutionary optimization algorithms for rehabilitation of water distribution networks. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2020; 146(7): 04020069. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001856.

[7] Khalifeh S, Akbarifard S, Khalifeh V, Zallaghi E. Optimization of water distribution of network systems using the Harris Hawks Optimization Algorithm (Case study: Homashahr City). *MethodsX*. 2020; 7: 100948. https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100948.

[8] Moasheri R, Jalili-Ghazizadeh M. Locating of probabilistic leakage areas in water distribution networks by a calibration method using the imperialist competitive algorithm. *Water Resources Management*. 2020; 34(1): 35-49. https://doi.org/10.1007/s11269-019-02388-4.

[9] Sangroula U, Han K-H, Koo K-M, Gnawali K, Yum K-T. Optimization of water distribution networks using genetic algorithm based SOP–WDN program. *Water*. 2022; 14(6): 851. https://doi.org/10.3390/w14060851.

[10] Cimorelli L, D'Aniello A, Pirone D, Pianese D. Leakage area detection in water distribution networks: A two-step algorithm using limited data, Water Resources Management. 2025; 39: 6841-6869. https://doi.org/10.1007/s11269-025-04272-w.

[11] Riyahi MM, Giudicianni C, Bakhshipour AE, Haghighi A, Creaco E. Multi-criteria pressure sensors placement in water distribution networks using fuzzy TOPSIS. Applied Water Science. 2025; 15 (229): https://doi.org/10.1007/s13201-025-02583-2.

[12] Yilmaz S, Ateş A, Firat M, Cinal H. Defining the most appropriate water network management plan with different optimization algorithms for sustainable water management. Water Resources Management. 2025; 39: 5673-5694. https://doi.org/10.1007/s11269-025-04221-7.

[13] Moghaddam A, Alizadeh A, Faridhosseini AR, Ziaei AN, Fallah D. The application of an improved particle swarm optimization algorithm in design of water distribution systems. *Iranian Journal of irrigation and Drainage*. 2013; 3(7): 389-401 [In Persian].