

Renovation and Upgrading of the Urban Water Distribution Systems by Multi-Objective Optimization Approach (Case Study: Part of Zahedan Distribution Network)

P. Arabi¹, B. Pirzadeh², J. Jafari-Asl³

1. Former Graduated Student, Dept. of Civil Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
2. Assoc. Prof., Dept. of Civil Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
(Corresponding Author) b_pirzadeh@eng.usb.ac.ir
3. PhD. Student, Dept. of Civil Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

(Received Nov. 5, 2020 Accepted June 28, 2021)

To cite this article:

Arabi, P., Pirzadeh, B., Jafari-Asl, J. 2022. "Renovation and upgrading of the urban water distribution systems by multi-objective optimization approach (case study: part of Zahedan distribution network)" Journal of Water and Wastewater, 32(6), 1-16. Doi: 10.22093/wwj.2021.255434.3078. (In Persian)

Abstract

Pipe wear in urban water supply networks is one of the most important challenges faced by water authorities. Older pipes must be replaced by new ones once they reach the end of their service life or are no longer useful due to a rise in demand and changes in surface roughness. Budget limits are one of the most common reasons for the failure of renovation and upgrade plans in water supply networks. In the traditional approach, the whole renovation is done in one phase and does not take into account the growth and development of the system. Therefore, uncertainties due to unforeseen changes are not considered. The present study addresses the renovation and upgrade of a part of the water supply network in Zahedan city via a novel approach. This approach involves dividing the plan into phases and redesigning some of the pipes during 5-year phases based on budget partitioning. To improve the hydraulic performance of the network, a multi-objective simulation-optimization model was developed with the pipe replacement cost and the water supply network reliability as the objective functions that must be minimized and maximized, respectively. For this purpose, the EPANET simulator model was combined with the Gray Wolf Optimization (GWO) algorithm in MATLAB software. The



model execution results in each Phase were presented in the form of a Pareto front between the objective functions. This allows the company to renovate the water supply network based on the budget in each phase. After optimization in phase 1, the results were presented as a Pareto front between the network reliability coefficient and the reconstruction cost. One of the optimal answers on the chart was selected as the final design. In this optimal design, 22 pipes at a cost of 276 million Tomans and a reliability coefficient of 48.2% were replaced. After applying changes in the diameter of the pipes according to the design, the first phase was optimized as the basic model of the second phase. In phase 2, 32 pipes were selected and renovated. Similarly, after the end of Phase 4, it was found that the network reliability has increased significantly (150%) and the pressure of all network nodes was within the allowable range. The results indicate that the used approach can considerably increase the reliability of the network in addition to appropriately managing the renovation budget.

Keywords: Water Supply Networks, Optimization, Gray Wolf Algorithm, Renovation, Reliability.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۲، شماره ۶، صفحه: ۱۶-۱

نوسازی و ارتقای سیستم‌های توزیع آب شهری با رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه (مطالعه موردی: بخشی از شبکه توزیع آب شهر زاهدان)

پیمان اعرابی^۱، بهاره پیرزاده^۲، جعفر جعفری اصل^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت،

دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت،

دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

(نویسنده مسئول) b_pirzadeh@eng.usb.ac.ir

۳- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت،

دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

(دریافت ۹۹/۸/۱۵ پذیرش ۱۴۰۰/۴/۷)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

اعرابی، پ.، پیرزاده، ب.، جعفری اصل، ج.، ۱۴۰۰، "نوسازی و ارتقای سیستم‌های توزیع آب شهری با رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه (مطالعه موردی: بخشی از شبکه توزیع آب شهر زاهدان)" مجله آب و فاضلاب، ۳۲(۶)، ۱-۱۶. Doi: 10.22093/wwj.2021.255434.3078

چکیده

فرسودگی لوله‌های سیستم‌های توزیع آب شهری از مهم‌ترین چالش‌های مدیران صنعت آب است. در صورتی که لوله‌های توزیع آب به پایان عمر مفید خود رسیده باشند و یا به دلیل افزایش تقاضا و تغییرات زبری، لوله‌ها دیگر کارایی نداشته باشند، باید با لوله‌های نو جایگزین شوند. محدودیت بودجه یکی از مهم‌ترین دلایل عدم موفقیت طرح‌های نوسازی و ارتقای سیستم‌های توزیع آب است. در رویکرد سنتی، نوسازی کل شبکه در یک فاز انجام می‌شود و رشد و توسعه سیستم لحاظ نمی‌شود و بنابراین عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرات پیش‌بینی نشده، در نظر گرفته نمی‌شود. در این پژوهش، با یک رویکرد جدید با فازبندی کردن دوره طرح همراه با توسعه شهری و باز طراحی بخشی از لوله‌ها در فازهای ۵ ساله، بر اساس تقسیم‌بندی بودجه، به نوسازی و ارتقای بخشی از سیستم توزیع آب شهر زاهدان پرداخته شد. به این منظور یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی چندهدفه با توابع هدف کمینه‌سازی هزینه تعویض لوله‌ها و بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری سیستم توزیع آب، برای بهبود عملکرد هیدرولیکی شبکه توسعه داده شد. در این راستا مدل شبیه‌ساز EPANET با الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری در محیط نرم‌افزار MATLAB تلفیق شد. پس از انجام بهینه‌سازی در فاز ۱، نتایج به صورت یک جبهه پرتو بین ضریب اطمینان شبکه و هزینه بازسازی ارائه شد. یکی از پاسخ‌های بهینه موجود بر روی نمودار به عنوان طرح نهایی انتخاب شد. در این طرح بهینه ۲۲ لوله با مبلغ ۲۷۶ میلیون تومان و ضریب اطمینان ۴۸/۲ درصد تعویض شد. پس از اعمال تغییرات در قطر لوله‌ها بر اساس طرح فاز ۱ مدل به عنوان مدل پایه فاز ۲ بهینه‌سازی شد. در فاز ۲ نیز ۳۲ لوله انتخاب و نوسازی شد. به همین ترتیب پس از پایان فاز ۴ مشخص شد که ضریب اطمینان شبکه به صورت چشمگیری ۱۵۰ درصد افزایش داشت و فشار تمامی گره‌های شبکه در محدوده مجاز قرار داشت. بر اساس نتایج به دست آمده از این پژوهش می‌توان این‌گونه اظهار نظر کرد که استفاده از رویکرد به کار برده شده در این پژوهش در شرایط کمبود بودجه می‌تواند بسیار مؤثر باشد که علاوه بر مدیریت بودجه موجب افزایش ضریب اطمینان شبکه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سیستم‌های توزیع آب، بهینه‌سازی، الگوریتم گرگ خاکستری، نوسازی، ضریب اطمینان



۱- مقدمه

پیردازند (Minaei et al., 2019).

درجه فرسودگی و از بین رفتگی بخش‌های مختلف یک سیستم توزیع آب به دلایل متعددی از جمله سرعت، کیفیت و جنس لوله‌ها و فاصله از مخازن و ایستگاه‌های پمپاژ با یکدیگر متفاوت بوده و اولویت یکسانی برای بهبود و نوسازی ندارند. همچنین بسته به شرایط و محدودیت‌های فنی و اجرایی ناشی از توسعه و گسترش شهری، ممکن است هر رویکرد نوسازی برای هر منطقه‌ای مناسب نباشد. مجموعه عوامل فوق بیانگر این است که طرح ارتقا و نوسازی سیستم‌های توزیع آب یک مسئله برنامه‌ریزی پیچیده و بزرگ مقیاس است که حل آن نیازمند استفاده از روش‌های پیشرفته بهینه‌سازی است (Minaei et al., 2019).

تاریخچه استفاده از روش‌های نوین بهینه‌سازی در طراحی و بازسازی سیستم‌های توزیع آب قدمتی چندین ساله دارد که پیش از توسعه این روش‌ها به‌طور معمول بر اساس قضاوت‌های مهندسی و یا استفاده از روش‌های سعی و خطا انجام می‌شود. پیچیدگی و گستردگی فضای تصمیم در طراحی سیستم‌های توزیع آب و عدم بهینه بودن طرح‌های به دست آمده از این نوع طراحی‌ها و سایر محدودیت‌های موجود، سبب پیدایش پیشینه مطالعاتی پرقدمتی در این زمینه شده‌اند. از اولین پژوهش‌های انجام شده بر روی طراحی بهینه سیستم‌های توزیع آب با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک مانند برنامه‌ریزی خطی، غیرخطی و پویا می‌توان (Alperovits and Shamir, 1997, Fujiwara and Khang, 1990, Goulter and Morgan, 1985) را نام برد.

با گذشت زمان و توسعه روش‌های نوین بهینه‌سازی و برطرف کردن ضعف روش‌های کلاسیک، پژوهشگران به سمت این روش‌ها روی آوردند. برای اولین بار استفاده از روش‌های تکاملی برای طراحی و نوسازی سیستم‌های توزیع آب توسط مورفی و سیمپسون معرفی شد. آنها از الگوریتم ژنتیک^۱ برای یافتن قطر بهینه لوله‌های جدید و لوله‌های اضافه شده به موازات برخی از لوله‌های قدیمی در یک سیستم توزیع آب استفاده کردند. در مقایسه‌ای که بین عملکرد GA و روش‌های کلاسیک انجام شد نتایج بیانگر عملکرد بسیار خوب GA از نظر دقت و زمان یافتن پاسخ بهینه بود (Simpson et al., 1993).

سیستم‌های توزیع آب مجموعه‌ای به هم پیوسته‌ای از مخازن، لوله‌ها، پمپ‌ها، شیرها و گره‌های مصرف هستند که از مهم‌ترین زیرساخت‌های هر جامعه‌ای به‌شمار می‌آیند و نقش اساسی در بقا و چرخه معمولی زندگی ایفا می‌کنند. در حقیقت وظیفه اصلی این سیستم‌ها رساندن آب با کیفیت و کمیت مناسب به مصرف‌کنندگان است (Tabesh and Soltani, 2005).

فرسودگی لوله‌های سیستم‌های توزیع آب یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی مدیران و مهندسان صنعت آب در سراسر جهان است. با تمام شدن عمر مفید لوله‌های سیستم‌های توزیع آب کارایی آنها کم شده و نیازمند احیا، تقویت و یا تعویض هستند که با توجه به مدفون بودن لوله‌ها در زیر خاک، و قابل‌پایش نبودن آنها از نظر بصری، یافتن لوله‌های فرسوده و نیازمند تعویض از سوالات کلیدی و مهم برای تصمیم‌گیری مدیران است (Taheri

Hosseinabadi, 2015, Minaei et al., 2019)

در شکست لوله‌ها عوامل مختلفی مانند سن، قطر، جنس، شرایط اجرا، نصب و شرایط بهره‌برداری دخیل هستند (Soltani and Rezapour Tabari, 2012)

از طرفی، ضریب اطمینان هیدرولیکی و مکانیکی از مهم‌ترین شاخص‌های قابل‌استفاده در بازسازی و نوسازی سیستم‌های توزیع آب است. در واقع ضریب اطمینان هیدرولیکی بیانگر توانایی سیستم توزیع آب در تأمین فشار و دبی تقاضا در سطح شبکه با تغییرات تقاضا در طول مدت بهره‌برداری است و ضریب اطمینان مکانیکی نشان‌دهنده توانایی سیستم توزیع آب برای سرویس‌دهی به مصرف‌کنندگان در شرایط غیرقابل پیش‌بینی مانند شکست لوله‌ها و از مدار خارج شدن پمپ‌ها است (Ghorbani Dastgerdi, 2015).

در سراسر دنیا، نه تنها در کشورهای توسعه‌یافته بلکه در کشورهای در حال توسعه نیز هزینه‌های گزافی صرف طراحی و یا ارتقای سیستم‌های توزیع آب می‌شود. بدیهی است که برنامه‌ریزی برای ارتقا و نوسازی سیستم‌های توزیع آب با وجود محدودیت‌های بودجه شرایط دشوارتری را در مقابل مدیران قرار می‌دهد. بنابراین پژوهشگران در تلاش هستند تا بر اساس بودجه و اعتبار در دسترس و سایر محدودیت‌های اجرایی و اهمیت پروژه، با روش‌های مختلفی به نوسازی و ارتقای سیستم‌های توزیع آب

¹ Genetic Algorithm (GA)



مظاهری زاده و همکاران به طراحی چندهدفه شبکه چهار توزیع آب شامل شبکه‌های دو حلقه‌ای، کادو، هانوی و پهنه D شهر مشهد پرداختند. نتایج آنان نشان داد که شاخص تودینی با تکیه بر افزایش فشار گره‌ای، توانایی زیادی برای افزایش اطمینان پذیری شبکه دارد (Mazaherizadeh et al., 2019).

هدف این پژوهش استفاده از ارائه یک رویکرد جدید بر اساس روش‌های نوین بهینه‌سازی برای بهبود عملکرد هیدرولیکی سیستم‌های توزیع آب و کمینه‌کردن هزینه‌های بازسازی و نوسازی این سیستم‌ها بود. برای تعریف ضریب اطمینان سیستم‌های توزیع آب از دو شاخص کاملاً جدا در دو شرایط طراحی با بودجه زیاد و طراحی با بودجه کم استفاده شد. به‌گونه‌ای که در طراحی با بودجه کم، هدف حفظ فشار شبکه در سطح مطلوب با حداقل هزینه و هدف در طراحی با بودجه زیاد علاوه بر حفظ فشار در سطح مطلوب، افزایش عملکرد هیدرولیکی یا توان شبکه در مواقع بحران مانند وقوع شکست در لوله‌های شبکه بود. به‌همین منظور از دو شاخص ضریب اطمینان مجزا استفاده شد و مدل شبیه‌سازی EPANET در ارتباط با یک مدل بهینه‌سازی بر مبنای یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جدید تحت عنوان الگوریتم گرگ خاکستری^۴ توسعه داده شد. همچنین برای مدل‌سازی دبی مصرفی گره‌ها از تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار توسعه داده شده در نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. در نتیجه طرح‌های به‌دست آمده به‌صورت نمودارهای تعامل میان هزینه‌های طراحی و ضریب اطمینان سیستم توزیع آب ارائه شده است.

در پژوهشی به بهبود توزیع مناسب فشار در قسمتی از شبکه آب‌رسانی شهر زاهدان پرداخته شده (Karimi Darmian, 2014)، اما تاکنون پژوهشی جامع در خصوص ارتقا و نوسازی بخش‌های فرسوده شبکه آب‌رسانی شهر زاهدان در راستای بهبود کارایی هیدرولیکی آن انجام نشده است. با توجه به اینکه سیستم توزیع آب این شهر، با کمبود فشار در سطح شبکه مواجه بوده و همچنین با توجه به کمبود بودجه در دسترس دستگاه اجرایی، برای مدیریت صحیح بودجه موردنیاز نوسازی سیستم توزیع آب، نیاز به استفاده از روش‌های نوین بهینه‌سازی و مدیریت بودجه احساس می‌شود. بنابراین مدل به‌کار برده شده برای باز طراحی و نوسازی بخشی از

در پژوهش‌های یک مدل جدید بر اساس GA برای طراحی و نوسازی سیستم‌های توزیع آب ارائه دادند. نتایج به‌دست آمده از استفاده این مدل نشان داد GA پتانسیل بسیار زیادی برای استفاده در طراحی و مدیریت سیستم‌های توزیع آب دارد. با وجود اینکه آنها بیان کردند مدل GA نیز مانند روش‌های کلاسیک قادر به تضمین جواب بهینه مطلق نیست ولی به دلیل سادگی استفاده از آن در یافتن قطرهای تجاری گسسته در طی انجام فرایند بهینه‌سازی، کارآمدی آن را در مقایسه با سایر روش‌ها به اثبات رسانده است (Savic and Walters, 1997, Farmani et al., 2004).

(Kadu et al., 2008) با اصلاح و بهبود یک مدل بر اساس GA، (Zecchin et al., 2007) با استفاده از الگوریتم تکاملی تفاضلی^۱، (Monem and Kashkooli, 2017) با استفاده از یک الگوریتم ازدحام ذرات اصلاح شده^۲، (Masoumi et al., 2016) با استفاده از الگوریتم مورچه کمینه-بیشینه^۳ از دیگر پژوهش‌هایی هستند که در طراحی سیستم‌های توزیع آب از روش‌های نوین بهینه‌سازی بهره برده‌اند.

بیشتر این پژوهش‌ها، با هدف کمینه کردن هزینه‌های طراحی و لحاظ کردن قید تأمین فشار مطلوب در سطح شبکه برای تمامی گره‌های مصرف در سال افق طرح انجام شده است. نتایج حاصل از این پژوهش‌ها به‌صورت یک طرح بهینه در اختیار مهندسان قرار گرفته و در سال اول اجرا شده تا جواب‌گوی نیاز مصرف‌کنندگان در سال‌های افق طرح باشد. هزینه طراحی و اجرای شبکه‌های آب باعث شد که طرحی مبنی بر استقرار بهینه نواحی مجزا در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از تئوری گراف در شهر بوشهر نیز انجام شود (Shekofteh and Jalili Ghazizadeh, 2020).

اما این طرح‌ها اشکالاتی از جمله در نظر نگرفتن ضریب اطمینان سیستم توزیع آب خصوصاً در مواقع استفاده از شیرهای آتش‌نشانی و شکست لوله‌ها دارند. این امر موجب شد تا پژوهشگران علاوه بر هدف هزینه، هدف ضریب اطمینان را نیز به‌عنوان یک قید یا هدف اصلی دیگر دخیل کنند که برای نمونه می‌توان به (Farmani et al., 2004, Tolson et al., 2004, Tanyimboh, 2017) اشاره کرد.

¹ Differential Evolution Algorithm (DEA)

² Particle Swarm Optimization (PSO)

³ Minimum- Maximum Ant Colony Optimization (MMACO)

⁴ Gray Wolf Optimization (GWO)



توجه به بودجه‌ی تخصیص داده شده به یک سطح قابل قبولی از ضریب اطمینان برسد. کمینه‌سازی هزینه‌های جایگزینی لوله‌ها هدف اول ارتقا است که به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$\text{Cost}_k = \sum_{i=1}^n C_i L_i \quad (1)$$

که در آن

C_i و L_i به ترتیب هزینه واحد طول و طول لوله i ام را نشان می‌دهند.

هدف دوم ارتقا، بیشینه‌سازی ضریب اطمینان سیستم توزیع آب است. به این منظور از دو شاخص برای محاسبه ضریب اطمینان استفاده شد. شاخص ضریب اطمینان اول برای مدل‌سازی توانایی شبکه به گونه‌ای که در تمامی گره‌ها با تأمین فشار کافی شبکه بتواند پاسخ‌گوی نیاز مصرف‌کنندگان باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود (Minaei et al., 2019)

$$RI_{k,1} = \frac{\sum_{i=1}^n \max[1, \min(0, h_i - h_{des,i})]}{n} \quad (2)$$

که در آن

h_i و $h_{des,i}$ به ترتیب هد فشار و هد فشار مطلوب گره i است. این شاخص بیان می‌کند در صورتی که هد گره از هد مطلوب آن بیشتر باشد، اعتمادپذیری ۱۰۰ درصد و در صورتی که کمتر باشد اطمینان‌پذیری آن گره صفر است. به همین اساس اطمینان‌پذیری کل شبکه از طریق محاسبه اطمینان‌پذیری تمام گره‌ها و تقسیم مجموع آن بر تعداد کل گره‌ها محاسبه می‌شود. این شاخص عددی بین صفر تا ۱۰۰ است (Minaei, 2016).

شاخص ضریب اطمینان دوم نیز به صورت مدل‌سازی توانایی سیستم توزیع آب در شرایط حذف لوله‌ای از حلقه‌های شبکه یا به اصطلاح شاخص برگشت‌پذیری تودینی اصلاح شده تعریف شده است (Todini, 2000)

(۳)

$$RI_{k,2} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times q_i^* (H_i - H_{des,i})}{\sum_{z=1}^{n_z} Q_z \times H_z + \sum_{g=1}^{n_p} \left(\frac{P_g}{\gamma}\right) - \sum_{i=1}^n q_i^* \times H_{des,i}}$$

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_{p_i}} D_j}{n_{p_i} \times \max\{D_j\}}$$

سیستم توزیع آب شهر زاهدان پیاده شده است که در آن تلاش شده تا نواقصی که در جمع‌بندی پژوهش‌های پیشین و در پاراگراف قبل قید شد، برطرف شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل بهینه‌سازی و نوسازی سیستم‌های توزیع آب

هر ساله، هزینه‌های زیادی صرف نوسازی شبکه آب‌رسانی در هر شهر می‌شود تا خطرات پوسیدگی و شکست و در نتیجه عواقب ناشی از آن کاهش یابد. رویکرد سنتی بهینه‌سازی برای سیستم‌های آب‌رسانی بر اساس در نظر گرفتن یک جریان طراحی برای پیک تقاضای گره‌ها در سال پایانی عمر شبکه است. اما بر مبنای رویکردهای نوین بهینه‌سازی، شبکه به صورت فاز به فاز و همراه با توسعه‌های شهری ساخته می‌شود (Minaei, 2016).

در این پژوهش، نوسازی و جایگزینی لوله‌های سیستم‌های توزیع آب به صورت چندفازی برای مدیریت کسری بودجه شد. به این صورت که کل دوره طرح به چندین فاز تقسیم‌بندی شد. سپس در هر فاز نوسازی از طریق تعویض و یا تقویت لوله قدیمی به صورت موازی، انجام شد. شماتیک کلی فازبندی ارتقا در شکل ۱ ارائه شده است. همان گونه که مشخص است در شکل ۱-ا فرایند بهینه‌سازی برای فاز ۱ اجرا می‌شود و بر اساس بودجه اختصاص داده شده به طرح ارتقا در این فاز، پاسخ بهینه از نمودار تعامل انتخاب و اجرا می‌شود. در شکل ۱-ب شرایط نهایی فاز ۱، شرایط ابتدایی فاز ۲ است و فرایند بهینه‌سازی برای فاز ۲ اجرا می‌شود تا طرح ارتقا بر اساس بودجه برای این فاز مشخص شود. به همین صورت به تعداد فازهای تعیین شده بهینه‌سازی و طراحی انجام می‌شود.

در هر فاز، مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی توسعه داده شده اجرا شده و با انتخاب بخشی از لوله‌های فرسوده و قدیمی سیستم توزیع آب به گونه‌ای که منجر به افزایش ضریب اطمینان سیستم شود با لحاظ کردن حداکثر تقاضای دبی در تمامی گره‌ها، قيود فشار مطلوب و اجرایی (هر لوله تنها مجاز به یکبار تعویض در طول دوره طرح است) اقدام به بهینه‌سازی و تغییر قطر می‌کند. در نهایت بر اساس بودجه پاسخ بهینه از نمودار تعامل انتخاب می‌شود. طرح انتخاب شده اجرا شده و سیستم توزیع آب وارد فاز بعدی می‌شود. این مراحل تا جایی ادامه پیدا می‌کند که کل سیستم توزیع آب با



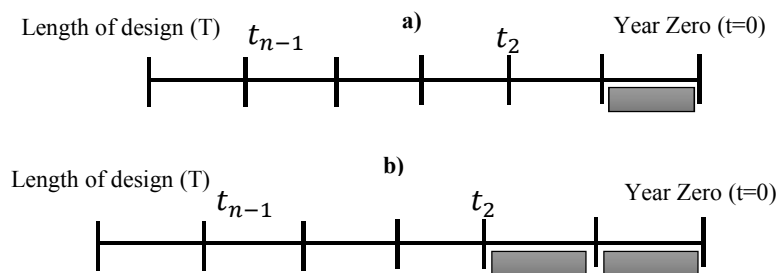


Fig. 1. Steps to upgrade a water distribution system; a) Renovation process and upgrade of water distribution system in phase 1, b) Renovation and upgrading process in phase 2 (Minaei, 2016)

شکل ۱- مراحل ارتقای یک سیستم توزیع آب، (a) فرایند نوسازی و ارتقای سیستم توزیع آب در فاز ۱، (b) فرایند نوسازی و ارتقا در فاز ۲ (Minaei, 2016)

$$\sum_{i \in P} J_i = 0 \quad p = 1, \dots, P \quad (6)$$

$$J_i = \mu L_i (q_i / ch_i)^\gamma \quad (7)$$

که در آنها

P و K به ترتیب تعداد گره‌ها و حلقه‌های شبکه، q_i دبی در لوله i ام، Q_k دبی برداشتی در گره k ، J_i افت انرژی در لوله i ، d_i قطر لوله i ام، ch_i ضریب افت هیزن-ویلیامز در لوله i ام هستند. مدل EPANET در رابطه هیزن-ویلیامز در سیستم SI پارامترهای μ ، γ و λ را به ترتیب برابر $۱/۸۵۲$ ، $۴/۷۲۷$ و $۱۰/۶۶۷$ در نظر می‌گیرد.

گروه دوم این محدودیت‌ها، رعایت ارتفاع معادل انرژی حداقل و حداکثر گره‌ها (معادله ۸) و سرعت حداقل و حداکثر لوله‌ها (معادله ۹) است

$$P_{\min} \leq P_k \leq P_{\max} \quad k = 1, \dots, K \quad (8)$$

$$V_{\min} \leq V_k \leq V_{\max} \quad i = 1, \dots, N \quad (9)$$

که در آنها

P_k فشار در گره k ، P_{\min} و P_{\max} حداقل و حداکثر فشار مجاز در یک گره، V_{\min} و V_{\max} حداقل و حداکثر سرعت مجاز در لوله‌ها هستند. محدوده قطر لوله‌های موجود در بازار (معادله ۱۰)، گروه سوم محدودیت‌ها است

$$d_i \in d \quad i = 1, \dots, N \quad (10)$$

که در آن

$H_{des,i}$ و H_i به ترتیب هد پیزومتریک مطلوب و هد پیزومتریک گره i هستند. q_i^* میزان دبی طراحی گره i ، H_z و Q_z به ترتیب هد و دبی خروجی از مخزن z ، P_g توان پمپ g ، γ وزن مخصوص آب، c_i ضریب اصلاحی شاخص ضریب اطمینان و D_j قطر لوله متصل شده به گره i است.

شاخص ضریب اطمینان نهایی که به عنوان هدف دوم در فرایند بهینه‌سازی پیشینه می‌شود به صورت معادله ۴ است

$$RI_{ave} = \begin{cases} RI_{k,1} & \text{اگر } RI_{k,1} < 1 \\ RI_{k,1} + RI_{k,2} & \text{اگر } RI_{k,1} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

که در آن

اگر حالت ۱ مورد توجه قرار بگیرد شاخص ضریب اطمینان عددی بین صفر تا ۱۰۰ درصد و اگر حالت دوم مورد توجه قرار بگیرد شاخص ضریب اطمینان در محدوده ۱۰۰ تا ۲۰۰ درصد متغیر خواهد بود.

محدودیت‌های بهینه‌سازی موجود در طراحی و ارتقای سیستم‌های توزیع آب به طور معمول به سه گروه تقسیم می‌شود. گروه اول شامل معادلات پیوستگی در گره‌ها و معادلات افت انرژی در لوله‌ها در معادلات ۵، ۶ و ۷ است که حین شبیه‌سازی توسط مدل هیدرولیکی EPANET به صورت ضمنی رعایت می‌شوند (Mansouri and Mohamadizadeh, 2019)

$$\sum_{i \in in(k)} q_i - \sum_{i \in out(k)} q_i = Q_k \quad k = 1, \dots, K \quad (5)$$



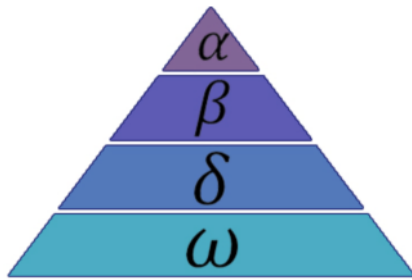


Fig. 2. Hierarchy of grey wolf (dominance decreases from top down) (Mirjalili et al., 2014)

شکل ۲- سلسله مراتب گرگ خاکستری (کاهش اختیارات از بالا به پایین) (Mirjalili et al., 2014)

دسته جمعی گرگ‌ها و نحوه شکار طعمه در طبیعت است. زندگی دسته جمعی گرگ‌ها یک سلسله مراتب اجتماعی بسیار دقیق و منظم دارد. شکل ۲ سلسله مراتب زندگی گروهی گرگ‌ها را نشان می‌دهد (Hoseyni et al., 2019, Mirjalili et al., 2014).

در راس هرم رهبران گروه قرار دارند که به گرگ آلفا (α) یا گرگ غالب معروف هستند و مدیریت و مسئولیت تصمیم‌گیری‌های گله را به عهده دارند. رده دوم این هرم، متعلق به گروه بتا (β) است که وظیفه آن کمک به گرگ آلفا در تصمیم‌گیری‌ها و سایر فعالیت‌های گروه است. در پایین‌ترین رده این سلسله مراتب، گرگ‌های امگا (ω) قرار دارند که معمولاً از تمام گرگ‌های سطوح بالا پیروی می‌کنند. رده دیگر این سلسله مراتب را گرگ‌های دلتا (δ) تشکیل می‌دهند که تحت پیروی از فرمان گرگ آلفا و بتا هستند، با این حال بر گرگ امگا غالب است (Hoseyni et al., 2019, Mirjalili et al., 2014).

مراحل اصلی شکار دسته جمعی گرگ‌های خاکستری را می‌توان به صورت مراحل زیر طبقه‌بندی کرد (Hoseyni et al., 2019, Muro et al., 2011):

- ردیابی، تعقیب و نزدیک شدن به طعمه
 - دنبال کردن، محاصره و خسته کردن شکار تا زمان توقف کامل آن
 - حمله به طعمه
- برای شبیه‌سازی ریاضی الگوریتم گرگ خاکستری، فرض بر این است که گرگ آلفا (بهترین راه‌حل منتخب)، بتا و دلتا از نظر موقعیت شکار و طعمه، برازندگی و دانش بهتری دارند که ابتدا

که در آن

d_i قطر لوله λ_m و d لیست قطر لوله‌های موجود در بازار است. برای حل مسئله بهینه‌سازی مذکور، از روش تابع جریمه^۱ برای اعمال کردن قیود در تابع هدف استفاده می‌شود. هنگام ایجاد گزینه‌های قابل قبول، مدل توسعه داده شده تنها مجاز به انتخاب قطرهای استاندارد موجود در بازار است که به این ترتیب محدودیت مربوط به قطر لوله‌ها نیز رعایت می‌شود. بر این اساس توابع هدف مسئله به صورت معادلات ۱۱ و ۱۲ بازنویسی می‌شود (Minaei, 2016)

(۱۱)

$$\text{Objective Functions} \begin{cases} \text{Min } F_1 = \sum_{i=1}^N C_i L_i + \beta * \text{CSV} \\ \text{Max } F_2 = \text{RI}_{\text{ave}} \end{cases}$$

(۱۲)

$$\text{CSV} = \sum_{j=1}^{N_j} \left(\left[\max \left(\frac{P_j}{P_{\max}} - 1 \text{ and } 0 \right) \right]^2 + \left[\max \left(1 - \frac{P_j}{P_{\min}} \text{ and } 0 \right) \right]^2 \right) + \sum_{i=1}^{N_P} \left(\left[\max \left(\frac{V_i}{V_{\max}} - 1 \text{ and } 0 \right) \right]^2 + \left[\max \left(1 - \frac{V_i}{V_{\min}} \text{ and } 0 \right) \right]^2 \right)$$

که در آن

CSV تابع جریمه است و در صورتی اعمال می‌شود که محدودیت‌های مربوط به سرعت جریان یا فشار در محدوده مجاز قرار نگیرند. همچنین β پارامتر جریمه است که مقدار آن توسط کاربر انتخاب می‌شود. در اینجا برای بیان صحیح تابع جریمه از تابع پله‌ای^۲ (He) استفاده شده است. تابع روی مجموعه اعداد حقیقی را یک تابع پله‌ای گویند، اگر آن را بتوان به صورت ترکیب خطی از توابع نشانگر روی یک فاصله متناهی تعریف کرد، مقدار تابع پله‌ای He به ازای مقدار منفی، برابر با صفر و برای مقدار مثبت، برابر ۱ می‌شود.

۲-۲- الگوریتم گرگ خاکستری

الگوریتم گرگ خاکستری توسط میرجلیلی و همکاران در سال ۲۰۱۴ ارائه شد. این الگوریتم به دلیل توانمندی زیاد در حل مسائل پیچیده و بزرگ مقیاس بهینه‌سازی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت. ایده اصلی این الگوریتم الهام گرفته شده از زندگی

1 Penalty Function
2 Heaviside (He)



در وضعیت گام بعدی و X_α ، X_β و X_δ به ترتیب موقعیت گرگ آلفا، بتا و دلتا هستند. شماتیک چگونگی محاصره پاسخ نهایی در درون یک دایره به واسطه گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا در فضای جستجو و نیز تعیین موقعیت گروه امگا در شکل ۳ نشان داده شده است (Mirjalili et al., 2014).

در این پژوهش، ضرایب زبری لوله‌ها به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری و کمینه‌سازی اختلاف بین مقدار فشار محاسباتی و اندازه‌گیری شده به عنوان تابع هدف لحاظ شدند. همچنین، از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری برای یافتن متغیرهای تصمیم در هر مرحله در ارتباط با مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی EPANET استفاده شد. فلوچارت ارتباط بین مدل بهینه‌سازی و شبیه‌سازی در شکل ۴ ارائه شده است.

۳- مطالعه موردی

شهر زاهدان دو شبکه آب دارد که شبکه آب شماره ۱ در قسمت شمال شرقی شهر بوده و بافت قدیمی دارد و بخشی از این شبکه اخیراً مورد اصلاح و توسعه قرار گرفته است. شبکه آب شماره ۲ عمر کمتری نسبت به شبکه آب شماره ۱ دارد که در حال رشد و توسعه است و آب شرب آن از طریق چاه نیمه‌های زابل تأمین می‌شود.

به عنوان بهترین پاسخ‌ها در فضای جست‌وجو ذخیره می‌شوند و سپس گرگ‌های امگا موقعیت خود را در فضای جست‌وجو نسبت به گرگ آلفا به روزرسانی می‌کنند. به عبارتی، ابتدا موقعیت شکار توسط گروه آلفا، بتا و دلتا تخمین زده می‌شود سپس دیگر گرگ‌ها متناسب با موقعیت تخمین زده شده به طور تصادفی حول شکار حلقه می‌زنند. فرمول‌بندی ریاضی چگونگی تغییر مکان گرگ‌ها در معادلات ۱۳ تا ۱۵ ارائه شده است

$$\begin{cases} \vec{D}_\alpha = |C_1 \times X_\alpha - X| \\ \vec{D}_\beta = |C_2 \times X_\beta - X| \\ \vec{D}_\delta = |C_3 \times X_\delta - X| \end{cases} \Rightarrow C_t = 2 \times r_1 \quad (13)$$

$$\begin{cases} X_1 = X_\alpha - A_1 \times \vec{D}_\alpha \\ X_2 = X_\beta - A_2 \times \vec{D}_\beta \\ X_3 = X_\delta - A_3 \times \vec{D}_\delta \end{cases} \Rightarrow A_t = 2 \times a \times r_2 - a \quad (14)$$

$$X_{t+1} = \text{mean}(X_1, X_2, X_3) \quad (15)$$

که در آنها

C_t و A_t به ترتیب بیانگر بردارهای ضرایب به سمت بهترین موقعیت و r_1 و r_2 بردارهای تصادفی در بازه صفر تا ۱ هستند. a ضریبی است که در فرایند تکرار در بازه صفر تا ۲ به صورت خطی کاهش می‌یابد. X موقعیت متغیر در وضعیت کنونی، X_{t+1} موقعیت متغیر

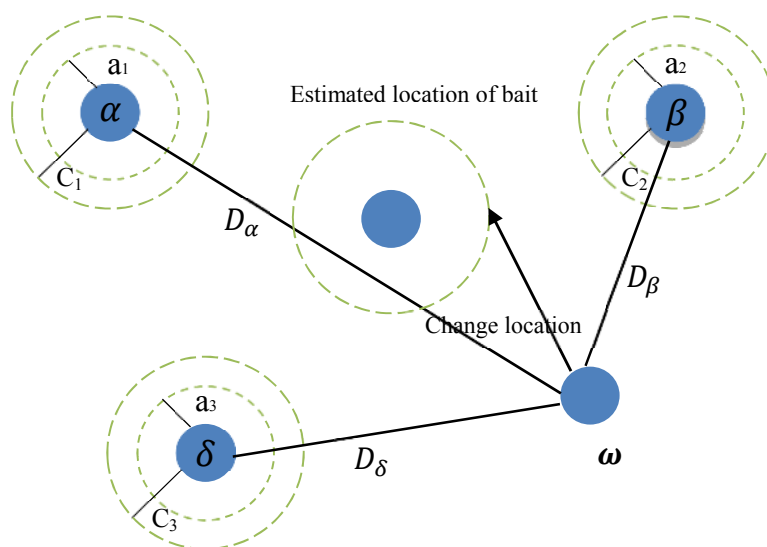


Fig. 3. Position updating in GWO (Mirjalili et al., 2014)
شکل ۳- موقعیت به روزرسانی GWO (Mirjalili et al., 2014)



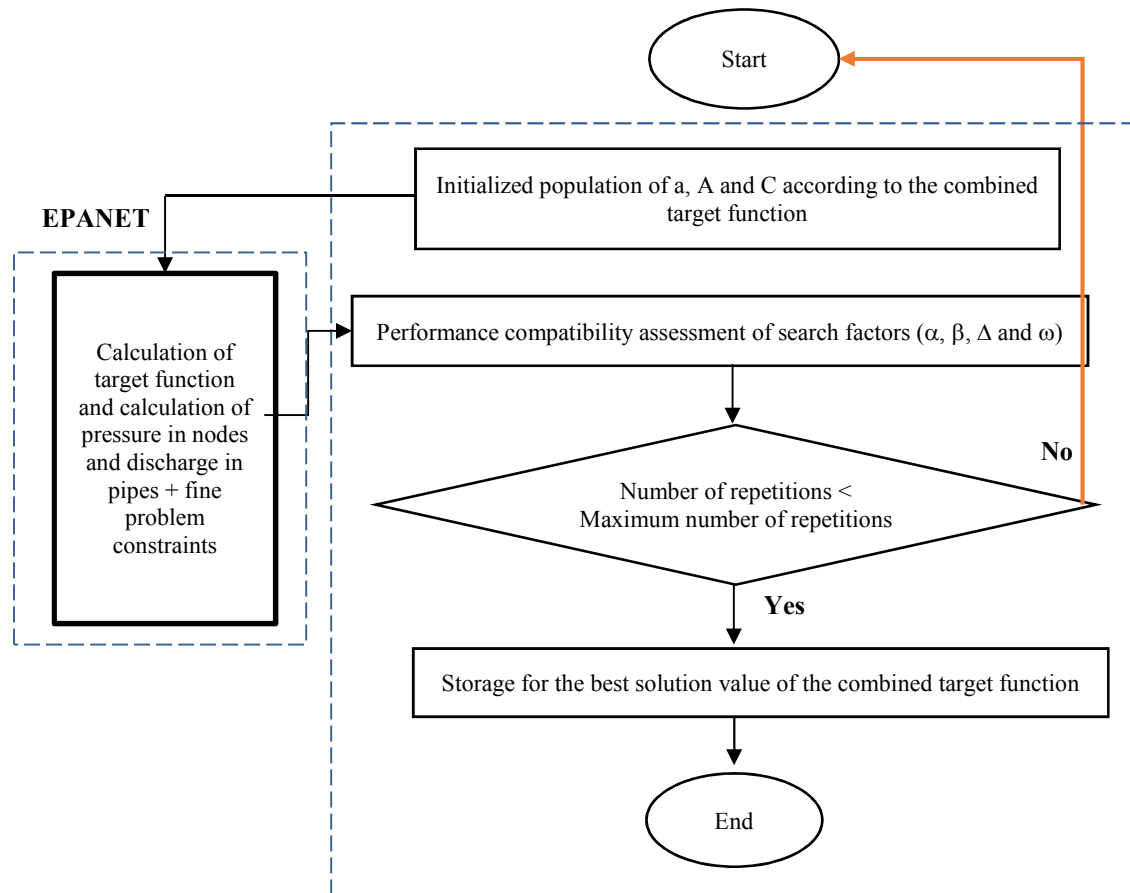


Fig. 4. Flowchart of the relationship between the gray wolf algorithm and the EPANET model
 شکل ۴- فلوچارت ارتباط بین الگوریتم گرگ خاکستری و مدل EPANET

به صورت قطعی در نظر گرفته شد که با طول زمان به صورت خطی طبق معادله ۱۶ تغییر می‌کند

$$De_{k,i} = De_{0,i} \times (1 + (\beta \times k)) \quad (16)$$

که در آن

$De_{k,i}$ تقاضای گره i در فاز k ، $De_{0,i}$ تقاضای گره i در سال صفر، β نرخ رشد تقاضای هر گره که در این پژوهش برابر 0.166 در نظر گرفته شد (Minaei et al., 2019).

همچنین با توجه به اینکه ضرایب زبری لوله‌ها با گذشت زمان تغییر می‌کند از معادله ۱۷ برای مدل‌سازی این تغییرات در افق طرح استفاده شد

سیستم توزیع آب مورد مطالعه، بخشی از سیستم توزیع آب ۱۳۲ لوله‌ای و ۱۳۱ گره‌ای شهر زاهدان در جنوب شرق کشور ایران است که به صورت ثقلی یک مخزن هوایی که از طریق ایستگاه پمپاژ ابتدای شبکه پر می‌شود، از گره شماره ۱ تغذیه می‌کند (شکل ۵). بر اساس فشارسنجی انجام شده توسط پژوهشگران در زمستان و بهار ۱۳۹۸ در نقاط مختلف و کالیبراسیون هیدرولیکی سیستم توزیع آب مقدار فشار گره‌های به دست آمده برای شبکه مورد مطالعه، حاکی از این است که شبکه در وضعیت نامطلوبی به سر می‌برد به گونه‌ای که تعداد کمی از گره‌ها فشار مطلوب دارند (شکل ۶).

پیکربندی شبکه نیز در طول افق طرح به طور ثابت لحاظ شده و تنها نوسازی شبکه مورد توجه قرار گرفت. تقاضا در گره‌ها



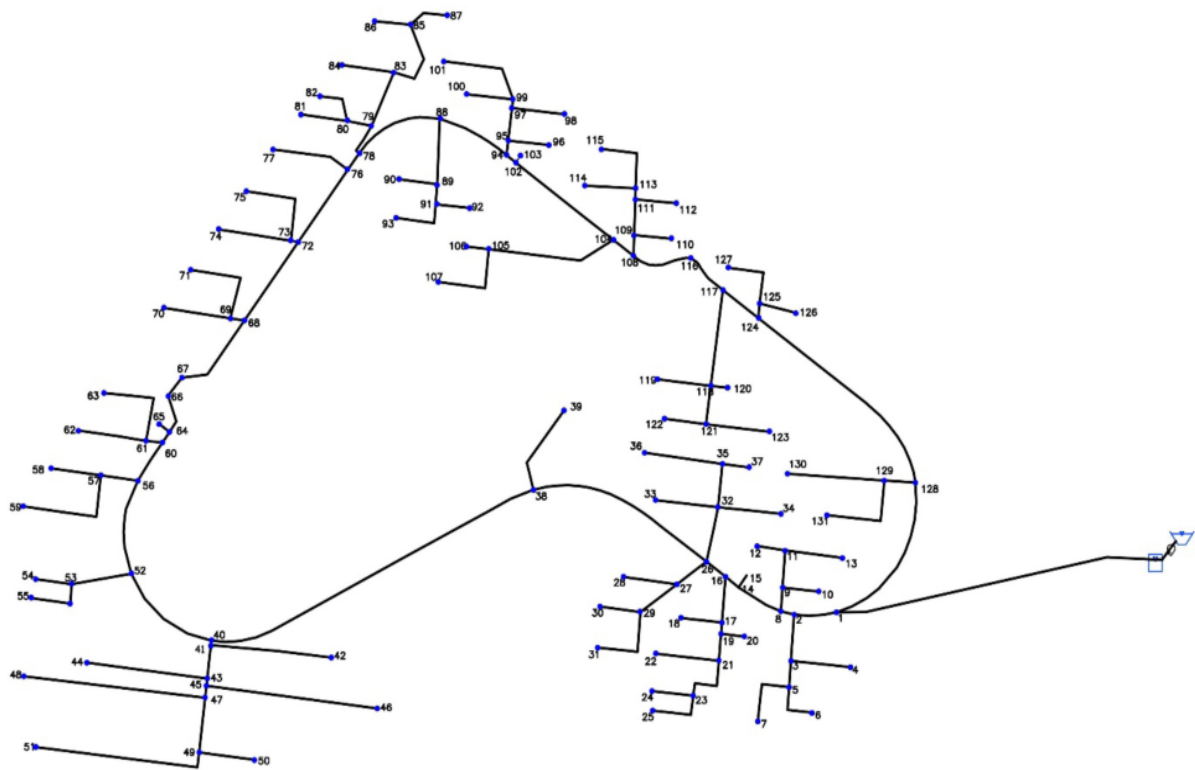


Fig. 5. The schematic of water distribution system studied
 شکل ۵- شماتیک سیستم توزیع آب مورد مطالعه

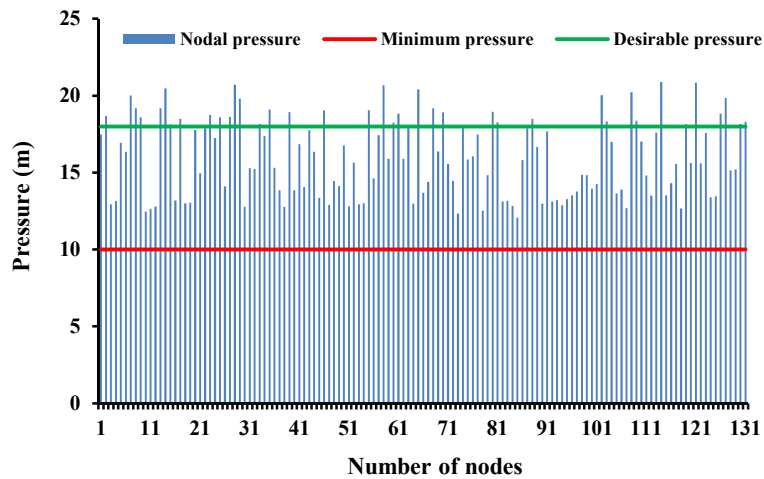


Fig. 6. The pressure situation of the nodes of the studied water distribution system
 شکل ۶- وضعیت فشار گره‌های سیستم توزیع آب مورد مطالعه

$Ce_{k,j} = Ce_{0,j} + (e \times k)$ (۱۷)
 ضریب زبری لوله زدر فاز k , $Ce_{0,j}$ ضریب تقاضای لوله زدر
 سال صفر، e نرخ کاهش ضریب زبری هر لوله است که در این
 پژوهش برابر 0.78 در نظر گرفته شد (Minaei et al. 2019). که در آن



جدول ۲- پارامترهای مربوط به الگوریتم گرگ خاکستری

Table 2. The setting parameters of GWO

Parameter	Symbol	Amount
Number of wolves	n	30
Maximum number of repetitions	t	1000

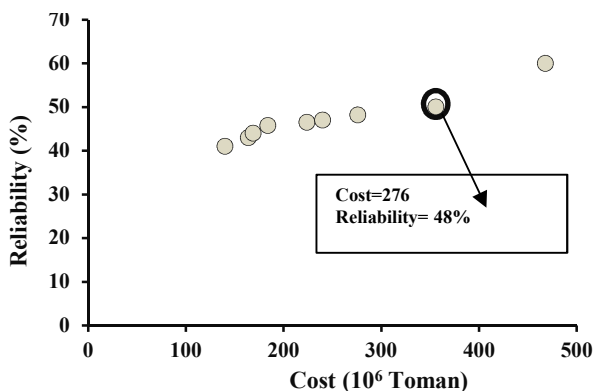


Fig. 7. The trade-off between the upgrading cost and reliability in phase 1

شکل ۷- نمودار پرتو نوسازی شبکه در فاز اول

جدول ۳- جزئیات نمودار پرتو به دست آمده در فاز ۱

Table 3. The details of design in phase 1

Row	Reliability (%)	Cost (Million Toman)
1	41	140
2	43	164
3	44	169
4	45.8	183
5	46.5	224
6	47	240
7	48.2	276
8	50	356
9	60	468

با لحاظ کردن طول طرح و هر فاز به ترتیب برابر ۲۰ و ۵ سال مدل بر روی مطالعه موردی برای فاز اول اجرا شد. به گونه ای که مدل برای بهبود ضریب اطمینان شبکه، مجاز به انتخاب تعداد محدودی از لوله‌ها در هر فاز (به عنوان مثال: ۲۵ لوله از ۱۳۲) است. نتایج حاصل از اجرای مدل بر روی جبهه پرتو^۱ بین توابع هدف هزینه نوسازی و ضریب اطمینان دوره طرح ارائه شده است (شکل ۷ و جدول ۳). با توجه به پاسخ‌های به دست آمده بر روی

¹ Pareto

میزان فشار مطلوب و فشار سرویس در گره‌ها برای کل افق طرح به ترتیب برابر ۱۸/۱۰ متر است. همچنین به منظور جلوگیری از ایجاد رسوب در لوله‌ها به دلیل سرعت کم جریان و جلوگیری از وقوع پدیده ضربه قوچ به دلیل سرعت زیاد، محدوده حداقل و حداکثر سرعت مجاز جریان در لوله‌ها به ترتیب برابر ۰/۷ و ۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. برای نوسازی و ارتقای سیستم توزیع آب مورد مطالعه از ۱۴ قطر مجاز موجود در بازار استفاده شد. مقدار قطر اسمی و داخلی لوله‌ها به همراه هزینه‌های واحد طول خرید، حمل و نقل و جاگذاری لوله‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات لوله‌های نو و هزینه واحد طول، D_N قطر خارجی،

D قطر داخلی (۲۹)

Table 1. The details of new pipes with their unit D_N : commercial diameter, D : internal diameter

D_N (mm)	D (mm)	Unit cost (Rial/m)
63	53.60	325000
75	63.80	379500
90	76.60	456500
110	93.80	586000
125	106.6	726000
160	136.4	1049000
200	170.6	1475000
250	213.2	2193000
315	268.2	3340000
400	341.2	5199000
450	383.89	6605500
630	537.5	12401000
710	605.77	15071000
800	682.58	18996000

۴- نتایج و بحث

یافتن مقدار بهینه پارامترهای تنظیمی الگوریتم‌های فراکاوشی برای حل مسائل بهینه‌سازی اهمیت زیادی دارد، زیرا تأثیر به‌سزایی در رسیدن به همگرایی و یافتن پاسخ بهینه دارد. در این پژوهش بهترین مقدار پارامترهای تنظیمی الگوریتم GWO شامل تعداد گرگ‌ها و حداکثر تعداد تکرار الگوریتم، پس از چندین بار اجرای مدل به نحوی تنظیم شد که الگوریتم بهترین عملکرد را داشته باشد، مقدار بهینه این پارامترها در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین مقدار ضریب جریمه (α) برای استفاده از تابع جریمه پس از سعی و خطا برابر با 10^{11} تعیین شد.



انتخاب شد و قطر ۲۲ لوله از مجموع لوله‌های شبکه، نوسازی شد. نتایج حاصل از اجرای مدل برای سایر فازهای مورد مطالعه نیز به صورت نمودار پرتو در شکل ۸ ارائه شده است. طبق فاز ۱، در فازهای ۲ و ۳ نیز با انتخاب یک پاسخ وارد فاز بعدی شده تا با مدیریت صحیح بودجه بتوان شبکه را از حالت کم‌توان به یک حالت پرتوان ارتقا داد. در نتیجه در فاز ۴ با انتخاب یک پاسخ بهینه از روی نمودار پرتو می‌توان مشاهده کرد که رویکرد ارائه شده توانسته است به‌گونه صحیحی علاوه بر افزایش توان هیدرولیکی شبکه، بودجه را نیز به‌خوبی مدیریت کند. نمودار فشار شبکه پس از پایان طراحی و در فاز ۴ در شکل ۹ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با لحاظ کردن تغییرات تقاضا و ضرایب زبری لوله‌ها در طول زمان طرح، همچنان سطح فشار در شبکه بالاتر از سطح مطلوب خود است که نشان‌دهنده برتری و عملکرد خوب روش به‌کار برده شده است.

نمودار پرتو می‌توان بر اساس بودجه اختصاص داده شده و سطح قابلیت اطمینان موردانتظار اقدام به نوسازی سیستم توزیع آب کرد. همان‌گونه که از جدول ۳ و شکل ۷ مشخص است الگوریتم گرگ خاکستری توانسته ۹ پاسخ بهینه ارائه دهد. کمترین هزینه طراحی ۱۴۰ میلیون تومان با ضریب اطمینان ۴۱ درصد و بیشترین هزینه طراحی ۴۶۸ میلیون تومان با ضریب اطمینان ۶۰ درصد بر روی نمودار پرتو موجود است. بر اساس این پاسخ‌ها کارفرما می‌تواند با توجه به بودجه اختصاص داده شده یکی از طرح‌های بهینه را انتخاب کرده و وارد فاز طراحی بعدی شود. به این صورت در فازهای بعدی با نوسازی سایر لوله‌های باقیمانده می‌توان سطح ضریب اطمینان شبکه را به‌گونه‌ای افزایش داد که منجر به صرفه‌جویی و مدیریت در بودجه اختصاص داده شده شود. در این فاز طرح شماره ۷ با ۲۷۷ میلیون تومان هزینه طراحی و ۴۸/۵ درصد ضریب اطمینان طرح به‌عنوان یک پاسخ بهینه

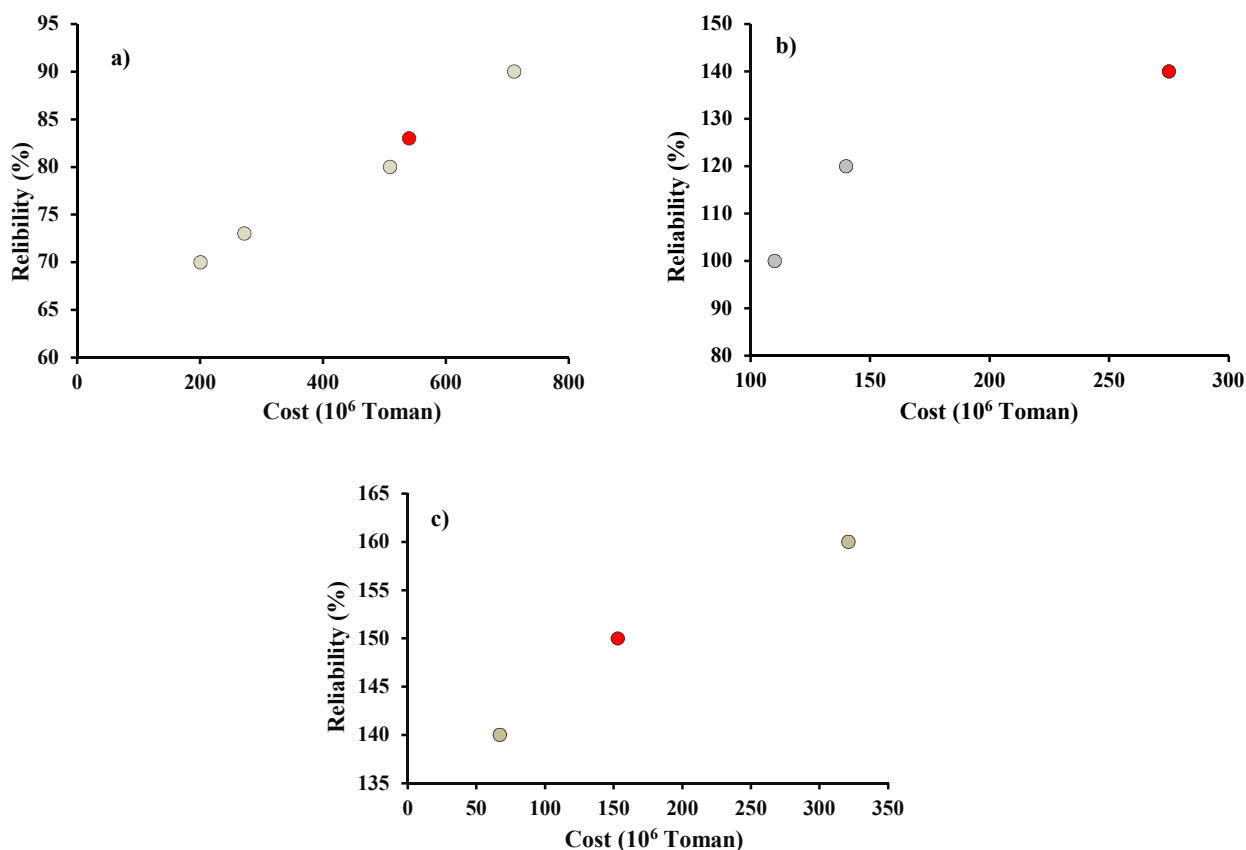


Fig. 8. The trade-off between the upgrading cost and reliability in different phases a) phase 2, b) phase 3 and c) phase 4
 شکل ۸- نمودارهای پرتو طراحی فازها، (a) فاز ۲، (b) فاز ۳، (c) فاز ۴



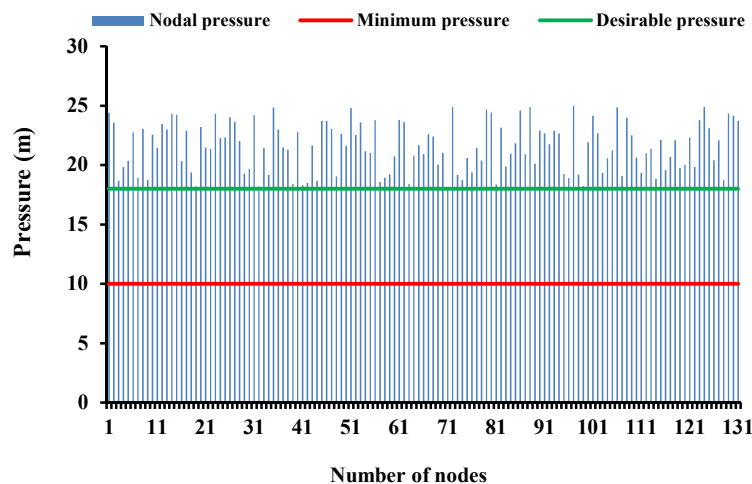


Fig. 9. Pressure status at the network after renovation in phase 4

شکل ۹- وضعیت فشار در سطح شبکه پس از نوسازی در فاز ۴

جدول ۴- جزئیات نمودار پرتو به دست آمده در فاز ۴

Table 4. The details of design in phase 4

Pipe number	15	17	22	33	35	43	54	62	81	85	87	89	116
Nominal diameter (mm)	315	160	90	110	250	125	200	450	135	250	125	450	200
Project cost (Million Tomans)	153												
Reliability (%)	150%												

می‌گذارد. در رویکرد به‌کار رفته در این پژوهش، کل دوره طرح فازبندی شده و در هر فاز بر اساس بودجه موجود و تقاضای گره‌ای در پایان همان فاز و فازهای بعدی، طراحی انجام می‌شود. در این پژوهش لحاظ کردن تغییرات خطی ضرایب تقاضا و زبری لوله‌ها در طول افق طرح منجر به ارائه طرحی با سطح ضریب اطمینان بالا شد که در مقایسه با طراحی سنتی که در آن، طراحی تنها بر اساس یک سناریو تقاضا انجام می‌شود، طرحی با انعطاف‌پذیری بالا در مقابل عدم قطعیت تقاضا و زبری ارائه شد. همچنین طراحی و اجرا فاز به فاز شبکه در مقایسه با اجرای کامل، طرحی با صرفه‌ی اقتصادی ایجاد می‌کند.

برای شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی سیستم توزیع آب از دو شاخص ضریب اطمینان به‌صورت تأمین فشار مطلوب در گره‌ها در شرایط عادی و همچنین وقوع حوادث شکست استفاده شد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی به‌صورت مجموعه‌ای پاسخ بر روی یک جبهه پرتو در هر فاز به‌صورت جدا ارائه شد.

مقدار قطرهای بهینه انتخاب شده در فاز ۴ در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به این جدول مشخص است پس از پایان فاز طراحی و پایان دوره طرح، ضریب اطمینان شبکه در حدود ۱۵۰ درصد است.

۵- نتیجه‌گیری

اجرای یک‌جای شبکه‌های آب‌رسانی، غیرممکن است و باید زمان‌بر بودن اجرا در طراحی‌ها لحاظ شود. از طرفی، معمولاً توسعه شهرها، بر اساس طراحی‌های انجام شده صورت نمی‌گیرد که باید با طراحی فاز به فاز، شبکه را در مقابل عدم قطعیت تقاضای گره‌ها، منعطف کرد (Minaei, 2016).

در این پژوهش، مشابه پژوهش مینایی (Minaei, 2016) با توجه به بودجه، لوله‌های تعویضی در فاز k مشخص شده که بین هزینه و اعتمادپذیری، تعادل ایجاد می‌کند. در واقع، پس از بررسی در هر فاز، تنها لوله‌های معیوب تعویض می‌شوند که به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای در سرعت اجرا و کاهش هزینه‌ها تأثیر



۶- قدردانی

نویسندگان پژوهش، از مسئولان شرکت آب و فاضلاب استان سیستان و بلوچستان، به دلیل همکاری لازم در انجام بخش میدانی این پژوهش و همچنین در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز، تشکر می‌کنند.

با این رویکرد جدید کارفرما می‌تواند در هر فاز بر اساس بودجه‌ی در دسترس بهترین طرح را انتخاب کند. با این رویکرد بخشی از شبکه توزیع آب شهر زاهدان که وضعیت نامطلوبی داشت، نوسازی شد. مشخص شد استفاده از رویکرد ارائه شده منجر به افزایش اطمینان پذیری شبکه و کاهش و صرفه جویی در هزینه‌های طراحی می‌شود.

References

- Alperovits, E. & Shamir, U. 1977. Design of optimal water distribution systems. *Water Resources Research*, 13(6), 885-900.
- Farmani, R., Savic, D. A. & Walters, G. A. 2004. The simultaneous multi-objective optimization of any town pipe rehabilitation, tank sizing, tank siting, and pump operation schedules. *World Water and Environmental Resources Congress*. Salt Lake City, Utah, United States.
- Fujiwara, O. & Khang, D. B. 1990. A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks. *Water Resources Research*, 26(4), 539-549.
- Ghorbani Dastgerdi, V. 2015. Multiobjective optimization of water distribution networks (WDNs) with mixed reliability index using classic and fuzzy violation function. M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology. Isfahan, Iran. (In Persian)
- Goulter, I. C. & Morgan, D. R. 1985. An integrated approach to the layout and design of water distribution networks. *Civil Engineering Systems*, 2(2), 104-113.
- Hoseyni, A. S. Givehchi, M. & Jafari-Asl, J. 2019. Geometric optimization of labyrinth spillways and improvement of hydraulic performance using gray wolf algorithm. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(6), 1589-1600. (In Persian)
- Karimi Darmian, M. 2014. Pressure calibration and its management in Zahedan urban water distribution network using WATER GEMS model. MSc. Thesis, University of Sistan and Baluchestan. Zahedan, Iran. (In Persian)
- Kadu, M. S., Gupta, R. & Bhave, P. R., 2008. Optimal design of water networks using a modified genetic algorithm with reduction in search space. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(2), 147-160.
- Mansouri, R. Mohammadizadeh, M., 2019. Applied of central force algorithm (CFO) in optimization of irrigation water distribution network. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 31(1), 101-114. (In Persian)
- Masoumi, M., Kashkooli, B. S., Monem, M. J. & Montaseri, H. 2016. Multi-objective optimal design of on-demand pressurized irrigation networks. *Water Resources Management*, 30(14), 5051-5063.
- Mazaherizadeh, M. Faridhosseini, A. & Davari, K. 2019. Multi objective design of water distribution system using todini's resilience index and improving the strength pareto evolutionary algorithm. *Journal of Water and Wastewater*, 30(6), 18-34. (In Persian)
- Minaei, A. 2016. Renewing the water distribution network using the multi-objective decision making. MSc. Thesis, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. (In Persian)
- Minaei, A., Haghghi, A. & Ghafouri, H. R. 2019. Computer-aided decision-making model for multiphase upgrading of aged water distribution mains. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(5), p.04019008.



- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M. & Lewis, A. 2014. Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61.
- Monem, M. J. & Kashkooli, B. S. 2017. New discrete particle swarm optimization applied to the design of pressurized irrigation networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(1), p.04016071.
- Muro, C., Escobedo, R., Spector, L. & Coppinger, R. P. 2011. Wolf-pack (canis iupus) hunting strategies emerge from simple rules in computational simulations. *Behavioural Processes*, 88(3), 192-197.
- Savic, D. A. & Walters, G. A. 1997. Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123(2), 67-77.
- Shekofteh, M. R. & Jalili Ghazizadeh, M. R. 2020. The optimized implementation of the district metered areas in the water distribution networks using graph theory. *Journal of Water and Wastewater*, 31(1), 12-24. (In Persian)
- Simpson, A. R., Murphy, L. J. & Dandy, G. C. 1993. Pipe network optimization using genetic algorithms. *Water Resources Planning and Management Division Specialty Conference*, Seatel, Washington, USA.
- Soltani, J. & Rezapour Tabari, M. 2012. Determination of effective parameters in pipe failure rate in water distribution system using the combination of artificial neural networks and genetic algorithm. *Journal of Water and Wastewater*, 23(3), 2-15. (In Persian)
- Tabesh, M. & Soltani, J. 2005. Evaluation of mechanical reliability of urban water distribution networks using artificial neural networks for optimal operation management. *2nd Conference on Water Resources Management*, Isfahan University of Technology. Iran. (In Persian)
- Taheri Hosseinabadi, S. 2015. Providing a composite index of reliability in order to assess the sustainability of urban water distribution networks. M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology. Iran. (In Persian)
- Tanyimboh, T. T. 2017. Informational entropy: a failure tolerance and reliability surrogate for water distribution networks. *Water Resources Management*, 31(10), 3189-3204.
- Todini, E. 2000. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2(2), 115-122.
- Tolson, B. A., Maier, H. R., Simpson, A. R. & Lence, B. J. 2004. Genetic algorithms for reliability-based optimization of water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(1), 63-72.
- Zecchin, A. C., Maier, H. R., Simpson, A. R., Leonard, M. & Nixon, J. B., 2007. Ant colony optimization applied to water distribution system design: comparative study of five algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(1), 87-92.



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

