

(OPEN ACCESS)

Optimization of Water Distribution Network Design Using WaterGEMS and Sequential Quadratic Programming Algorithm: A Case Study of Birjand Zaferanieh Network

Mahdi Naseri^{*1}, Raziye Shamsirgaran²

1. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran. E-mail: mnaseri@birjand.ac.ir
2. Ph.D. Student in Water Resources Engineering and Management, University of Birjand, Birjand, Iran. E-mail: r.shamsirgaran@birjand.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Full Paper</p> <p>Article history: Received: 06.02.2025 Revised: 07.08.2025 Accepted: 08.18.2025</p> <p>Keywords: Cost reduction, Hydraulic simulation, Optimization, Pipe design, Sequential Quadratic Programming (SQP), Water distribution network</p>	<p>Background and Objectives: Urban water distribution networks (WDNs) account for over 80 % of total water-supply costs in semi-arid regions such as Birjand, Iran. In the Zaferanieh residential district, anticipated increases in water demand through the planning horizon of 1433 necessitate a cost-effective and hydraulically reliable network design. This study introduces an integrated methodology-referred to as SQP-WDN-that concurrently leverages detailed hydraulic simulation in Bentley WaterGEMS and constrained nonlinear optimization via the Sequential Quadratic Programming (SQP) algorithm in MATLAB. The main objective of this method is to determine the optimal pipe diameters that minimize total network investment while ensuring all hydraulic constraints, including minimum node pressures and allowable flow velocities, are rigorously satisfied.</p> <p>Materials and Methods: The target network comprises 21 demand nodes and 27 pipeline segments, modeled in WaterGEMS using high-resolution topographic maps and nodal elevation data ranging from 1485 to 1565 m above mean sea level. Hourly water demand at each node; varying from approximately 1.06 m³/h to 17.67 m³/h; was estimated by averaging results obtained from three demand-estimation techniques (geometric, arithmetic, and Fire's method). All pipes were assigned a Hazen-William's roughness coefficient of $C = 130$. Hydraulic constraints imposed on the system included a maximum allowable flow velocity of 2.0 m/s, a minimum permissible velocity of 0.3 m/s. Additionally, the minimum required pressure at all nodes was defined as 30 meters of water head. In the initial network configuration, the principal reservoir (Node R-1) was fixed at an elevation of 1565 m and supplied flow at a steady rate of 37.9 L/s through pipe segment 27 to Node J-20 (elevation 1521.8 m). WaterGEMS was used to perform steady-state hydraulic simulations, applying the Hazen-Williams's formulation to calculate head losses. Critical sections, where simulated nodal pressures dropped below the defined minimum under peak-demand conditions, were identified, indicating the necessity of an optimization procedure to ensure sufficient pressure throughout the network. To address the pipe-sizing problem, the SQP algorithm was</p>

implemented in MATLAB. The objective function was formulated to minimize the total cost of all pipeline segments, with each segment's cost determined by a cost-diameter polynomial calibrated to prevailing market prices. A velocity-penalty term was incorporated into the objective so that, if a candidate pipe diameter resulted in flow velocity exceeding 2.0 m/s or falling below 0.3 m/s, the objective value increased substantially, rendering that diameter choice suboptimal. The primary design constraints included mass-balance at each node (net inflows equal net outflows) and maintenance of nodal pressures within the allowable range. To automate the iterative coupling between WaterGEMS and MATLAB, a VBA script was developed in WaterGEMS to export simulation outputs (nodal pressures, pipe flows, lengths, and nominal diameters) into an Excel workbook after each simulation. MATLAB then ingested these data, evaluated the objective function and constraints, and updated pipe diameters accordingly. In the subsequent iteration, MATLAB recorded the revised diameters back into the Excel file, and WaterGEMS reran the hydraulic simulation. This bidirectional data exchange continued until convergence criteria were met-specifically, when successive changes in the total cost and pipe diameters fell below predefined tolerances. Prior to applying SQP-WDN to the Zafaranyeh network, the methodology was validated on the benchmark two-loop network introduced by Alperovitz and Shamir. This validation network comprised seven nodes and eight identical 1000 m pipelines (Hazen-Williams $C = 130$) supplied by a reservoir at 210 m elevation, with a fixed minimum head requirement of 30 m at each node. After performing SQP optimization on this benchmark, the resulting pipe diameters, nodal pressures, and total network cost were compared against established results from widely cited studies. The total cost achieved was approximately USD 420 000, which closely matched published values. This agreement confirmed the accuracy and reliability of the hydraulic model in WaterGEMS and the SQP-based optimization routine in MATLAB.

Results: Following successful validation, SQP-WDN was deployed on the Zafaranyeh network. For each of the 27 pipeline segments, the “theoretical” diameter output by SQP was compared to the nearest commercially available nominal size that was equal to or larger than the computed diameter. In eight segments (Nos. 1, 4, 5, 6, 7, 13, 14, and 27), the computed diameters exactly matched standard market sizes. For example, in Segment 27-which serves as the main feed from the reservoir (Node R-1) to the network-SQP recommended a 250 mm pipe, corresponding precisely to a commercially stocked 250 mm diameter. This choice ensured that terminal node pressures remained above 60.15 m of head, thereby satisfying all minimum pressure requirements. The remaining 19 segments were each assigned the next larger standard diameter to introduce a hydraulic safety margin and reduce head losses in critical branches. For instance, Segment 2's SQP-computed diameter was approximately 79.49 mm, but the nearest available size was 90 mm; adopting 90 mm-maintained Node J-2's minimum pressure above 66.14 m under peak-demand conditions. Overall, selecting slightly larger commercial sizes for susceptible segments reduced head loss in critical pipelines, enhanced pressure stability, and mitigated the risk of substandard performance due to construction tolerances or future demand fluctuations. After reconciling computed diameters with market-available sizes, the total capital cost of the Zafaranyeh distribution network was estimated at

21 623 954 000 IRR (approximately USD 485 000 at the 2025 exchange rate). Although this figure is marginally higher than the theoretical cost if exact diameters (that may not exist commercially) were used, it represents a practical and cost-effective solution given market constraints. Steady-state simulations of the final network configuration confirmed that, under both normal and peak-demand scenarios, all nodal pressures exceeded their respective minimum thresholds and all flow velocities remained within the allowable range of 0.3-2.0 m/s. Graphical outputs further illustrated that branches where velocities were previously near the upper limit achieved a significant reduction in flow velocity after adopting the larger commercial diameters; head losses in these branches decreased accordingly, leading to improved overall hydraulic performance.

Conclusion: The combined SQP–WDN framework successfully reduced the investment cost of the Zafaraniyeh WDN while guaranteeing satisfactory hydraulic performance under all operating conditions. By integrating detailed hydraulic modeling in WaterGEMS with a robust SQP optimizer in MATLAB and automating the data exchange via VBA scripting, the method efficiently determined optimal pipe diameters and translated them into practical, commercially available sizes. The resulting network design—totaling approximately 21.624 billion IRR—meets or exceeds all hydraulic constraints, including minimum node pressures and velocity limits. This integrated approach provides a reliable blueprint for designing small to mid-sized distribution networks in water-scarce regions. Future research should explore hybrid optimization strategies that combine SQP with heuristic or metaheuristic algorithms, develop multi-objective formulations (e.g., minimizing cost, energy use, and water age), and implement robust optimization techniques to address uncertainties in demand projections and network parameters.

Cite this article: Naseri, Mahdi, Shamshirgaran, Raziye. 2026. Optimization of Water Distribution Network Design Using WaterGEMS and Sequential Quadratic Programming Algorithm: A Case Study of Birjand Zaferanieh Network. *Journal of Water and Soil Conservation*, 32 (4), 55-79.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2025.23736.3810

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

بهینه‌سازی طراحی شبکه توزیع آب با استفاده از WaterGEMS و الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی: مطالعه موردی شبکه زعفرانیه بیرجند

مهدی ناصری*^۱، راضیه شمشیرگران^۲

۱. نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: mnaseri@birjand.ac.ir
۲. دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: r.shamshirgaran@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: شبکه‌های توزیع آب شهری در مناطق نیمه‌خشک مانند بیرجند از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند، زیرا بیش از ۸۰٪ هزینه تأمین آب مربوط به شبکه توزیع است. شهرک زعفرانیه، با پیش‌بینی افزایشی در تقاضای آب تا افق ۱۴۳۳، نیازمند طراحی شبکه‌ای کم‌هزینه و پایدار است؛ شبکه‌ای که بتواند در عین تأمین فشار مناسب برای همه مشترکین، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و عملیاتی را به حداقل برساند. در این پژوهش، رویکردی ترکیبی با عنوان SQP-WDN معرفی شد که شبیه‌سازی هیدرولیکی دقیق شبکه توزیع آب (WDN) در نرم‌افزار WaterGEMS و بهینه‌سازی طراحی با استفاده از الگوریتم دنباله‌ای برنامه‌ریزی درجه دوم (SQP) در محیط MATLAB را هم‌زمان به‌کار می‌گیرد. هدف اصلی این روش تعیین قطر بهینه لوله‌ها برای تحقق هزینه حداقلی شبکه و حفظ رعایت تمام قیود هیدرولیکی از جمله فشار حداقل در گره‌ها و سرعت مجاز در لوله‌ها است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷	مواد و روش‌ها: شبکه توزیع آب مورد مطالعه شامل ۲۱ گره مصرفی و ۲۷ خط لوله است که به کمک نقشه‌های توپوگرافی و داده‌های ارتفاعی گره‌ها (بین ۱۴۸۵ تا ۱۵۶۵ متر) در نرم‌افزار WaterGEMS مدل‌سازی شد. مصرف ساعتی هر گره براساس میانگین نتایج سه روش هندسی، حسابی و فایر تعیین شد که مقدار آن بین ۱/۰۶ تا ۱۷/۶۷ مترمکعب در ساعت متغیر است. ضریب زبری لوله‌ها مطابق معیار هیزن- ویلیامز برابر ۱۳۰ و محدوده مجاز سرعت جریان در لوله‌ها بین ۰/۳ تا ۲ متر بر ثانیه لحاظ شد. همچنین حداقل فشار موردنیاز در تمام گره‌ها ۳۰ متر ستون آب تعریف گردید. در طراحی اولیه، مخزن اصلی (گره R-1) با ارتفاع ثابت ۱۵۶۵ متر در نظر گرفته شد و جریان اولیه در شرایط پایدار به میزان ۳۷/۹ لیتر بر ثانیه از طریق لوله شماره ۲۷ به سمت گره J-20 (با ارتفاع ۱۵۲۱/۸۰ متر) برقرار شد. با اجرای شبیه‌سازی WaterGEMS، افت هد براساس رابطه هیزن- ویلیامز محاسبه شد و نقاطی که در
واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی، بهینه‌سازی، شبکه توزیع آب، شبیه‌سازی هیدرولیکی، طراحی لوله، کاهش هزینه	

زمان پیک مصرف فشار در آن‌ها به زیر حد مجاز می‌رسیدند، شناسایی گردیدند. این نقاط بحرانی نشان می‌داد شبیه‌سازی اولیه بدون بهینه‌سازی قادر به تأمین فشار مناسب در همه نواحی نیست. برای حل مسأله تعیین قطر بهینه لوله‌ها، الگوریتم SQP در محیط MATLAB اجرا شد. در این الگوریتم، تابع هدف عبارت بود از حداقل‌سازی هزینه کل شبکه که هزینه هر لوله براساس طول و قطر آن محاسبه می‌شد. هم‌زمان برای حفظ قیود مربوط به سرعت، عبارتی به‌عنوان جریمه در نظر گرفته شد؛ به‌طوری که در صورت خروج سرعت جریان از بازه مجاز (بیش از ۲ یا کم‌تر از ۰/۳ متر بر ثانیه)، ارزش هدف افزایش یافته و انتخاب آن قطر نامطلوب تلقی می‌شد. قیود اصلی طراحی، شامل بقای جرم در هر گره (مجموع جریان‌های ورودی و خروجی برابر صفر) و حفظ محدودیت فشار در رنج تعریف‌شده بود. برای اجرای یک چرخه خودکار شبیه‌سازی و بهینه‌سازی، اسکریپت VBA در WaterGEMS توسعه یافت تا تبادل داده توسط MATLAB انجام شود. پیش از اعمال نهایی روش بر شبکه زعفرانیه، صحت الگوریتم SQP-WDN بر شبکه مرجع دو حلقه‌ای پروویتر و شامیر آزموده شد. این شبکه شامل هفت گره و هشت خط لوله به طول هزار متر با ضریب زبری ۱۳۰ و مخزن با ارتفاع ۲۱۰ متر بود. حداقل هد در گره‌ها حدود ۳۰ متر تعریف شد و پس از اجرای بهینه‌سازی، نتایج شامل قطر لوله‌ها، فشار در گره‌ها و هزینه کل شبکه با نتایج مطالعات معتبر بین‌المللی و داخلی مقایسه گردید. تطابق هزینه نهایی در حدود ۴۲۰/۰۰۰ دلار با پژوهش‌های معتبر نشان داد که مدل هیدرولیکی و الگوریتم بهینه‌سازی قادر به بازتولید دقیق رفتار شبکه مرجع هستند. این اعتبارسنجی دقت و قابلیت اطمینان روش را تأیید کرد.

یافته‌ها: پس از اعتبارسنجی موفق، الگوریتم ترکیبی SQP-WDN برای شبکه زعفرانیه اجرا شد. در این مرحله، قطر محاسباتی هر لوله (خروجی SQP) در مقابل قطر نهایی تجاری (نزدیک‌ترین اندازه استاندارد بزرگ‌تر یا مساوی قطر محاسباتی) قرار گرفت. نتایج نشان داد در هشت لوله از بیست‌وهفت خط لوله (از جمله لوله‌های شماره ۱، ۴، ۵، ۶، ۷، ۱۳، ۱۴ و ۲۷)، قطر محاسباتی تنوری دقیقاً با قطر تجاری مطابقت داشت. برای مثال، لوله شماره ۲۷ که نقش اساسی در انتقال جریان بالای آب از مخزن به کل شبکه داشت، هم قطر محاسباتی و هم قطر تجاری ۲۵۰ میلی‌متر انتخاب شد؛ به‌طوری که حداقل فشار در گره‌های انتهایی (حدود ۶۰/۱۵ متر آب) به خوبی تأمین گردید. برای بقیه لوله‌ها، قطر تجاری کمی بزرگ‌تر از قطر تنوری برگزیده شد تا افت فشار در مسیرهای بحرانی کاهش یابد و حاشیه اطمینان هیدرولیکی تقویت گردد. به‌عنوان نمونه، قطر محاسباتی لوله شماره ۲ معادل ۷۹/۴۹ میلی‌متر بود، اما قطر تجاری ۹۰ میلی‌متر به کار رفت تا در شرایط پیک، حداقل فشار در گره J-2 به بیش از ۶۶/۱۴ متر آب برسد. این حدود رواداری اجرایی سبب شد افت فشار شبکه کاهش یابد و نقاط انتهایی پایدارتر شوند. در نهایت، هزینه نهایی شبکه زعفرانیه پس از تطبیق قطرها با اندازه‌های تجاری حدود ۲۱/۶۲۳/۹۵۴/۰۰۰ ریال محاسبه شد. اگرچه هزینه تنوری صرفاً براساس قطرهای دقیق محاسباتی ممکن بود اندکی کم‌تر باشد، ولی انتخاب قطرهای استاندارد بزرگ‌تر به دلیل جلوگیری از مشکلات اجرایی، اقتصادی و حفظ پایداری هیدرولیکی، معقول ارزیابی شد. در تمام شرایط بهره‌برداری، اعم از نرمال و پیک مصرف، فشار تمام گره‌ها بالاتر از حداقل

تعریف شده (حدود ۳۰ متر آب) و سرعت آب در همه لوله‌ها بین ۰/۳ تا ۲ متر بر ثانیه باقی ماند. تحلیل خروجی‌های گرافیکی نیز نشان داد که با افزایش قطر تجاری در شاخه‌های بحرانی، نقطه‌هایی که سرعت جریان پیش از بهینه‌سازی به نزدیکی حد مجاز می‌رسید، به سرعتی کم‌تر دست یافته و افت هد کل شبکه کاهش یافته‌است.

نتیجه‌گیری: روش ترکیبی SQP-WDN نشان داد که می‌تواند هزینه سرمایه‌گذاری شبکه توزیع آب شهرک زعفرانیه را کاهش داده و در عین حال عملکرد هیدرولیکی شبکه را در همه شرایط تضمین کند. با بهره‌گیری از شبیه‌سازی دقیق WaterGEMS و الگوریتم SQP در MATLAB، قطر بهینه لوله‌ها تعیین شد و پس از تطبیق با قطرهای تجاری، هزینه نهایی حدود ۲۱/۶۲۴ میلیارد ریال محاسبه شد. خودکارسازی فرایند انتقال داده‌ها به کمک VBA موجب کاهش خطاهای انسانی و صرفه‌جویی در زمان شد. این چارچوب یکپارچه و کم‌خطا برای طراحی شبکه‌های کوچک تا متوسط در مناطق با محدودیت منابع آبی کاربردی است و می‌تواند به‌عنوان الگویی عملی برای مطالعه و پیاده‌سازی پروژه‌های مشابه در سایر نواحی مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی، ترکیب SQP با روش‌های فراابتکاری، توسعه رویکردهای چندهدفه و اعمال بهینه‌سازی استوار در شبکه‌های بزرگ‌تر بررسی گردد تا پایداری و کارایی طرح‌ها بیش از پیش ارتقاء یابد.

استناد: ناصری، مهدی، شمشیرگران، راضیه (۱۴۰۴). بهینه‌سازی طراحی شبکه توزیع آب با استفاده از WaterGEMS و الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی: مطالعه موردی شبکه زعفرانیه بیرجند. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۲ (۴)، ۷۹-۵۵.
DOI: 10.22069/jwsc.2025.23736.3810



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

امروزه، بهبود کارایی و بهره‌وری زیرساخت‌ها نقشی حیاتی در توسعه پایدار و ارتقای کیفیت زندگی شهری ایفا می‌کند (۱ و ۲). شبکه‌های توزیع آب (WDN)، به‌عنوان شریان‌های حیاتی تأمین آب شهری، نه تنها وظیفه رساندن آب با کیفیت را بر عهده دارند، بلکه در مدیریت بهینه هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی نیز نقشی کلیدی ایفا می‌کنند (۳). پیچیدگی‌های ذاتی در طراحی این شبکه‌ها و چالش‌های مهندسی مرتبط با بهینه‌سازی آن‌ها، لزوم به‌کارگیری روش‌های نوین و الگوریتم‌های پیشرفته را برای تضمین عملکرد هیدرولیکی و اقتصادی بهینه، اجتناب‌ناپذیر ساخته‌است (۴). حدود ۸۰ درصد از کل هزینه یک پروژه تأمین آب به سیستم توزیع آن اختصاص می‌یابد؛ از این رو، طراحی بهینه و قابل‌اعتماد این شبکه‌ها ضروری است (۵). هدف از بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب، طراحی سیستمی کارآمد، مقرون‌به‌صرفه و مطمئن است که بتواند نیازهای آبی را تأمین کرده و فشار مناسب را در سراسر شبکه حفظ کند، امری که برای حفاظت از منابع آبی، کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های نگهداری از اهمیت بالایی برخوردار است (۶). بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب می‌تواند در حوزه‌های مختلفی مانند طراحی، بهره‌برداری، کالیبراسیون و ارتقاء سطح خدمات صورت گیرد (۷).

پژوهش‌گران متعددی روش‌های مختلفی را برای دستیابی به راه‌حل بهینه در مسأله بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب ارائه کرده‌اند. روش هاردی کراس به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین روش‌ها برای حل شبکه‌های لوله‌کشی شناخته می‌شود. در این روش، مجموع جبری جریان‌ها در هر گره باید برابر با صفر باشد و همچنین مجموع جبری افت فشار در هر حلقه نیز باید صفر باشد. این روش در گذر زمان توسط

پژوهش‌گران مختلف بهبود یافته‌است (۸). روش‌های قطعی مانند برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی دارای محدودیت‌هایی نظیر گیر افتادن در کمینه‌های محلی و وابستگی به نقطه شروع هستند که مانع دستیابی به راه‌حل‌های نزدیک به بهینه در مسائل پیچیده و چندهدفه شبکه‌های توزیع آب واقعی می‌شود (۹ و ۱۰). برای رفع این چالش‌ها، پژوهش‌گران به استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری (۱۱)، به ویژه الگوریتم‌های ژنتیک (۱۲) و تبرید شبیه‌سازی‌شده^۲ (۱۳) روی آوردند؛ تکنیک‌هایی که با بهره‌گیری از مؤلفه‌های تصادفی، توانسته‌اند عملکرد قابل‌قبولی در طراحی شبکه‌های آب ارائه دهند. در همین راستا، توسعه مدل رایانه‌ای GANET^۳ که از الگوریتم ژنتیک برای طراحی کم‌هزینه شبکه‌های توزیع آب بهره می‌برد، نمونه‌ای موفق از کاربرد این تکنیک‌ها محسوب می‌شود (۱۰). با این حال، بسیاری از الگوریتم‌های فراابتکاری موجود در بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب معمولاً نیازمند تنظیمات خاص پارامترهای الگوریتمی بوده و ممکن است در مواجهه با انواع مختلف شبکه‌ها با چالش‌هایی در کارایی و قابلیت اطمینان روبرو شوند (۱۴).

در این میان، الگوریتم بهینه‌سازی دنباله‌ای برنامه‌ریزی درجه دوم (SQP^۴)، به‌عنوان یکی از کارآمدترین روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی مقید غیرخطی، توانسته است با ارائه همگرایی سریع و دقت بالا، در حوزه‌های گوناگون مهندسی و علوم کاربردی نقش به‌سزایی ایفا کند. کاربرد گسترده SQP را می‌توان در زمینه‌های متنوعی مشاهده کرد. به‌طور مثال، این الگوریتم در بهینه‌سازی کنترل چاه‌ها در مخازن هیدروکربوری (۱۵)، مدیریت جریان بهینه توان در شبکه‌های توزیع با نفوذ بالای منابع انرژی

2- Simulated Annealing

3- Genetic Algorithm-based Network design Tool

4- Sequential Quadratic Programming

1- Water Distribution Network

داشته است تا ضمن برآورده کردن تقاضا، استراتژی‌هایی را برای رسیدگی به محدودیت‌های مالی طراحی کنند (۲۶). در این راستا، پژوهش‌های متعددی به بهینه‌سازی ابعاد لوله‌ها و مؤلفه‌های شبکه با هدف کاهش هزینه پرداخته‌اند. جم و همکاران (۲۰۰۶) از الگوریتم جستجوی هارمونی برای بهینه‌سازی قطر لوله‌ها و کاهش هزینه‌های طراحی شبکه‌های توزیع آب با استفاده از تابع جریمه و اصلاح کمبودهای هیدرولیکی شناسایی شده توسط EPANET^۴ بهره بردند. پارک و همکاران (۲۰۱۳) با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه توسعه یافته، به طراحی بهینه‌ای برای شبکه توزیع آب دست یافتند که هزینه‌ها را به حداقل می‌رساند. این مدل بهینه‌سازی، فاکتورهایی هم‌چون ابعاد لوله‌ها، حجم مخازن ذخیره، فشار پمپاژ و میزان آب در مخازن را در نظر می‌گرفت. کیم و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی تأثیر ظرفیت پمپ تأمین آب و ابعاد مخزن سرویس بر هزینه‌های عملیاتی شبکه و کیفیت آب پرداختند و مدلی را برای بهینه‌سازی عملکرد پمپ‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تأیید هیدرولیکی با EPANET^۴ تدوین کردند. هم‌چنین، طاهری و پیشوایی (۲۰۲۴) به بررسی پیکربندی بهینه سیستم توزیع آب با تعیین مکان‌ها و ظرفیت‌های بهینه تأسیسات، خطوط لوله و ایستگاه‌های پمپاژ در شهر تهران پرداختند (۲۷). علاوه بر بهینه‌سازی طراحی، مطالعاتی نیز بر بهینه‌سازی بهره‌برداری و افزایش کارایی سیستم‌های توزیع آب متمرکز شده‌اند؛ برای مثال، میروویچ و همکاران (۲۰۲۱) یک روش شناسی نوین برای گزینش پمپ به عنوان توربین (PAT^۵) جهت بازیابی انرژی هیدرولیک مستهلک شده در شبکه‌های توزیع آب ارائه دادند (۲۸) و دینی و همکاران (۲۰۲۲) به زمان‌بندی بهینه عملکرد پمپ‌ها با هدف کاهش

پراکنده (۱۶)، تحلیل اقتصادی جذب CO₂ پس‌سوز (۱۷)، کنترل پیش‌بین مدل‌محور در خودروهای سلول سوختی (۱۸) و بازیابی سیگنال‌های پراکنده با محدودیت‌های گسسته-متغیر (۱۹) استفاده قرار گرفته است.

حتی در طراحی و آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی بیماری‌ها، SQP به‌عنوان مرحله نهایی بهینه‌سازی وزن‌ها به‌کار رفته است (۲۰). در زمینه شبکه‌های توزیع آب، SQP به‌ویژه در بهینه‌سازی طراحی، تخصیص بهینه منابع و کاهش هزینه‌های عملیاتی با ترکیب تکنیک‌های نیوتنی و برنامه‌ریزی درجه دوم، عملکرد قابل‌قبولی ارائه داده است (۲۱ و ۲۲). در کنار SQP، رویکردهای مشابهی نیز توسعه یافته‌اند؛ برای مثال با به‌کارگیری چارچوب برنامه‌ریزی پوششی متوالی (SCP^۱) برای حل مسأله غیرخطی بهینه‌سازی فشار در شبکه‌های توزیع آب به‌صورت واقع‌زمانی، به سرعت بالای محاسبات و کاهش نوسان فشار دست یافته‌است، هرچند راه‌حل‌های حاصل از SCP ممکن است تقریبی بوده و در مواجهه با تغییرات ناگهانی تقاضا دقت کافی نداشته باشند و نیازمند یک راه‌حل ممکن اولیه هستند (۲۳). این تحولات در کنار استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی مانند PESA-II^۲ و SPEA-II^۳ در بهینه‌سازی چندهدفه شبکه‌های توزیع آب شهری (۲۴) و کاربرد الگوریتم‌های هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی و یادگیری ماشین در بهینه‌سازی سیستم‌های توزیع آب و پیش‌بینی مصرف آب (۲۵) نشان‌دهنده گستره وسیع روش‌های نوین در این حوزه است.

ملاحظات اقتصادی، از جمله هزینه‌های قابل‌توجه مرتبط با ایجاد و بهره‌برداری از تأسیسات توزیع آب در کنار مسائل پایداری، سیاست‌گذاران را بر آن

4- Environmental Protection Agency Network modeling tool
5- Pump As Turbine

1- Sequential Convex Programming
2- Pareto Envelope-based Selection Algorithm II
3- Strength Pareto Evolutionary Algorithm II

(۳۱). علاوه بر این، در زمینه تحلیل نشت و کالیبراسیون مدل، کی.اس و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای موردی بر روی شبکه وستمورینگز^۲، WaterGEMS را برای شناسایی و مکان‌یابی نشت‌ها با استفاده از داده‌های میدانی و کالیبراسیون مدل با تابع Darwin Calibrator به کار برده‌اند که نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌سازی در بازتولید شرایط واقعی است (۳۵). این نرم‌افزار امکان پیش‌بینی نیازهای آبی و شناسایی مشکلات احتمالی مانند خسارت‌ها و نشتی‌ها را نیز فراهم می‌آورد (۳۷). در مورد دقت مدل‌سازی و میزان خطاهای هیدرولیکی، در برخی از مطالعات، اگرچه مستقیماً به کالیبراسیون مدل اشاره نشده، اما با توسعه مدل‌های رگرسیون چندخطی برای پیش‌بینی افت هد و دستیابی به مقادیر R^2 بالا (به‌عنوان مثال، ۰/۹۶۵)، دقت و قابلیت اطمینان مدل‌سازی تأیید شده است (۳۱). هم‌چنین، شناسایی نواقص عملکردی شبکه در قالب شاخص‌های فشار و سرعت و نیز موفقیت در مکان‌یابی نشت‌ها پس از کالیبراسیون، به‌طور ضمنی پایایی بالای مدل‌های هیدرولیکی WaterGEMS را در مسائل پیچیده نشان می‌دهد (۳۵). با این حال، اگرچه WaterGEMS ابزارهای قدرتمندی برای شبیه‌سازی فراهم می‌آورد، بهینه‌سازی پیچیده طراحی یا بهره‌برداری شبکه، به‌ویژه با در نظر گرفتن قیود غیرخطی و توابع هدف چندگانه، نیازمند تلفیق آن با محیط‌های محاسباتی پیشرفته‌تر است. ابزار MATLAB برای نرم‌افزارهای شبیه‌سازی هیدرولیکی، یک رابط قدرتمند جهت اتصال WaterGEMS به محیط‌های محاسباتی پیشرفته ارائه می‌دهد و این فرآیند را تسهیل کرده و با ارائه توابع از پیش تعریف‌شده، زمان پردازش و پیچیدگی محاسبات را کاهش می‌دهد، که در نهایت منجر به بهبود دقت مدل‌سازی و افزایش کارایی تحلیل‌های هیدرولیکی می‌شود (۷ و ۳۸).

مصرف انرژی، نشت و افزایش قابلیت اطمینان فشار با استفاده از الگوریتم PSO^۱ و نرم‌افزار EPANET پرداختند (۲۹). هم‌چنین، در راستای مدیریت جامع شبکه، پژوهش‌هایی نیز بر مکان‌یابی بهینه حسگرهای کیفیت آب با تمرکز بر قابلیت مشاهده‌پذیری شبکه صورت گرفته است (۳۰).

در این میان، نرم‌افزار شبیه‌سازی هیدرولیکی WaterGEMS به‌عنوان یک ابزار پیشرفته برای مدل‌سازی، شبیه‌سازی و تحلیل شبکه‌های توزیع آب تحت فشار، به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (۳۱). قابلیت‌های جامعی برای تحلیل‌های هیدرولیکی و کیفیت آب ارائه می‌دهد و مهندسان را قادر می‌سازد تا با دقت بالایی رفتار شبکه را در شرایط مختلف بهره‌برداری، از جمله توزیع فشار و جریان، عملکرد مخازن و پمپ‌ها و حتی پارامترهای کیفی مانند غلظت کلر و سن آب، شبیه‌سازی کنند (۳۲، ۳۳، ۳۴ و ۳۵). مطالعات پیشین، کاربردهای متنوع WaterGEMS را در زمینه‌های مشابه پژوهش حاضر تأیید می‌کنند. به‌عنوان مثال، بکر و کانسال (۲۰۲۱) از WaterGEMS V8i برای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی شبکه توزیع آب در شهر دیردوا^۲ استفاده کردند (۳۶). این پژوهش با شناسایی نقاط دارای فشار بالا که منجر به نشت می‌شوند و نواحی با سرعت جریان پایین‌تر از حد استاندارد، به‌طور ضمنی بر لزوم راهکارهایی برای بهینه‌سازی و مدیریت فشار صحنه گذاشته است. براهامیا و همکاران (۲۰۲۴) نیز به تفصیل، کاربرد WaterGEMS را در تحلیل جامع و طراحی شبکه در روستای چیتتالاولاسا^۳ نشان داده و قابلیت نرم‌افزار را در اجرای تحلیل‌های وضعیت پایا، تحلیل نشت و تحلیل سناریو برای شبیه‌سازی رفتار شبکه تحت شرایط مختلف عملیاتی برجسته کردند

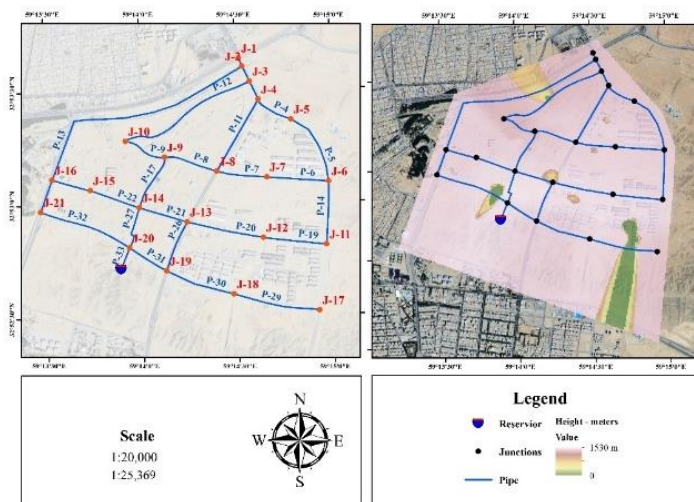
- 1- Particle Swarm Optimization
- 2- Dire Dawa
- 3- Chintalavalasa

منابع آب و ارتقای کارایی شبکه‌های توزیع آب شهری در مقیاس‌های عملیاتی باشد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، رویکردی ترکیبی برای بهینه‌سازی طراحی شبکه توزیع آب در شهرک مسکونی زعفرانیه بیرجند اتخاذ شده‌است. این رویکرد، قابلیت‌های شبیه‌سازی دقیق هیدرولیکی نرم‌افزار WaterGEMS را با توانمندی‌های بهینه‌سازی قدرتمند الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی در محیط MATLAB ترکیب می‌کند. هدف اصلی این روش، تعیین قطرهای بهینه لوله‌ها برای کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری با حفظ عملکرد هیدرولیکی مطلوب شبکه است. مراحل اصلی این روش‌شناسی در ادامه به تفصیل توضیح داده شده‌است. شبکه توزیع آب مورد مطالعه در این پژوهش، مربوط به شهرک مسکونی زعفرانیه در بیرجند است. جمعیت این شهرک در حال حاضر به دلیل عدم تکمیل توسعه، محدود بوده و برای افق طرح (سال ۱۴۳۳) حدود ۱۰،۶۳۲ نفر برآورد شده‌است. این شبکه در محیط WaterGEMS مدل‌سازی شده و شامل ۲۱ گره مصرفی و ۲۷ خط لوله می‌باشد که ارتباط بین گره‌ها و لوله‌ها تعریف شده‌است (شکل ۱).

در پژوهش حاضر، بهینه‌سازی طراحی شبکه توزیع آب ساده شده در شهرک مسکونی زعفرانیه بیرجند با هدف کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی و بهبود عملکرد هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفته‌است. با توجه به محدودیت‌های روش‌های قطعی در مسائل پیچیده و چالش‌های برخی الگوریتم‌های فراابتکاری در تضمین همگرایی و رعایت دقیق قیود در مسائل مقید، هدف اصلی این پژوهش، ارائه رویکردی نوین با عنوان SQP-WDN مبتنی بر ترکیب مدل‌سازی هیدرولیکی دقیق در WaterGEMS و تحلیل‌های بهینه‌سازی قدرتمند الگوریتم SQP در محیط MATLAB می‌باشد. این روش امکان شبیه‌سازی دقیق رفتار هیدرولیکی شبکه در WaterGEMS را فراهم آورده و با بهره‌گیری از توانایی SQP در حل مسائل بهینه‌سازی غیرخطی مقید، پارامترهای طراحی نظیر قطر لوله‌ها به طور بهینه تنظیم می‌شوند. از مزایای برجسته این رویکرد می‌توان به دقت بالا در رعایت قیود هیدرولیکی، پایداری در یافتن راه‌حل‌های بهینه، و قابلیت کاربرد آن در شبکه‌های پیچیده اشاره نمود. این روش یکپارچه، ضمن کاهش هزینه‌های طراحی و ساخت، عملکرد هیدرولیکی بهینه و پایدار شبکه‌های توزیع آب را تضمین می‌نماید و می‌تواند راهگشای ارائه راهکارهای بهینه در مدیریت



شکل ۱- نمای شماتیک شبکه توزیع آب در منطقه مورد مطالعه و وضعیت ارتفاعی آن.

Figure 1. Schematic view of the water distribution network in the study area and its elevation status.

یکدیگر متصل می‌گردند. مشخصات کامل هندسی شامل طول، قطر اولیه، زبری و شیب هر لوله در جداول اطلاعات WaterGEMS وارد شده و برای گره‌ها نیز ارتفاع، دبی مصرفی و فشار حداقل مجاز تعیین شده است. به عنوان مثال، مدار حلقوی بین J-19 و J-20 در لوله P-25 به طول ۳۵۸ متر، نقش تعدیل فشار و کنترل افت را ایفا می‌کند. این مدل‌سازی جامع، امکان تحلیل رفتار شبکه در شرایط مختلف و شبیه‌سازی عملکرد سیستم در وضعیت‌های بحرانی را فراهم می‌آورد (جدول‌های ۱ و ۲).

گره R-1 به عنوان مخزن اصلی شبکه در ارتفاع ۱۵۶۵ متر معرفی گردیده و جریان با دبی ۳۷/۹ لیتر بر ثانیه از مخزن اصلی از طریق لوله P-27 با طول ۱۸۹ متر به گره J-20 با ارتفاع ۱۵۲۱/۸۰ متر هدایت می‌شود.

هر یک از گره‌های میانی مانند J-11، J-19، J-13 و J-5 به همراه ارتفاع نقطه‌ای و تقاضای مصرفی که (از ۲/۷۰ تا ۹/۸۴ مترمکعب بر ساعت متغیر است) تعریف شده‌اند. مسیرهای انشعابی و دورانی شبکه از طریق لوله‌هایی با طول‌های متغیر (از ۷۳ تا ۱۹۹۲ متر) و قطرهای اولیه (در محدوده ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر) به

جدول ۱- مشخصات گره‌های هیدرولیکی شبکه توزیع آب در این مطالعه.

Table 1. Specifications of hydraulic nodes of the water distribution network in this study.

شماره گره Node Number	ارتفاع (متر) Elevation (m)	مصرف (مترمکعب بر ساعت) Consumption (m ³ /hour)
R-1	1,565.00	مخزن Reservoir
J-1	1,485.00	8.78
J-2	1,485.00	5.51
J-3	1,490.00	6.41
J-4	1,497.89	7.94
J-5	1,500.62	5.13
J-6	1,506.00	3.93
J-7	1,510.23	1.83
J-8	1,509.58	1.27
J-9	1,492.30	3.35
J-10	1,486.00	2.55
J-11	1,516.00	4.34
J-12	1,515.45	2.28
J-13	1,519.19	2.70
J-14	1,520.17	1.06
J-15	1,507.02	1.71
J-16	1,497.00	11.11
J-17	1,493.00	16.65
J-18	1,513.00	17.67
J-19	1,505.00	9.84
J-20	1,521.80	8.04
J-21	1,499.00	14.35

جدول ۲- مشخصات لوله‌های شبکه توزیع آب در این مطالعه.

Table 2. Specifications of pipes of the water distribution network in this study.

شماره لوله Pipe Number	گره شروع Start Node	گره پایان End Node	طول (متر) Length (m)
P-1	J-2	J-1	73
P-2	J-3	J-2	138
P-3	J-4	J-3	164
P-4	J-5	J-4	323
P-5	J-6	J-5	625
P-6	J-6	J-7	506
P-7	J-7	J-8	413
P-8	J-9	J-8	448
P-9	J-10	J-9	357
P-10	J-4	J-8	680
P-11	J-10	J-3	1156
P-12	J-2	J-16	1992
P-13	J-6	J-11	518
P-14	J-9	J-14	470
P-15	J-11	J-12	519
P-16	J-13	J-12	637
P-17	J-14	J-13	408
P-18	J-14	J-15	425
P-19	J-15	J-16	324
P-20	J-13	J-19	435
P-21	J-14	J-20	364
P-22	J-21	J-16	279
P-23	J-18	J-17	715
P-24	J-18	J-19	584
P-25	J-19	J-20	358
P-26	J-20	J-21	789
P-27	J-20	R-1	189

محیط MATLAB به کار گرفته شده است. این انتخاب به دلیل ویژگی‌های خاص SQP و مزایای آن در حل مسائل بهینه‌سازی غیرخطی مقید در طراحی شبکه‌های توزیع آب توجیه‌پذیر است (۴۲ و ۴۳). SQP همگرایی سریعی به سمت نقطه بهینه محلی دارد و

الگوریتم بهینه‌سازی برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی (SQP): در این مطالعه، برای شبیه‌سازی دقیق هیدرولیکی شبکه از نرم‌افزار WaterGEMS استفاده شده و به منظور حل مسئله بهینه‌سازی غیرخطی مقید، الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی (SQP) در

$$\text{Min}[C_T = \sum_{i=1}^{Np} C_i(D_i) \cdot L_i + P(\text{velocities})] \quad (1)$$

که در آن، Np تعداد لوله‌ها، L_i طول لوله i ، $C(D_i)$ هزینه واحد طول برای قطر D_i و $P(\text{velocities})$ عبارت جریمه برای نقض محدودیت‌های سرعت است.

قیود: قیود مسأله به دو دسته ضمنی و صریح تقسیم می‌شوند:

قیود ضمنی: شامل معادلات پیوستگی جریان در هر گره، به این معنی که مجموع جبری جریان‌ها وارد شده و خارج شده از هر گره باید برابر با صفر باشد.

$$\sum_{i=1}^n q_i = 0 \quad (2)$$

و معادلات انرژی بر مبنای فرمول هیزن- ویلیامز (افت هد در لوله‌ها $h_f = f(Q, D, L, C)$ می‌باشند که به‌طور طبیعی توسط WaterGEMS در شبیه‌سازی هیدرولیکی رعایت می‌شوند.

$$h_f = \frac{10.68 L Q^{1.85}}{C^{1.85} D^{4.87}} \quad (3)$$

قیود صریح: شامل محدودیت‌های فشار حداقل و حداکثر در هر گره ($P_{\min} \leq P_j \leq P_{\max}$) و محدوده سرعت مجاز در لوله‌ها ($V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}$) برای هر لوله می‌باشند. در صورت نقض هر یک از این قیود، جریمه متناسب در تابع هدف اعمال می‌شود.

۵. اجرای الگوریتم SQP: بهینه‌سازی با فراخوانی تابع fmincon در MATLAB و تعیین گزینه‌های 'TolX'=1e-6, 'TolFun'=1e-6, 'Algorithm'='sqp' و 'MaxIter'=500 انجام می‌گیرد.

۶. چرخه تکراری و به‌روزرسانی: در هر گام از بهینه‌سازی، تابع هزینه و قیود ارزیابی شده و در صورت نقض هر قید، جریمه متناسب در تابع هدف اعمال می‌شود. قطره‌های پیشنهادی توسط الگوریتم

قادر است مسائل با تابع هدف و قیود غیرخطی را به‌صورت مؤثر حل کند که برای تحلیل‌های پیچیده هیدرولیکی ضروری است. همچنین SQP در مسائل با تعداد متغیر کم‌تر، می‌تواند با دقت بالا (۴۴) و زمان محاسباتی کمتر نسبت به الگوریتم‌های فراابتکاری (۴۵) عمل کند و پایداری بیشتری در رعایت قیود سخت و شرایط مرزی دقیق دارد.

فرآیند بهینه‌سازی در محیط MATLAB: فرآیند بهینه‌سازی در این پژوهش به‌صورت یک چرخه تکراری بین نرم‌افزار WaterGEMS برای شبیه‌سازی هیدرولیکی و محیط MATLAB برای حل مسأله بهینه‌سازی پیاده‌سازی شده‌است (شکل ۲). مراحل این فرآیند به شرح زیر است:

۱. مدل‌سازی اولیه در WaterGEMS: ابتدا، مدل هیدرولیکی اولیه شبکه زعفرانیه با تمامی جزئیات توپولوژی، لوله‌ها، گره‌ها و مخزن در WaterGEMS ایجاد می‌شود.

۲. استخراج داده‌ها: پس از انجام تحلیل هیدرولیکی اولیه در WaterGEMS، داده‌های کلیدی شامل فشار گره‌ها، دبی لوله‌ها، طول، زبری و قطر اولیه لوله‌ها از طریق اسکریپت VBA به صورت خودکار در جداول Excel استخراج می‌شوند.

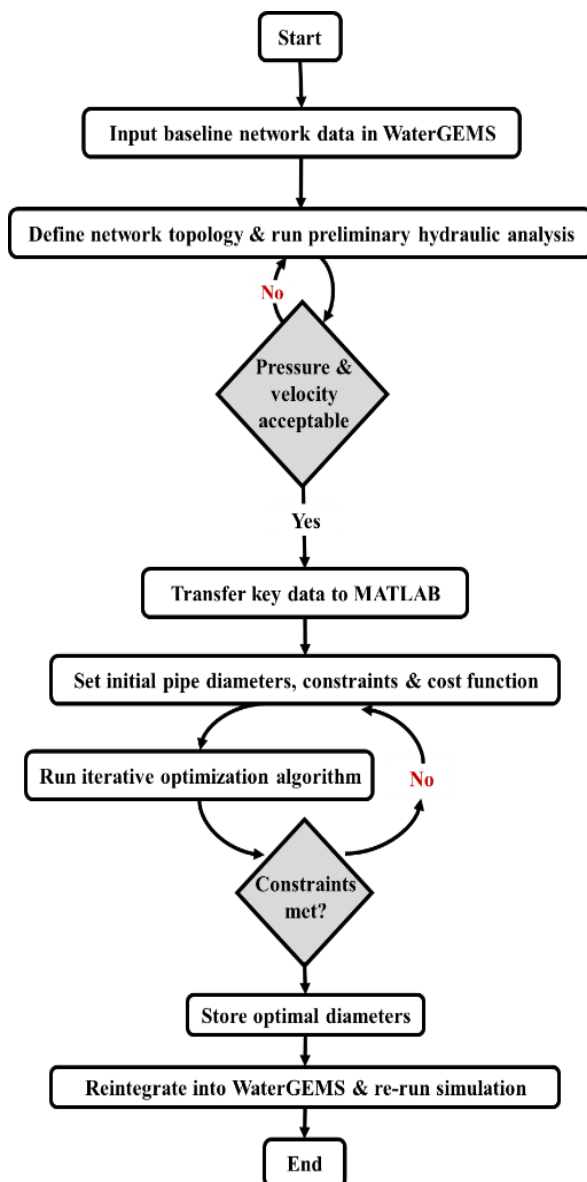
۳. ورود داده‌ها به MATLAB: با استفاده از تابع readtable در MATLAB، این فایل‌های Excel به محیط محاسباتی وارد شده و ماتریس‌های ورودی لازم برای مدل بهینه‌سازی به‌دست می‌آید.

۴. تعریف تابع هدف و قیود:

تابع هدف: هدف اصلی بهینه‌سازی، کمینه‌سازی هزینه کل شبکه است که شامل مجموع هزینه‌های طولی لوله‌ها بر مبنای رابطه چندجمله‌ای هزینه-قطر می‌باشد. علاوه بر این، یک عبارت جریمه برای سرعت‌های خارج از محدوده طراحی در تابع هدف اعمال می‌شود تا از نتایج غیرواقعی جلوگیری شود. تابع هدف به شکل کلی زیر است:

هیدرولیکی شبکه انجام می‌گیرد. این چرخه تکراری تا رسیدن به شرایط توقف مبتنی بر حدود رواداری تعریف شده ادامه می‌یابد و همگام‌سازی دقیق بین MATLAB و WaterGEMS را تضمین می‌کند.

SQP به‌روزرسانی شده و این مقادیر در فایل‌های ورودی Excel مرتبط با WaterGEMS ثبت می‌شوند. سپس WaterGEMS با قطرهای جدید به‌روزرسانی شده و شبیه‌سازی مجدد برای بررسی وضعیت



شکل ۲- الگوریتم برای SQP-WDN بهینه‌سازی طراحی سیستم توزیع آب.

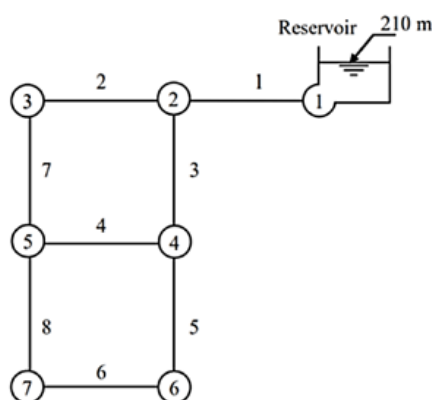
Figure 2. SQP-WDN Algorithm for Water Distribution System Design Optimization.

الپرویتز و شامیر معرفی شد، انجام گردید (شکل ۳). این شبکه شامل ۸ خط لوله و ۷ گره است که همگی از طریق جریان ثقلی از مخزنی با ارتفاع ۲۱۰ متر

اعتبارسنجی مدل هیدرولیکی: اعتبارسنجی مدل هیدرولیکی ایجاد شده در WaterGEMS با استفاده از شبکه استاندارد دوحلقه‌ای که نخستین بار توسط

سطح زمین تعیین شده است. این شبکه به عنوان یک بستر آزمایشی مشترک و معتبر برای الگوریتم‌های بهینه‌سازی و روش‌های نوین طراحی به کار می‌رود (جدول ۳).

تغذیه می‌شوند. در این مدل اعتبارسنجی، طول تمامی لوله‌ها برابر با ۱۰۰۰ متر بوده و ضریب هیزن-ویلیامز مقدار ۱۳۰ در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، حداقل ارتفاع هد مجاز در هر گره ۳۰ متر بالاتر از



شکل ۳- شبکه دو حلقه‌ای (۴۶).

Figure 3. Two-loop network (46).

جدول ۳- مشخصات لوله‌های موجود جهت استفاده در شبکه دو حلقه‌ای.

Table 3. Specifications of available pipes for use in the two-loop network.

قطر (اینچ) Diameter (Inch)	قطر (میلی‌متر) Diameter (Millimeter)	قیمت واحد (دلار/متر) Unit Price (USD/Meter)
1	25.4	2
2	50.8	5
4	101.6	11
6	152.4	16
10	254	32
14	355.6	60
16	406.4	90
18	457.2	130

مورد ارزیابی قرار گرفت. این فرآیند به صورت تکراری و تا دستیابی به نتایج مطلوب و پایدار ادامه یافت (جدول ۴). برای اعتبارسنجی نهایی مدل، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های مقالات موجود در این زمینه و نتایج به دست آمده از حل‌های استاندارد مقایسه گردید (جدول ۵). این مقایسه نشان‌دهنده

در این مطالعه، با بهره‌گیری از الگوریتم SQP-WDN، شبکه دو حلقه‌ای تحلیل و ارزیابی شده است. پس از بهینه‌سازی پارامترهای شبکه در محیط MATLAB، مقادیر بهینه‌شده (قطرهای لوله‌ها) به نرم‌افزار WaterGEMS وارد گردید. سپس پایداری و عملکرد هیدرولیکی شبکه تحت این شرایط بهینه‌شده

جدول ۶ و شکل ۴ آمده است، راهکار مهندسی بهینه‌ای را برای شبکه معرفی می‌کند. هدف اصلی، ایجاد تعادل میان حداقل کردن هزینه اولیه شبکه و تضمین عملکرد هیدرولیکی پایدار تحت شرایط بهره‌برداری مشخص است.

دقت و قابلیت اطمینان مدل هیدرولیکی ایجاد شده در WaterGEMS در بازتولید رفتارهای هیدرولیکی شناخته شده است.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از بهینه‌سازی شبکه توزیع آب زعفرانیه با استفاده از الگوریتم SQP-WDN، که در

جدول ۴- نتایج مربوط به شبکه دو حلقه‌ای از طریق الگوریتم SQP-WDN.

Table 4. Results related to the two-loop network obtained through the SQP-WDN algorithm.

شماره لوله Pipe Number	قطر لوله (میلی‌متر) Pipe Diameter (Millimeter)	طول لوله (متر) Pipe Length (Meter)	قیمت (دلار) Price (USD)	شماره گره Node Number	فشار (متر آب) Pressure (Meter Water)
1	457.2	1000	130,000	1	مخزن Tank
2	152.4	1000	16,000	2	59.91
3	406.4	1000	90,000	3	49.14
4	152.4	1000	16,000	4	54.81
5	406.4	1000	90,000	5	58.99
6	355.6	1000	60,000	6	44.77
7	152.4	1000	16,000	7	49.75
8	25.4	1000	2,000	-	-
هزینه نهایی Total Cost			420,000	تصویب شد Approved	

جدول ۵- مقایسه نتایج SQP-WDN با مطالعات پیشین برای شبکه دو حلقه‌ای.

Table 5. Comparison of SQP-WDN results with previous studies for the two-loop network.

مطالعات Studies	هزینه نهایی (دلار) Final Price (USD)
(Alperovits & Shamir, 1977)	479,525
(Savic & Walters, 1997)	420,000
(Geem, 2006)	419,000
(van Dijk et al., 2008)	419,000
(Sangroula et al., 2022)	419,000
This work	420,000

نهایت برای طراحی نهایی و برآورد هزینه انتخاب شده است.

جدول ۶ برای هر لوله دو نوع قطر را ارائه می‌دهد: قطر بهینه (حاصل محاسبات الگوریتم) و قطر تجاری (استاندارد موجود در بازار). قطر تجاری در

۱- تحلیل هیدرولیکی نتایج بهینه‌سازی

انطباق و انتخاب قطرهای بهینه و تجاری: در برخی موارد (مانند لوله‌های P-1، P-4، P-5، P-6، P-7، P-13، P-14 و P-27)، قطر بهینه محاسبه‌شده توسط الگوریتم با قطر تجاری انتخابی یکسان است. این انطباق نشان می‌دهد که قطر بهینه به‌دست‌آمده، خود یک اندازه استاندارد موجود در بازار بوده است. بنابراین، انتخاب همان قطر تجاری، اهداف بهینه‌سازی را به‌طور کامل برآورده کرده است.

به‌عنوان مثال، لوله P-27 مسیر اصلی تغذیه از مخزن R-1 است و بزرگ‌ترین قطر (۲۵۰ میلی‌متر) در شبکه را به خود اختصاص داده است. این انتخاب منطقی و ضروری است؛ زیرا P-27 نقشی حیاتی در انتقال حجم بالای جریان (دبی اولیه ۳۷/۹ لیتر بر ثانیه) به کل سیستم دارد. این قطر بزرگ، افت هد در لوله ورودی را حداقل می‌کند و فشار لازم برای توزیع در ادامه شبکه حفظ می‌شود.

در اکثر موارد دیگر (شامل P-2، P-3، P-8، P-9، P-10، P-11، P-12، P-15، P-16، P-17، P-19، P-22، P-23، P-24، P-25، P-26)، قطر تجاری انتخابی کمی بزرگ‌تر از قطر بهینه محاسباتی است. این رویکرد یک رویه استاندارد و محافظه‌کارانه در طراحی شبکه‌های واقعی محسوب می‌شود. اگرچه الگوریتم SQP قطر ایده‌آل را محاسبه می‌کند، اما برای اطمینان از رعایت کامل محدودیت‌های هیدرولیکی (به‌ویژه حداقل فشار)، نزدیک‌ترین قطر استاندارد بزرگتر انتخاب می‌شود. این انتخاب، حاشیه اطمینان هیدرولیکی سیستم را افزایش می‌دهد و افت فشار را نسبت به حالت بهینه محاسباتی کاهش می‌دهد. این رویکرد به‌ویژه برای تضمین فشار کافی در زمان‌های پیک مصرف حیاتی است.

مثال‌هایی از بهبود عملکرد هیدرولیکی: بهینه‌سازی انجام شده منجر به توزیع مطلوب فشار و سرعت‌های جریان استاندارد در سراسر شبکه گردیده است: گره J-11: فشار در گره J-11، که یکی از گره‌های انتهایی در یک مسیر طولانی است، به ۳۰/۸۹ متر آب است. این مقدار به‌وضوح بالاتر از حداقل فشار مجاز است و اثربخشی بهینه‌سازی در حفظ فشار مناسب در نقاط حساس را تأیید می‌کند.

کنترل سرعت جریان: در لوله‌هایی با دبی بالا (مانند P-21، با انتخاب قطر بهینه ۲۵۰ میلی‌متر، سرعت جریان در محدوده مجاز (۰/۸ متر در ثانیه) قرار گرفته است. این کنترل سرعت، از افت هد اضافی و فرسایش لوله‌ها جلوگیری می‌کند.

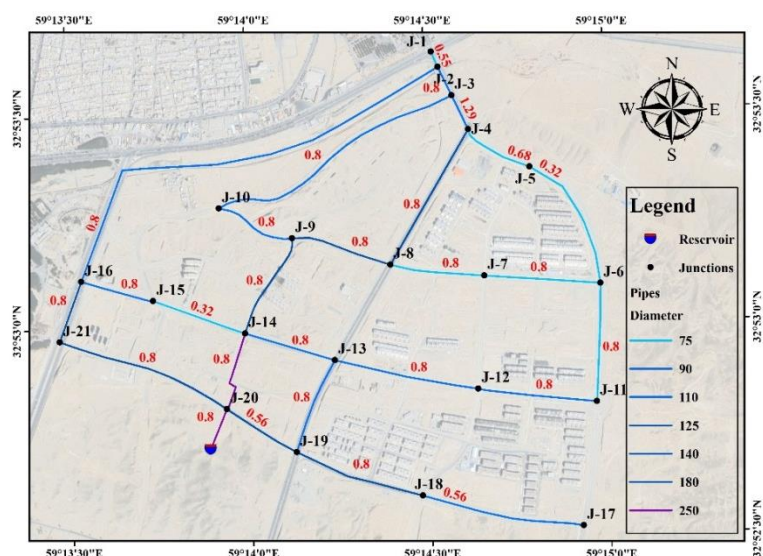
تعادل در مدارهای حلقوی: در مدارهای حلقوی (مانند مسیر بین J-19 و J-20 از طریق لوله P-25)، بهینه‌سازی، توزیع متعادل جریان و فشار را در مسیرهای موازی ایجاد کرده است. این امر از ایجاد نواحی ناخواسته با فشار بسیار بالا یا پایین جلوگیری می‌کند.

تحلیل هزینه-فایده بهینه‌سازی: هزینه نهایی کل شبکه پس از بهینه‌سازی، ۲۱،۶۲۳،۹۵۴،۰۰۰ ریال (جدول ۶)، برآورد شده است. این رقم دستیابی به یک راهکار اقتصادی کارآمد را نشان می‌دهد. این هزینه در مقایسه با طراحی‌های سنتی، که اغلب به دلیل انتخاب قطرهای بزرگ‌تر از حد نیاز به هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالاتری منجر می‌شوند، به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. الگوریتم SQP با دقت، قطرها را به گونه‌ای انتخاب کرده که ضمن رعایت کامل تمامی قيود فشار و سرعت، حداقل هزینه را به همراه داشته باشد. این تعادل مهندسی، سیستمی کارآمد و اقتصادی را تضمین می‌کند و از تحمیل هزینه‌های غیرضروری به پروژه جلوگیری می‌نماید.

جدول ۶- نتایج بهینه‌سازی اقطار لوله‌های شبکه توزیع آب در این مطالعه.

Table 6. Optimization results of pipe diameters of the water distribution network in this study.

شماره لوله Pipe Number	قطر لوله (میلی‌متر) Pipe Diameter (mm)	قطر تجاری لوله (میلی‌متر) Commercial Pipe Diameter (mm)	طول لوله (متر) Pipe Length (m)	قیمت (ریال) Cost (RIAL)	گره Node	فشار (متر آب) Pressure (m water)
P-1	75	75	73	47,085,000	J-1	65.73
P-2	79.49	90	138	127,029,000	J-2	66.14
P-3	95.68	110	164	223,368,000	J-3	62.59
P-4	75	75	323	208,335,000	J-4	56.09
P-5	75	75	625	403,125,000	J-5	52.69
P-6	75	75	506	326,370,000	J-6	45.8
P-7	75	75	413	266,385,000	J-7	44.6
P-8	142.49	140	448	982,912,000	J-8	48.73
P-9	101.4	110	357	486,234,000	J-9	68.39
P-10	122.2	125	680	1,191,360,000	J-10	71.87
P-11	95.68	110	1156	1,574,472,000	J-11	30.89
P-12	79.49	90	1992	1,833,636,000	J-12	37.11
P-13	75	75	518	334,110,000	J-13	39.71
P-14	179.49	180	470	1,705,630,000	J-14	42.44
P-15	76.95	90	519	477,739,500	J-15	52.51
P-16	83.23	90	637	586,358,500	J-16	60.1
P-17	90.11	90	408	375,564,000	J-17	58.57
P-18	109.48	110	425	578,850,000	J-18	45.45
P-19	105.97	110	324	441,288,000	J-19	57.13
P-20	90.11	90	435	400,417,500	J-20	41.92
P-21	229.44	250	364	2,536,352,000	J-21	60.15
P-22	105.97	125	279	488,808,000		
P-23	85.79	90	715	658,157,500		
P-24	123.17	125	584	1,023,168,000		
P-25	166.25	180	358	1,299,182,000		
P-26	132.57	140	789	1,731,066,000		
P-27	250	250	189	1,316,952,000		
هزینه نهایی Total Cost				21,623,954,000	تصویب شد Approved	



شکل ۴- خروجی بهینه قطر و سرعت جریان در لوله‌های شبکه توزیع آب زعفرانیه.

Figure 4. Optimal output of diameter and flow velocity in the pipes of the Zafaraniyeh water distribution network.

همان‌گونه که (۳۳) اشاره کرده است، این روش‌ها به دقت داده‌های ورودی وابسته هستند و نیازمند به‌روزرسانی مداوم مدل‌ها بر اساس شرایط واقعی هستند. این محدودیت در مدل‌سازی‌های بزرگ و پیچیده، منابع محاسباتی سنگین و زمان‌بر می‌طلبد. ما این ملاحظات را در مطالعه حاضر مورد توجه قرار دادیم.

تحلیل و مقایسه الگوریتم SQP: الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی (SQP) یکی از کارآمدترین روش‌ها برای حل مسائل بهینه‌سازی مقید غیرخطی است. این الگوریتم به دلیل همگرایی سریع و دقت بالا، نقش مهمی در حوزه‌های مختلف مهندسی و علوم کاربردی دارد. برای مثال، SQP در زمینه‌های گوناگونی به کار رفته است؛ از جمله: بهینه‌سازی کنترل چاه‌ها در مخازن هیدروکربوری (۱۵)، مدیریت جریان بهینه توان در شبکه‌های توزیع (۱۶)، تحلیل جذب CO₂ (۱۷)، کنترل پیش‌بین مدل‌محور در خودروهای سلول سوختی (۱۸) و بازیابی سیگنال‌های پراکنده (۱۹).

۲- مقایسه با مطالعات پیشین و جایگاه پژوهش

کاربرد **WaterGEMS** در مدل‌سازی شبکه زعفرانیه با رویکردهای مشابه در پژوهش‌های دیگر (۳۹، ۴۰ و ۴۱) همخوانی دارد. این نرم‌افزار توانمندی بالایی در شبیه‌سازی جامع و واقع‌گرایانه سیستم‌های توزیع آب ارائه می‌دهد. **WaterGEMS** به مهندسان امکان می‌دهد عملکرد شبکه را تحت سناریوهای مختلف، از جمله تعریف جزئیات شبکه، تخصیص تقاضا و مدل‌سازی المان‌های کنترلی، ارزیابی کنند (۳۲، ۳۳، ۳۶ و ۳۷). همانند مطالعات پیشین، پژوهش حاضر نیز بر دقت **WaterGEMS** در شبیه‌سازی دقیق و شناسایی مشکلات هیدرولیکی (مانند نواحی با فشار یا سرعت جریان نامناسب) تأکید می‌کند (۳۱ و ۳۶). نقطه تمایز این پژوهش در تلفیق **WaterGEMS** با یک الگوریتم بهینه‌سازی خارجی در محیط **MATLAB** است. این رویکرد امکان می‌دهد تا از تحلیل‌های صرفاً شبیه‌سازی فراتر رفته و به طراحی بهینه با هدف مشخص (کاهش هزینه) وارد شویم.

نداشته باشد. در مقابل، رویکرد SQP با حل مستقیم مسئله غیرخطی، دقت بالاتری در تعیین قطرهای بهینه ارائه می‌دهد، هرچند ممکن است برای کاربردهای زمان واقعی پرفرکانس، زمان محاسباتی بیش‌تری نیاز باشد. این تفاوت، تکامل رویکردهای بهینه‌سازی براساس هدف (طراحی در مقابل عملیات) و نوع مسئله (ایستا در مقابل پویا) در شبکه‌های توزیع آب را نشان می‌دهد.

سایر پژوهش‌ها نیز به جنبه‌های متفاوت شبکه‌های توزیع آب پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، نویسندگان (۲۸) به بهینه‌سازی انتخاب پمپ به عنوان توربین (PAT^۵) برای بازیابی انرژی پرداخته‌اند. هم‌چنین پژوهش‌گران (۳۰) بر مکان‌یابی بهینه حسگرهای کیفیت آب با تمرکز بر قابلیت مشاهده‌پذیری شبکه تأکید دارند. اگرچه این مطالعات اهداف متفاوتی داشته‌اند، اما همگی بر اهمیت رویکردهای بهینه‌سازی سیستماتیک برای ارتقای کارایی و عملکرد شبکه‌های توزیع آب، فراتر از صرفاً تحلیل هیدرولیکی، تأکید می‌کنند.

۳- محدودیت‌ها و پیشنهادها برای پژوهش‌های آتی:
با وجود نتایج مطلوب این پژوهش، لازم است به محدودیت‌های آن اشاره کنیم. الگوریتم SQP، مانند دیگر روش‌های گرادیان‌محور، به بهینه محلی همگرا می‌شود. اگرچه این بهینه در بسیاری از کاربردهای مهندسی رضایت‌بخش است، اما در مسائل پیچیده با فضای جستجوی ناهموار، تضمینی برای یافتن بهینه سراسری وجود ندارد. بر این اساس، پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی ارائه می‌شود:

ترکیب الگوریتم SQP با رویکردهای فراابتکاری^۶ بررسی شود؛ هدف این ترکیب، بهره‌مندی از مزایای سرعت همگرایی SQP و قابلیت جستجوی سراسری الگوریتم‌های فراابتکاری است.

الگوریتم SQP در مقایسه با الگوریتم‌های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک (GA^۱) (۷) یا بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO^۲) (۲۴ و ۲۹)، کارایی محاسباتی بالاتری را برای بهینه‌سازی قطر لوله‌ها، به‌ویژه در مسائل با متغیرهای کم‌تر، ارائه داد. مزیت اصلی SQP در مدیریت مستقیم قیود (مانند حداقل فشار و سرعت مجاز) نهفته است. این قابلیت، نیاز به توابع جریمه پیچیده را از بین می‌برد و همگرایی پایدارتر و دقت بالاتری در رعایت محدودیت‌ها به همراه دارد. الگوریتم‌های فراابتکاری برای جستجوی فضای گسترده راه‌حل و یافتن بهینه‌های سراسری در مسائل بسیار بزرگ یا چندهدفه (همانند (۲۴) و (۱۴)) کارآمدتر هستند. با این حال، SQP به دلیل ماهیت گرادیان‌محور خود، به سرعت به یک بهینه محلی با دقت بالا همگرا می‌شود. این ویژگی، SQP را برای مسائل بهینه‌سازی طراحی که نیازمند دقت بالا در رعایت قیود هیدرولیکی و مهندسی هستند، به انتخابی مناسب تبدیل می‌کند.

مقایسه با رویکردهای نوین‌تر مانند برنامه‌ریزی پوششی متوالی (SCP^۳) که توسط (۲۳) برای مدیریت فشار در زمان واقعی ارائه شد، نشان‌دهنده تفاوت‌های کلیدی است. الگوریتم SQP در این مطالعه بر بهینه‌سازی طراحی (تعیین قطر لوله‌ها) تمرکز دارد، در حالی‌که کار دای^۴ بر بهینه‌سازی عملیاتی (مدیریت فشار) متمرکز است. روش Dai از یک NLP محذب خطی‌شده استفاده می‌کند. این روش برای کاربردهای زمان واقعی و تغییرات کم‌دامنه تقاضا مناسب است و سرعت محاسباتی بالایی دارد. با وجود این، راه‌حل‌های آن تقریبی است و ممکن است در مواجهه با تغییرات ناگهانی تقاضا، دقت کافی

- 1- Genetic Algorithm
- 2- Particle Swarm Optimization
- 3- Sequential Covering Programming
- 4- Dai

5- Pump As Turbine
6- Metaheuristic Approaches

عملکرد مهندسی دست یابد. این مطالعه نشان داد که الگوریتم SQP به دلیل توانایی خود در حل مسائل غیرخطی مقید با همگرایی سریع و دقت بالا، یک ابزار قدرتمند برای بهینه‌سازی طراحی شبکه‌های توزیع آب است. در مقایسه با بسیاری از الگوریتم‌های فراابتکاری، SQP مزیت مدیریت مستقیم و پایدار قیود را دارا بوده و کارایی محاسباتی بالاتری را برای مسائل طراحی با تعداد متغیرهای مشخص ارائه می‌دهد. یکپارچه‌سازی WaterGEMS و MATLAB نیز یک چارچوب کارآمد برای تحلیل، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تکراری شبکه فراهم آورد که قابلیت کاربرد بالایی در سناریوهای واقعی طراحی دارد. مشارکت اصلی این پژوهش در ارائه یک روش عملی و دقیق برای طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب با تأکید بر کمینه‌سازی هزینه و حفظ عملکرد هیدرولیکی، با استفاده از ابزارهای استاندارد صنعت مهندسی آب است. این روش به مهندسان و برنامه‌ریزان شهری کمک می‌کند تا سیستم‌های آبرسانی را با بازدهی بیشتر و هزینه‌های کم‌تر طراحی کرده و در عین حال، پایداری و قابلیت اطمینان تأمین آب را تضمین کنند. با وجود دستاوردهای این پژوهش، لازم است به محدودیت‌های ذاتی الگوریتم SQP در یافتن بهینه محلی اشاره شود. برای پژوهش‌های آتی، پیشنهاد می‌شود که رویکردهای هیبریدی (ترکیب SQP با الگوریتم‌های فراابتکاری) به منظور جستجوی بهینه‌های سراسری و بررسی مسائل بهینه‌سازی چندهدفه (مانند ترکیب هزینه با قابلیت اطمینان یا انرژی) مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین، پژوهش در زمینه ادغام عدم قطعیت در پارامترهای تقاضا و سیستم (با استفاده از بهینه‌سازی استوار یا تصادفی) و مدل‌سازی جامع‌تر المان‌های دینامیکی شبکه (مانند پمپ‌ها و شیرهای کاهنده فشار) در فرآیند طراحی می‌تواند ارزش علمی و کاربردی این حوزه را افزایش دهد.

مطالعه بهینه‌سازی چندهدفه برای ارائه راه‌حل‌های جامع‌تر؛ در این رویکرد، اهدافی مانند قابلیت اطمینان، پایداری انرژی یا کیفیت آب، علاوه بر هزینه، در نظر گرفته می‌شوند.

بررسی تأثیر عدم قطعیت در تقاضای آب و پارامترهای دیگر بر نتایج بهینه‌سازی، با استفاده از رویکردهای استوار^۱ یا بهینه‌سازی تصادفی^۲.

گنجاندن جامع‌تر المان‌های پویاتر شبکه (مانند پمپ‌ها و شیرهای کنترل فشار) در فرآیند بهینه‌سازی طراحی و نه صرفاً بهینه‌سازی بهره‌برداری.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بهینه‌سازی طراحی شبکه توزیع آب شهرک زعفرانیه در بیرجند، یک روش‌شناسی ترکیبی را ارائه داد که شامل مدل‌سازی هیدرولیکی دقیق در نرم‌افزار WaterGEMS و بهینه‌سازی محاسباتی با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی در محیط MATLAB بود. هدف اصلی، کمینه‌سازی هزینه سرمایه‌گذاری شبکه با تضمین عملکرد هیدرولیکی مطلوب، شامل تأمین حداقل فشار و سرعت جریان مجاز در تمامی گره‌ها و خطوط لوله، بوده است. نتایج حاصل از اعمال الگوریتم SQP-WDN نشان داد که این رویکرد قادر است قطرهای بهینه لوله‌ها را با در نظر گرفتن قیود پیچیده هیدرولیکی و اقتصادی تعیین کند. تحلیل تطبیقی میان قطرهای بهینه محاسباتی و قطرهای تجاری موجود در بازار، استراتژی هوشمندانه الگوریتم را در انتخاب نزدیک‌ترین قطر استاندارد (اغلب بزرگتر برای حفظ حاشیه اطمینان هیدرولیکی) نمایان ساخت. این امر تأکید می‌کند که الگوریتم پیشنهادی توانسته به یک تعادل بهینه بین صرفه اقتصادی و

- 1- Robust Optimization
- 2- Stochastic Optimization

تقدیر و تشکر

بدون تقدیر و تشکر

- مدلسازی و شبیه‌سازی در محیط‌های WaterGEMS و MATLAB
- اعتبارسنجی مدل هیدرولیکی و تحلیل نتایج نهایی
- اصلاح و نهایی‌سازی مقاله

داده‌ها و اطلاعات

اطلاعات مربوط به طرح جامع و تفصیلی شهر و نقشه کاربری پیشنهادی اراضی زعفرانیه از ارگان‌های مربوطه اخذ شده‌است. جمعیت افق طرح با روش‌های مناسب و مقایسه با رشد جمعیت شهر بیرجند محاسبه شده‌است. با توجه به معلوم بودن تراکم‌ها در انتهای طرح، جمعیت تحت سرویس هر لوله مشخص و در نتیجه نیاز آبی هر گره محاسبه گردیده‌است و براساس این محاسبات، طراحی شبکه توزیع آب زعفرانیه در افق ۱۴۳۳ صورت پذیرفت.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

مهدی ناصری

- طرح تحقیق و تدوین کلی روش‌شناسی
- نظارت علمی و هدایت مراحل مدل‌سازی و بهینه‌سازی

اصول اخلاقی

همه نویسندگان رعایت اصول اخلاقی در انجام و انتشار پژوهش را مدنظر قرار داده‌اند.

حمایت مالی

بدون حمایت مالی

منابع

1. Shamshirgaran, R., Malakooti, R., & Akbarpour, A. (2024). A review of technologies for purification of groundwater including heavy metals based on nanotechnology. *Journal of Aquifer and Qanat*, 4(2), 1-34. [In Persian]
2. Tosan, M., Khashei-Siuki, A., Maroosi, A., & Gharib, M. R. (2024). A review of smart water management for sustainable agriculture based on the internet of things. *Water Management in Agriculture*, 11(1), 145-166. [In Persian]
3. Yu, X., Wu, Y., Meng, F., Zhou, X., Liu, S., Huang, Y., & Wu, X. (2024). A review of graph and complex network theory in water distribution networks: Mathematical foundation, application and prospects. *Water Research*, 253, 121238.
4. Taiwo, R., Yussif, A. M., & Zayed, T. (2025). Making waves: Generative artificial intelligence in water distribution networks: Opportunities and challenges. *Water Research X*, 28, 100316.
5. Baazm, Z., Naseri, M., Akbarpour, A., & Zahiri, S. H. (2019). Minimization of Pumping Costs of Unconfined Aquifer under Simulation-Optimization Model Using the Inclined Planes system

- Optimization Algorithm. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(4), 1087-110. [In Persian]
6. Tosan, M., Shamshirgaran, R., & Falaki, M. (2025). A Review of Participatory Management's Role in Reducing Vulnerability and Enhancing Resilience to Climate Change and Drought (2006-2024). *Journal of Drought and Climate change Research*. [In Persian]
 7. Tosan, M., Nourani, V., Kisi, O., & Dastourani, M. (2025). Evolution of ensemble machine learning approaches in water resources management: a review. *Earth Science Informatics*, 18(2), 416.
 8. Cross, H. (1936). Analysis of flow in networks of conduits or conductors. University of Illinois. Engineering Experiment Station. *Bulletin*; no. 286.
 9. Wang, Y., Zhang, Y., Wang, W., Liu, Z., Yu, X., Li, H., Wang, W., & Hu, X. (2023). A review of optimal design for large-scale micro-irrigation pipe network systems. *Agronomy*, 13(12), 2966.
 10. Doğan, B. S., & Sag, T. (2021). Solution of Water Distribution Networks Design with Evolutionary Optimization Techniques. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 28, 638-642.
 11. Pant, M., & Snasel, V. (2021). Design optimization of water distribution networks through a novel differential evolution. *Ieee Access*, 9, 16133-16151.
 12. Kim, D. H., & Jang, D. W. (2024). Optimization of Water Distribution Network Demand Patterns Using Real-Coded Genetic Algorithms. *Water*, 16(20), 2971.
 13. Jandaghi, H., Haghgoo, A., & Tavakoli Moghadam, M. (2024). Optimization of water distribution networks using simulated annealing (SA) with variable neighbourhood search (VNS): a case study in the city of Malard. *Water Practice & Technology*, 19(12), 4958-4986.
 14. Batmaz, V., & Ugur, I. B. (2025). Circulatory system-based optimization algorithm with dynamic penalty function for optimum design of large-scale water distribution networks. *Engineering Optimization*, 57(2), 427-458.
 15. Nguyen, Q., Onur, M., & Alpak, F. O. (2023). Nonlinearly constrained life-cycle production optimization using sequential quadratic programming (SQP) with stochastic simplex approximated gradients (StoSAG). SPE Reservoir Simulation Conference.
 16. Hasan, M. S., Chowdhury, M. M. U. T., & Kamalasan, S. (2024). Sequential quadratic programming (SQP) based optimal power flow methodologies for electric distribution system with high penetration of DERs. *IEEE Transactions on Industry Applications*.
 17. Zhang, Y., Takyi, S. A., Xin, Y., Sheng, Z., Si, M., & Tontiwachwuthikul, P. (2025). A novel economy analysis for advancing CO₂ capture efficiency of post combustion using sequential quadratic programming (SQP) optimization methodology. *Energy*, 315, 134287.
 18. Lin, X., Wang, Z., Zeng, S., Huang, W., & Li, X. (2021). Real-time optimization strategy by using sequence quadratic programming with multivariate nonlinear regression for a fuel cell electric vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(24), 13240-13251.
 19. Alamdari, M. S., Fatemi, M., & Ghaffari, A. (2023). A modified sequential quadratic programming method for sparse signal recovery problems. *Signal Processing*, 207, 108955.
 20. Shoaib, M., Kainat, S., Raja, M. A. Z., & Nisar, K. S. (2022). Design of artificial neural networks optimized through genetic algorithms and sequential quadratic programming for tuberculosis model. *Waves in random and complex media*, 1-24.
 21. Nourani, V., Tosan, M., Huang, J. J., Gebremichael, M., Kantoush, S. A., & Dastourani, M. (2025). Advances in multi-source data fusion for precipitation estimation: remote sensing and machine learning perspectives. *Earth-Science Reviews*, 270, 105253.
 22. Tosan, M., Gharib, M. R., Attar, N. F., & Maroosi, A. (2025). Enhancing Evapotranspiration Estimation: A

- Bibliometric and Systematic Review of Hybrid Neural Networks in Water Resource Management. *Computer Modeling in Engineering & Sciences (CMES)*, 142(2).
23. Dai, P. D. (2023). A real time optimization based sequential convex program for pressure management in water distribution systems. *Water Resources Management*, 37(12), 4751-4768.
 24. Zarei, N., Azari, A., & Heidari, M. M. (2022). Multi-objective optimization of urban water distribution networks using PESA-II and SPEA-II metaheuristic algorithms. *Irrigation and Water Engineering*, 12(4), 65-83. [In Persian]
 25. Kotwal, M., Pati, S., & Patil, J. (2024). Review on AI and IOT based integrated smart water management and distribution system. *Educ. Adm. Theory Pract*, 30(4), 594-605.
 26. Caballero, J. A., & Ravagnani, M. A. (2019). Water distribution networks optimization considering unknown flow directions and pipe diameters. *Computers & Chemical Engineering*, 127, 41-48.
 27. Taheri, N., & Pishvae, M. S. (2024). A regret-based robust optimization model for municipal water distribution network redesign under disruption risks. *Computers & Chemical Engineering*, 185, 108676. [In Persian]
 28. Mitrovic, D., Morillo, J. G., Rodríguez Díaz, J. A., & Mc Nabola, A. (2021). Optimization-based methodology for selection of pump-as-turbine in water distribution networks: Effects of different objectives and machine operation limits on best efficiency point. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 147(5), 04021019.
 29. Dini, M., Hemmati, M., & Hashemi, S. (2022). Optimal operational scheduling of pumps to improve the performance of water distribution networks. *Water Resources Management*, 1-16. [In Persian]
 30. Taha, A. F., Wang, S., Guo, Y., Summers, T. H., Gatsis, N., Giacomoni, M. H., & Abokifa, A. A. (2021). Revisiting the water quality sensor placement problem: Optimizing network observability and state estimation metrics. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 147(7), 04021040.
 31. Brahmamiah, B., Surendra, K., & Vani, P. (2024). A comprehensive analysis of the water distribution network by using waterGEMS software. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
 32. Awad, R., Wittmanová, R., Stanko, Š., Barloková, D., & Hrudka, J. (2025). Modeling and simulation of a water distribution network using watergems. *Pollack Periodica*, 20(1), 46-52.
 33. Navin, U., & Dohare, D. (2022). A Critical Review on Design and Analysis of Water Distribution Network Using WaterGEMS and EPANET Softwares. *SAMRIDDHI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology*, 14(03), 381-385.
 34. Adhav, N., Zerikunthe, V., Sasane, A., & Deshmukh, A. (2022). Analysis and redesign of 24/7 water distribution network using water GEMS software. *Int J Res Appl Sci Eng Technol (IJRASET)*. ISSN, 2321-9653.
 35. KS, B., AA, C., SG, L., CVSR, P., & HM, A. (2024). Water distribution network leakage analysis using watergems: a case study from westmooring, trinidad and tobago. *Larhyss Journal* (59).
 36. Beker, B. A., & Kansal, M. L. (2021). Use of WaterGEMS for hydraulic performance assessment of water distribution network: a case study of Dire Dawa City, Ethiopia. *Advances in Energy and Environment: Select Proceedings of TRACE 2020*.
 37. Mohseni, U., Pathan, A. I., Agnihotri, P. G., Patidar, N., Zareer, S. A., Saran, V., & Rana, V. (2022). Design and analysis of water distribution network using WaterGEMS—A case study of Narangi Village. *Intelligent Computing & Optimization: Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent*

- Computing and Optimization 2021* (ICO2021) 3.
38. Desai, S., & Rajapara, G. (2021). Leakage optimization of water distribution network using artificial intelligence. In *Advanced Modelling and Innovations in Water Resources Engineering: Select Proceedings of AMIWRE 2021* (pp. 265-284). Springer.
39. Awe, O., Okolie, S., & Fayomi, O. (2019). Review of water distribution systems modelling and performance analysis softwares. *Journal of physics: conference series*.
40. Sutharsan, M. (2023). Optimizing the water distribution network of community water supply using different computer simulation techniques. *Journal of Science of the University of Kelaniya*.
41. Ebrahimi, M., & Mohammadi, M. (2021). Numerical simulation of quantitative and qualitative parameters in water supply networks by WaterGEMS. *Iranian Water Researches Journal*, 15(1), 45-53. [In Persian]
42. Bazaraa, M. S., Sherali, H. D., & Shetty, C. M. (2006). Nonlinear programming: theory and algorithms: *John wiley & sons*.
43. Tosan, M., Shamshirgaran, R., & Dastourani, M. (2025). Application of the Combination of Remote Sensing and Machine Learning Approaches in Predicting Hydrological Parameters: A Bibliometric Analysis. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(3), 825-850. [In Persian]
44. Song, X., Wang, J., Wang, J., Sun, L., Feng, Y., & Li, Z. (2023). Sequential quadratic programming-based non-cooperative target distributed hybrid processing optimization method. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 34(1), 129-140.
45. Ferrarese, G., Medoukali, D., Mirauda, D., & Malavasi, S. (2024). Review of Metaheuristic Methodologies for Leakage Reduction and Energy Saving in Water Distribution Networks. *Water Resources Management*, 38(11), 3973-4001.
46. Alperovits, E., & Shamir, U. (1977). Design of optimal water distribution systems. *Water resources research*, 13(6), 885-900.

