

Optimal Sensor Placement for Contamination Detection in Water Distribution Systems (Case Study: A Part of Mashhad's Drinking Water Network)

Siroos Harif^{1*}, Seyed Ali Ghasemi², Fariba Ghanbari³

¹Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Nikbakht, University of Sistan and Baluchestan, Iran

²Head of Research Department, Mashhad Water and Wastewater Company, Iran

³Head of Water Quality Control Department, Mashhad Water and Wastewater Company, Iran

Corresponding Author's E-mail: siroos.harif@eng.usb.ac.ir

Received: 21 Sep. 2025

Accepted: 28 Nov. 2025

Revised: 02 Nov. 2025

Published: 22 Sep. 2024



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: Water distribution systems (WDSs) are vulnerable to accidental or intentional contamination events due to their large size and complex configurations. In this research, to reduce the impact of pollution on the health of consumers, the optimization-simulation approach was used to determine the optimal locations of quality sensors in a part of Mashhad water distribution network. EPANET software as simulator and multi-objective genetic algorithm as an optimizer are employed to a) maximize the detection likelihood b) minimize expected detection time and c) minimize the mass of contamination consumed. To achieve more realistic answers, the contaminant injection node, injection time, mass rate and duration of injection are considered indefinitely. The results showed that by installing only one or two sensors, 21.3% and 41.6% of contamination events can be detected, respectively. Also, by installing only one sensor in the Mashhad water distribution network, the detection time and the amount of polluted water consumed can be reduced by 17.8 and 37 percent, respectively.

Keywords Water Network Pollution, Water Distribution Networks, Network Quality Management, Quality Sensors, EPANET

Introduction: Water distribution systems are essential infrastructures that deliver drinking water to consumers. Ensuring their safety is a critical public concern, as these systems are vulnerable to both accidental and intentional contamination.

When an event occurs, it can have a significant impact on society and the economy. For example, in 2016, the water distribution networks of Beijing and Hong Kong were contaminated. Unfortunately, the contamination was not identified until people consumed the contaminated water for a long time. Such incidents highlight the urgent need for rapid contamination detection, accurate source identification, and effective mitigation strategies to minimize adverse consequences.

Previous studies have investigated the optimal placement of contamination detection sensors in water distribution networks. Harif et al. (2023) addressed this problem using NSGA-III, determining optimal sensor locations based on four objective functions: (1) maximizing detection coverage, (2) minimizing detection time, (3) maximizing redundancy, and (4) minimizing the number of contaminated nodes. Shahra and Wu (2023) studied optimal sensor placement in two different distribution networks by randomly selecting contamination scenarios. For these scenarios, they identified optimal sensor locations using an evolutionary optimization algorithm considering two objectives: minimizing the volume of contaminated water consumed and minimizing the detection time of contamination events.

A review of previous studies on sensor placement optimization shows that, significant simplifications have often been applied to reduce computational complexity. These include limiting injection nodes, constraining the number of sensors, and considering only a restricted set of contamination scenarios. Moreover, many uncertainties

associated with contamination events, such as the time, duration, and injection rate of pollutants, have been neglected.

To address these limitations, this study proposes a multi-objective optimization approach to determine optimal sensor locations in a part of Mashhad's water distribution network, aiming to: (a) maximize detection likelihood, (b) minimize detection time, and (c) minimize the volume of contaminated water consumed.

Methodology: In this study, EPANET was employed to simulate the hydraulic behavior and water quality within the distribution network. For the optimization process, both single and multi-objective genetic algorithms were applied. [Figs. 1](#) and [2](#) show, respectively, the general flowchart of the NSGA-II algorithm and the study zone.

Contamination scenarios are defined as follows:

1. Intrusion can occur at all nodes except dead ends.
2. Events may start anytime from 00:00 to 24:00.
3. Injection rates range from 1–30 g/min.
4. Injection durations vary between 30–180 minutes.

To define contamination scenarios, the following assumptions are made:

- ◆ Contaminants are introduced every 30 minutes (Start Time).
- ◆ Injection rates of 5, 10, 20, and 30 g/min are considered (Mass).
- ◆ Durations of 40, 80, 120, and 160 minutes are used (Duration Time).

This results in 559,104 possible scenarios ($728 \times 4 \times 4 \times 48$). Due to this large number, a representative subset of 1,000 scenarios is selected to form the contamination matrix for optimization. [Fig. 3](#) presents the flowchart of the steps involved in selecting the top 1000 contaminants for the contamination matrix.

Results and Discussion: Since the number of sensors is not predetermined, it is also considered as an objective function. The allowable range is set between 1 and 20 sensors. Initially, the number of sensors was investigated versus the maximum detection of pollutants. As shown in [Fig. 4](#), results showed that the detection likelihood reaches its maximum value of 100% when 18 sensors are deployed. Conversely, the minimum detection likelihood, observed when only a single sensor is used, is limited to 21.3%. [Fig. 5](#) illustrates the relationship between the number of sensors and the minimum detection time, showing that the shortest detection time (91 minutes) occurs with the maximum number of sensors (20), whereas with only one sensor, detection time rises to 1184.6 minutes.

The analysis of the number of sensors versus the volume of contaminated water consumed showed that the optimal solution is one that prevents the consumption of contaminated water with the minimum number of deployed sensors. As expected, achieving the lowest volume of contaminated water consumption requires the maximum number of sensors (20), reducing the consumed contaminated water to 24.9 million liters. In contrast, when only a single sensor is installed, the consumed volume reaches its maximum, totaling 237.2 million liters ([Fig. 6](#)).

The optimal Pareto front was analyzed for two sets of conflicting objectives in sensor placement within water distribution networks. The first set considered maximizing detection likelihood (F_1) versus minimizing the expected detection time (F_2). As shown in [Fig. 7](#), to maximize detection probability, sensors should be located at the downstream nodes of the network. In contrast, minimizing detection time requires placing sensors near input nodes, which conflicts with maximizing detection likelihood. Consequently, sensor locations must be optimized by simultaneously considering both objectives. The second set of objectives involved maximizing detection likelihood (F_1) versus minimizing the volume of contaminated water consumed by users (F_3). According to [Fig. 8](#), again, while detection probability favors sensor placement at the downstream nodes of the network, reducing contaminated water consumption necessitates locating sensors close to injection points. These trade-offs highlight the need for a multi-objective optimization approach to determine sensor locations that effectively balance detection efficiency and public health protection in water distribution systems.

Conclusion: This study employed a simulation-optimization framework using EPANET and genetic algorithms to determine optimal sensor locations in Mashhad's drinking water network. Three objectives were considered: maximizing detection likelihood (F_1), minimizing detection time (F_2), and minimizing the volume of contaminated water consumed (F_3).

Results showed that a single sensor could detect over 20% of contamination events, reducing detection time by

17.8% and contaminated water consumption by 37%. To maximize detection likelihood, sensors should be placed at downstream nodes, whereas minimizing detection time and contaminated water volume requires placement near input nodes. These conflicting objectives emphasize the need for multi-objective optimization for effective sensor placement.

© 2024 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

جانمایی بهینه سنسورهای تشخیص آلودگی در شبکه‌های توزیع آب شرب شهری (مطالعه موردی: بخشی از شبکه آب شرب شهر مشهد)

سیروس حریف^{۱*}، سید علی قاسمی^۲، فریبا قنبری^۳

^۱استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

^۲رئیس گروه کنترل کیفیت آب شرکت آب و فاضلاب مشهد، ایران

^۳رئیس گروه تحقیقات شرکت آب و فاضلاب مشهد، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: siroos.harif@eng.usb.ac.ir

وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۷

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۱ تاریخ چاپ: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

چکیده: سیستم‌های توزیع آب به دلیل پراکندگی و گستردگی، مستعد ورود آلودگی به صورت تصادفی و عمدی می‌باشند. در این پژوهش به منظور کاهش تاثیر آلودگی بر سلامت مصرف‌کنندگان از رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی به منظور تعیین محل‌های بهینه قرارگیری سنسورهای کیفی در بخشی از شبکه آب شرب شهر مشهد استفاده شده است. نرم‌افزار EPANET به عنوان شبیه‌ساز و الگوریتم‌های ژنتیک تک و چندهدفه به عنوان بهینه‌ساز، جهت (الف) بیشینه‌سازی درصد تشخیص (ب) کمینه‌کردن زمان تشخیص (ج) کمینه‌کردن حجم آب آلوده مصرفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. جهت دستیابی به پاسخ‌های با تطابق بیشتر به واقعیت محل، زمان، مدت‌زمان و مقدار آلاینده وارد شده به شبکه توزیع به صورت نامعین در نظر گرفته شد. نتایج حاصل نشان داد که با نصب تنها یک یا دو سنسور در شبکه توزیع می‌توان به ترتیب ۲۱.۳ و ۴۱.۶ درصد از آلاینده‌های وارد شده به شبکه توزیع را شناسایی کرد. همچنین با نصب تنها یک سنسور در شبکه می‌توان زمان تشخیص و میزان آب آلوده مصرف شده مشترکین را به ترتیب ۱۷.۸ و ۳۷ درصد کاهش داد.

کلیدواژه‌ها: آلودگی شبکه آب، سنسورهای کیفی، سیستم‌های توزیع آب، مدیریت کیفی سیستم توزیع، EPANET.

۱- مقدمه

مصرف‌کنندگان چه به لحاظ کمی (دبی و فشار) و چه از منظر کیفی (خواص فیزیکی و شیمیایی آب) متناسب با استانداردهای موجود است (Basupi, 2013). ورود آلاینده‌های شیمیایی یا بیولوژیکی به شبکه تهدیدی مستقیم برای جمعیت انسانی است و ممکن است باعث

سیستم‌های توزیع آب اجزای اصلی زیرساخت‌های عمومی برای انتقال آب آشامیدنی از منابع به مصرف‌کنندگان می‌باشند. هدف سیستم‌های توزیع آب تامین نیازهای آبی

شبکه آب شد (Chinadaily, 2014). سال ۲۰۱۶، شبکه آب توزیع شهرهای پکن و هنگ کنگ در کشور چین آلوده شدند، متأسفانه، در هر دو مورد آلودگی موجود در شبکه کشف نشده است تا زمانی که ساکنان برای مدت طولانی آب آلوده را مصرف کرده‌اند. در سال ۲۰۱۹ در نروژ ۲۷،۰۰۰ مصرف‌کننده تحت‌تأثیر آب آلوده‌شده توسط ماده کلستریدیوم قرار گرفتند (Qiu et al., 2020).

تأثیرات تهدیدات آلودگی بر سلامت عمومی را می‌توان با مدیریت صحیح اموری از قبیل: ۱- شناسایی وجود آلودگی در شبکه (Dehghani Darmian M. et al., 2023; Harif S. et al., 2023a) ۲- شناسایی و تعیین مشخصات منبع آلودگی واردشده به شبکه (Harif S. et al., 2021) و ۳- مدیریت پیامد ناشی از ورود آلودگی به سیستم توزیع (Bashi-Azghadi S.N. et al., 2018; Harif S. et al., 2023b)؛ به حداقل رساند. همان‌طور که عنوان شد اولین گام جهت مقابله با آلودگی واردشده به شبکه‌های توزیع آب، اطلاع از ورود آلودگی به شبکه است. به‌منظور تشخیص آلودگی در شبکه توزیع از حسگرهای تشخیص آلاینده در شبکه آب استفاده می‌شود. این سنسورها در نقاط مختلف شبکه نصب می‌شوند و ایستگاه‌های پایش را به وجود می‌آورند تا دستگاه‌های نظارت را از وجود آلودگی در شبکه مطلع کنند. اگر بتوان همه گره‌های سیستم را با اطمینان کنترل کرد، حداکثر سطح ایمنی به دست می‌آید؛ اما متأسفانه، این امر به دلیل مسائل مالی غیرممکن بوده؛ لذا به دلیل هزینه‌های زیاد مربوط به تهیه، نگهداری و مراقبت از سنسورها از یک‌طرف و اهمیت شناسایی و تشخیص به‌موقع ورود آلودگی به شبکه توزیع و کاهش خطرهای ناشی از آن بر روی مصرف‌کنندگان از سوی دیگر، مکان‌یابی بهینه آن‌ها در شبکه‌های توزیع آب ضروری است.

مطالعات متعددی در نقاط مختلف دنیا در زمینه جانمایی بهینه سنسورها انجام شده است. به‌طورکلی رویکردهای جانمایی سنسورهای کیفی در شبکه‌های توزیع آب را می‌توان به سه دسته ذیل تقسیم نمود:

بیماری گسترده و مرگ‌ومیر شود که بسیار درخور توجه و البته نگران‌کننده می‌باشد (Palleti et al., 2016)؛ بنابراین، ایمنی سیستم‌های توزیع آب همیشه یک مسئله مهم برای جوامع بوده است. بااین‌حال، سیستم‌های توزیع آب در بسیاری از شهرهای جهان به دلایل گوناگون با تهدید آلودگی تصادفی یا عمدی در هنگام انتقال از تصفیه‌خانه به مصرف‌کنندگان مواجه هستند. به همین دلیل است که آلودگی آب در شبکه‌های توزیع با سهمی معادل ۲۹ درصد مهم‌ترین عامل شیوع بیماری‌های منتقله از راه آب دانسته شده است (Ghanadi, 2003). در ایالات متحده، تقریباً ۲۰٪ از شیوع بیماری‌های منتسب به آب به آلودگی شبکه لوله نسبت داده می‌شود (Craun and Calderon, 2001). در ایران نیز مهم‌ترین عامل ایجاد و شیوع بیماری‌های انتقال‌یافته توسط آب، آلودگی آب در شبکه‌های توزیع آب آشامیدنی است. به‌این‌ترتیب توجه به کیفیت آب در شبکه‌ها و خطوط آب‌رسانی در زمره یکی از مهم‌ترین سرفصل‌های کاری واحدهای کنترل کیفیت قرار دارد (Ghanadi, 2003).

طبق گزارش بانک جهانی سالانه ۳ میلیون نفر بر اثر بیماری‌های مرتبط با آب جان خود را از دست می‌دهند. حدود ۸۰ درصد از مرگ‌ومیر کودکان در اثر بیماری‌های گوارشی مانند اسهال به دنبال مصرف آب آشامیدنی آلوده روی می‌دهد (Balbus and Lang, 2001). مطابق با گزارش‌های اعلام‌شده در سال ۲۰۱۷ سالانه ۴۸۵۰۰۰ کودک در اثر بیماری مرتبط با آب آلوده (اسهال) جان خود را از دست می‌دهند (WHO, 2017). در سال ۲۰۲۲، در سراسر جهان، حداقل ۱.۷ میلیارد نفر از منبع آب آشامیدنی آلوده به مدفوع استفاده می‌کنند (WHO, 2022). هنگامی که یک رخداد در سیستم انتقال آب اتفاق می‌افتد، مانند آلودگی آب در مقیاس وسیع به‌صورت تصادفی یا حمله مخرب، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر جامعه و اقتصاد داشته باشد. به‌طور مثال در سال ۲۰۱۴ در غرب ویرجینیا ۳۰۰۰۰۰ مصرف‌کننده زمانی که سیستم توزیع آب آشامیدنی به‌طور تصادفی با ماده خام شیمیایی متیل سیکلوهگزان متانول آلوده‌شده بود، تحت‌تأثیر قرار گرفتند (Cooper, 2014). همچنین در سال ۲۰۱۴، بنزن از یک کارخانه شیمیایی در کشور چین به‌صورت تصادفی وارد

از الگوریتم بهینه‌سازی تک‌هدفه به تعیین مکان‌های بهینه سنسورها باهدف مینیمم کردن سطح سرویس پرداختند. Watson et al. (2004) اولین افرادی بودند که بهینه‌سازی چندهدفه را برای جانمایی سنسورهای تشخیص آلودگی در شبکه توزیع آب معرفی کردند، آن‌ها با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، به‌منظور جانمایی بهینه ایستگاه‌های پایش پنج تابع هدف: جمعیت افرادی که در معرض آلودگی قرار می‌گیرند، زمان تشخیص آلودگی، حجم مصرف‌شده آب آلوده، تعداد شناسایی‌های ناموفق و میزان آلودگی منتشرشده را مدنظر قرار دادند. Comboul and Ghanem (2013) تحلیل عدم قطعیت را برای جانمایی بهینه سنسور باهدف بیشینه‌کردن احتمال تشخیص نفوذ آلودگی در شبکه توسعه دادند. در این تحقیق از شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای عدم قطعیت نیاز آبی استفاده شد. Nazempour et al. (2018) با استفاده از تئوری شبکه پیچیده، دو هدف کمینه‌سازی زمان پوشش آلودگی و بیشینه‌کردن پوشش نیاز آبی گره‌ها را برای جانمایی بهینه سنسورها در نظر گرفتند. Naserizade et al. (2018) یک مدل احتمالاتی با درنظرگرفتن احتمال ورود آلودگی هم‌زمان از چند گره توسعه داده و از الگوریتم NSGA-II برای کمینه‌کردن خطرات و هزینه استفاده کردند. de Winter et al. (2019) اهداف مختلفی شامل احتمال تشخیص و شناسایی آلودگی توسط سنسور، متوسط زمانی که سنسور آلودگی را تشخیص می‌دهد و تخمین اثر حمله را در یک رابطه جمع‌بندی کردند و یک مدل تک‌هدفه مبتنی بر الگوریتم حریصانه برای جانمایی بهینه سنسورهای شبکه توزیع آب توسعه دادند. Khorshidi et al. (2019) از روش بازی رهبر - پیرو استفاده کرده و دو هدف کاهش هزینه سنسور و کاهش زمان تشخیص آلودگی را برای جانمایی بهینه سنسورها در نظر گرفتند. Ponti et al. (2021) یک الگوریتم تکاملی جدید به‌منظور تخمین و تحلیل راه‌حل‌های بهینه پرتو فرانت برای جانمایی بهینه سنسورهای تشخیص آلودگی در سیستم‌های توزیع معرفی کردند. نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم NSGA-II بهتر عمل می‌کند. Xu et al. (2022)

۱. نظر متخصصان: در رویکرد اول از تجربیات افراد باتجربه و خبره برای جانمایی ایستگاه‌های پایش استفاده می‌شود (Berry et al., 2006; Trachtman, 2008).

۲. روش‌های رتبه‌بندی: در این رویکرد محل‌های نصب سنسورها بر اساس اعمال قوانینی مشخص تعیین می‌شوند. برای مثال در محل اماکن مهم شهر مانند بیمارستان‌ها، مدارس و دانشگاه‌ها، مساجد و غیره سنسورهای کیفی نصب می‌شوند (Bahadur et al., 2003; Xu et al., 2008; Ghimire and Barkdoll, 2006; Chang et al., 2012).

۳. بهینه‌سازی-شبیه‌سازی: در این رویکرد از مدل‌های شبیه‌ساز - بهینه‌ساز استفاده می‌شود. در این مدل‌ها با شبیه‌سازی ورود آلودگی‌های مختلف، محل بهینه سنسورها با کمک یک روش بهینه‌سازی تعیین می‌شود. رویکرد بهینه‌سازی - شبیه‌سازی به دو صورت بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه مورداستفاده قرار می‌گیرد. توابع هدف به‌طورکلی شامل مواردی است که آلوده‌شدن مصرف‌کنندگان را حداقل کند. این توابع هدف شامل: شناسایی به‌موقع (سریع) آلودگی، کمینه‌کردن اثر آلودگی، ماکزیمم کردن احتمال تشخیص آلودگی، ماکزیمم کردن پوشش تقاضا و مینیمم کردن خطاهای مربوط به عملکرد سنسورها می‌باشند (Harif S. et al., 2023a; Hart and Murray, 2010; Adedjoja et al., 2018).

تحقیقات در زمینه جانمایی سنسورهای سنجش کیفیت آب در شبکه توزیع آب به دهه ۹۰ برمی‌گردد. Lee and Deininger (1992) ارزیابی کیفی سیستم‌های توزیع آب را منوط به نمونه‌برداری‌های پی‌درپی از آب در مکان‌های مناسب دانستند. ایشان از یک روش برنامه‌ریزی خطی با هدف مینیمم کردن تعداد سنسورهای نصب‌شده در شبکه و ماکزیمم کردن پوشش قسمت زیادی از سیستم توزیع آب شرب، توسط هر یک از سنسورهای تشخیص آلاینده استفاده کردند. Kessler et al. (1998) و Ostfeld and Kessler (2001)، مفهوم سطح سرویس^۱ (حجم آلودگی که قبل از شناسایی توسط ایستگاه‌های پایش توسط مصرف‌کنندگان مصرف می‌شود) را ارائه کردند و با استفاده

¹ level of service

باشد، چرا که کارایی سنسورها و زمان شناسایی آلاینده‌ها به رفتار هیدرولیکی جریان وابسته است (Abbaszadeh H. et al. 2024). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که شبکه‌های توزیع آب شرب می‌توانند علاوه بر انتقال آب، به عنوان منبع انرژی الکتریکی پاک مورد استفاده قرار گیرند، با جایگزینی شیرهای کاهنده فشار با میکروتوربین‌ها (PAT)، انرژی هدررفته بازیابی شده و برق پاک تولید می‌شود. این یافته‌ها اهمیت تحلیل هیدرولیکی شبکه را برای تعیین نقاط بهینه نصب تجهیزات جانبی، از جمله سنسورهای پایش کیفیت آب، برجسته می‌کند (Süme V. et al. 2024).

بررسی مطالعات پیشین در زمینه بهینه‌سازی محل‌های قرارگیری حسگرهای تشخیص ورود آلاینده در شبکه‌های توزیع آب نشان می‌دهد که علی‌رغم تلاش‌های گسترده و ارزشمند پژوهشگران مختلف، همچنان محدودیت‌های قابل‌توجهی در این حوزه وجود دارد. یکی از دلایل اصلی این محدودیت‌ها، پیچیدگی بالای مدل‌سازی و شبیه‌سازی شبکه‌های توزیع آب است که محققان را وادار کرده تا برای ساده‌سازی مسئله، از مجموعه‌ای از فرضیات ساده‌کننده استفاده کنند. به عنوان نمونه، در بسیاری از پژوهش‌ها تنها بخشی از گره‌های شبکه به عنوان محل‌های احتمالی ورود آلاینده در نظر گرفته شده‌اند و یا تعداد حسگرهای قابل‌نصب محدود شده است. همچنین، در اغلب مطالعات تعداد محدودی از سناریوهای آلودگی تعریف شده و بسیاری از عدم قطعیت‌های موجود در مورد آلاینده‌های وارد شده به شبکه توزیع مانند زمان ورود آلودگی به شبکه، مدت‌زمان نفوذ آلاینده به شبکه و نرخ تزریق آلاینده، نادیده گرفته شده‌اند. در واقع، بسیاری از تحقیقات پیشین، طراحی حسگرها را محدود به مجموعه‌ای از سناریوهای خاص یا تصادفی و با در نظر گرفتن تعداد محدودی آلاینده انجام داده‌اند. این بدان معناست که پارامترهایی مانند گره تزریق، زمان شروع آلودگی، مدت‌زمان تزریق و نرخ جرمی آلاینده در یک دامنه محدود موردبررسی قرار گرفته و سپس بر اساس این محدودیت‌ها مکان بهینه حسگرها تعیین شده است. درحالی‌که در یک شبکه واقعی با ساختار پیچیده، وقوع رویدادهای آلودگی می‌تواند در هر یک از گره‌های شبکه و در هر بازه زمانی و با هر شدت و مدت‌زمانی رخ

به جانمایی بهینه سنسورهای تشخیص آلودگی با در نظر گرفتن دو تابع هدف کمینه‌کردن هزینه‌ها و بیشینه‌کردن نظارت بر شبکه‌های توزیع پرداختند. Shahra and Wu (2023) به جانمایی بهینه سنسورهای تشخیص آلودگی در دو شبکه توزیع مختلف پرداختند. ایشان سناریوهای ورود آلودگی به شبکه‌های توزیع را به صورت تصادفی انتخاب کردند. سپس برای سناریوهای انتخابی به تعیین محل بهینه سنسورها با کمک الگوریتم بهینه‌ساز تکاملی با در نظر گرفتن دو تابع هدف: کمینه‌کردن حجم آب آلوده مصرفی و کمینه‌کردن زمان شناسایی ورود آلودگی به شبکه توزیع پرداختند. (Namtirtha et al. (2023 به جانمایی بهینه سنسورها با روش جدیدی به نام EQ-Water پرداختند. ایشان در این روش از تئوری شبکه پیچیده (استفاده از ساختار توپولوژی شبکه) و ویژگی‌های هیدرولیکی شبکه توزیع به منظور جانمایی بهینه سنسورها با در نظر گرفتن چهار تابع هدف: الف: کمینه‌کردن زمان تشخیص، ب: کمینه‌کردن تعداد افراد آلوده شده ج: کمینه‌کردن حجم آب آلوده مصرف شده و د: بیشینه‌کردن درصد تشخیص آلودگی‌ها، استفاده کردند. نتایج بررسی روش پیشنهادی بر روی دو شبکه بنج مارک و دو شبکه واقعی نشان داد که روش معرفی شده روش مناسب و کارا است. (Harif et al. (2023a به جانمایی بهینه سنسورهای تشخیص آلودگی در شبکه‌های آب با الهام از NSGA-III پرداختند. ایشان محل بهینه سنسورها را بر اساس چهار تابع هدف: ۱- بیشینه‌سازی درصد تشخیص، ۲- کمینه‌کردن زمان تشخیص، ۳- بیشینه‌کردن هم‌پوشانی و ۴- کمینه‌کردن تعداد گره‌های آلوده شده تعیین کردند. ایشان در این پژوهش ضرایبی تحت عنوان ضرایب اهمیت بر اساس زمان و تعداد گره‌های آلوده شده برای آلودگی‌های ماتریس آلودگی تعیین نمودند.

تحلیل دقیق رفتار جریان و توزیع انرژی در شبکه‌های توزیع آب برای بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های پایش کیفیت آب ضروری است. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که مدل‌های هوش مصنوعی مانند ANN قادرند اتلاف انرژی جریان در مسیرهای پیچیده را با دقت بسیار بالا پیش‌بینی کنند این قابلیت می‌تواند در تعیین نقاط بهینه نصب سنسورها مفید

۲- روش‌شناسی

۲-۱- معرفی نرم‌افزارهای مورد استفاده

نرم‌افزار EPANET

در این تحقیق به منظور مدل‌سازی هیدرولیکی و کیفی شبکه آبرسانی، مدل کامپیوتری آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا با نام EPANET مورد استفاده قرار گرفته است. EPANET از جمله قدرتمندترین نرم‌افزارهای طراحی شبکه‌های آبرسانی می‌باشد که به صورت رایگان از سوی آژانس حفاظت محیط‌زیست (EPA) ارائه می‌گردد. این نرم‌افزار رفتار هیدرولیکی و کیفی آب را در لوله‌های شبکه آب شرب در دوره‌های زمانی تعیین شده، شبیه‌سازی می‌کند (Rossman, 2000). آلاینده موجود در لوله‌ها با سرعت متوسط جریان آب در داخل لوله‌ها حرکت می‌کند و در زمان انتقال واکنش‌های حجمی و دیواره‌ای (واکنش‌های رشد یا زوال) نیز اتفاق می‌افتد. معادله انتقال در داخل یک لوله به صورت [رابطه ذیل](#) بیان می‌شود. (Rossman, 2000).

$$\frac{\partial c_i(x,t)}{\partial t} = -u_i \frac{\partial c_i(x,t)}{\partial x} + r(c_i(x,t)) \quad (1)$$

که در آن $C_i(x,t)$ غلظت آلاینده‌های موجود در لوله یا گره i و به عنوان تابعی از فاصله x و زمان t ، u_i سرعت جریان در لوله i و r نرخ سرعت واکنش و به عنوان تابعی از غلظت می‌باشند.

EPANET شامل یک کتابخانه پیوند پویا (Toolkit) است که به کاربران اجازه می‌دهد موتور محاسباتی EPANET را بر اساس نیازهای خود سفارشی کنند (Rossman, 2000). خروجی این کتابخانه می‌تواند به عنوان ورودی MATLAB استفاده شود. سپس از این نرم‌افزار برای بهینه‌سازی مکان سنسورها در شبکه‌های توزیع استفاده می‌شود.

الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II

الگوریتم NSGA-II اولین بار توسط سرینیواس و دب در سال ۱۹۹۴ معرفی شد. این الگوریتم بهینه‌ساز یکی از

دهد؛ بنابراین، فضای رویدادهای ممکن عملاً نامتناهی است و محدود کردن آن به چند حالت مشخص، تصویر واقع‌گرایانه‌ای از شرایط احتمالی آلودگی ارائه نمی‌دهد. از سوی دیگر، در نظر گرفتن تمامی رویدادهای ممکن نیز به دلیل حجم محاسبات بسیار بالا و غیرقابل‌شمارش بودن حالات، عملاً امکان‌پذیر نیست.

باتوجه به این چالش‌ها، در مطالعه حاضر رویکردی جامع‌تر اتخاذ شده است. در این پژوهش، به منظور بازنمایی طیف وسیعی از حالات ممکن آلودگی، از یک ماتریس آلودگی استفاده شده که با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک تولید شده است. این ماتریس از بین تمامی سناریوهای ممکن برای ورود آلاینده‌ها به شبکه توزیع، تعدادی را انتخاب می‌کند به گونه‌ای که آلاینده‌های این ماتریس نماینده‌ترین رویدادهای آلودگی محتمل را پوشش می‌دهد و بدین ترتیب، فرایند بهینه‌سازی مکان حسگرها واقع‌بینانه‌تر انجام می‌شود. بر همین اساس، این تحقیق به بهینه‌سازی محل نصب حسگرهای تشخیص آلاینده در بخشی از شبکه توزیع آب شرب شهر مشهد می‌پردازد. در این مطالعه، برخلاف بسیاری از پژوهش‌های پیشین، احتمال وقوع آلودگی از تمامی گره‌های شبکه در تمامی ساعات شبانه‌روز در نظر گرفته شده و همچنین بازه‌های متنوعی برای مدت‌زمان و مقدار آلاینده ورودی به شبکه بررسی گردیده است. ترکیب رویکرد شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در این چارچوب، امکان طراحی مکان‌های نصب حسگرها را با دقت و کارایی بالاتر فراهم می‌سازد و نتایج آن می‌تواند گامی موثر در جهت ارتقای امنیت و ایمنی شبکه‌های توزیع آب شهری باشد.

افزون بر این، در بیشتر تحقیقات گذشته، آلاینده ورودی به شبکه به صورت پایستار در نظر گرفته شده است که می‌تواند بر موقعیت حسگر تاثیر بگذارد. فرض پایستاری آلاینده ممکن است منجر به تخمین نادرست تاثیر و گسترش آلاینده شود، زیرا یک آلاینده وارد شده به شبکه ممکن است با گذشت زمان دچار کاهش غلظت شود یا در اثر واکنش با مواد موجود در آب یک ماده سمی تولید کند؛ بنابراین در این پژوهش فرض پایستار بودن آلاینده برخلاف مطالعات قبلی لحاظ نگردیده است.

الگوریتم‌های کارآمد در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است. NSGA-II زمینه‌ساز شکل‌گیری الگوریتم‌های بهینه‌ساز چندهدفه دیگر می‌باشد، همچنین به دلیل کارایی بالا جزو پرکاربردترین الگوریتم‌های تکاملی ابداع شده است. این الگوریتم از نگرش نخبه‌گرایی استفاده می‌کند و می‌تواند در یک فضای گسترده از متغیر تصمیم و هدف عملیات جستجو را انجام دهد. تفاوت این الگوریتم با الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه در انتخاب اعضای جمعیت که دارای برازندگی بهتری هستند می‌باشد. این الگوریتم جهت انتخاب اعضای بهینه از دو روش مرتب‌سازی نا مغلوب و تعیین شاخص فاصله ازدحامی استفاده می‌کند (Srinivas and Deb, 1994). [شکل ۱](#)، فلوچارت کلی مربوط به الگوریتم NSGA-II را نشان می‌دهد.

۲-۲- معرفی شبکه مورد مطالعه

در این پژوهش پهنه E از شبکه توزیع آب شرب شهر مشهد انتخاب شده است تا محل‌های بهینه قرارگیری سنسورهای تشخیص آلودگی در شبکه موردنظر باتوجه به سه هدف: ۱- بیشینه‌سازی احتمال تشخیص آلاینده‌ها در شبکه، ۲- کمینه کردن زمان مورد انتظار برای تشخیص یک رویداد آلودگی و ۳- کمینه کردن حجم آب مصرفی آلوده؛ تعیین شود. این پهنه دارای مساحتی در حدود ۶۱۱ هکتار می‌باشد. کمترین کد ارتفاعی این پهنه ۱۰۴۷ متر و بالاترین کد ارتفاعی آن ۱۰۹۳ متر می‌باشد. مخزن پهنه E در دامنه دارای ۱۰۰۰۰ مترمکعب حجم می‌باشد ([شکل ۲](#)).

۲-۳- تعیین مشخصات آلودگی‌های وارد شده به شبکه

پس از آماده‌سازی شبکه مورد مطالعه به تعیین مشخصات آلودگی‌های محتمل جهت ورود به شبکه مذکور پرداخته شد. بدین منظور آلودگی‌های وارد شده به شبکه دارای شرایط ذیل می‌باشند:

- ♦ امکان نفوذ آلودگی به شبکه از تمامی گره‌ها (به جز گره‌های قرار گرفته در انتهای شبکه) وجود دارد.
- ♦ زمان شروع نفوذ آلودگی به شبکه در هر ساعت از شروع دوره شبیه‌سازی (ساعت ۰۰:۰۰) تا پایان روز اول

شبیه‌سازی (ساعت ۲۴) می‌باشد.

- ♦ مقدار آلاینده وارد شده به شبکه در بازه بین ۱ تا ۳۰ گرم بر دقیقه قرار دارد.
- ♦ مدت‌زمان تزریق آلودگی به شبکه از بازه بین ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه انتخاب می‌شود.

۲-۴- تشکیل ماتریس آلودگی

در این مرحله به تعیین ماتریس آلودگی (ماتریسی که دارای آلودگی‌های ممکن با گره، غلظت، بازه زمانی و زمان ورود مشخص به شبکه توزیع می‌باشد) پرداخته می‌شود. به‌منظور ساخت و تعیین ماتریس آلودگی ابتدا بایستی آلودگی‌های ممکن تعیین شده سپس ماتریس آلودگی موردنظر انتخاب شود. به‌منظور تعیین آلودگی‌های ممکن فرضیات ذیل را در نظر می‌گیریم:

- ♦ آلاینده‌ها در فاصله زمانی ۳۰ دقیقه‌ای بصورت پیوسته وارد شبکه می‌شوند (Start Time).
- ♦ مقادیر ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ گرم بر دقیقه بعنوان جرم آلاینده وارد شده به شبکه در نظر گرفته می‌شوند (Mass).
- ♦ بازه‌های زمانی ۴۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ دقیقه بعنوان مدت زمان تزریق آلودگی به شبکه در نظر گرفته می‌شوند (Duration Time).

مطابق با بخش ۲-۳، از گره‌های قرار گرفته در انتهای شبکه آلودگی وارد شبکه نمی‌شود؛ لذا با حذف گره‌های انتهایی (۳۶۵ گره) تعداد گره‌های شبکه موردبررسی برابر با ۷۲۸ گره می‌باشد، بنابراین باتوجه به فرضیات بالا تعداد کل آلودگی‌های ممکن معادل $559104 = 728 * 4 * 154$ می‌باشد. این تعداد آلودگی بسیار زیاد می‌باشد؛ لذا در مرحله دوم تعداد ۱۰۰۰ آلودگی را بعنوان ماتریس آلودگی در نظر گرفته و محل‌های بهینه سنسورها را بر اساس این ماتریس آلودگی تعیین می‌شود. برای انتخاب ماتریس آلودگی بایستی از بین ۵۵۹۱۰۴ آلودگی ممکن آن‌دسته از آلودگی‌هایی که نماینده ۵۵۹۱۰۴ آلودگی بوده و مشخصاتی شبیه به این تعداد آلودگی دارند انتخاب شوند. برای انتخاب ماتریس آلودگی از [فرمول ذیل](#) استفاده می‌کنیم (Preis and Ostfeld, 2008).

داده‌های مربوط به ماتریس آلودگی و AN_i و σN_i به ترتیب بیانگر میانگین و انحراف معیار داده‌های مربوط به کل آلودگی‌های موجود می‌باشد. q_j بیانگر دبی خارج شده از گره j ام شبکه می‌باشد. N تعداد کل گره‌های شبکه می‌باشد. $i = 1$ تا 5 به ترتیب بیانگر مختصات X و Y گره‌های شبکه، مقدار جرم آلاینده تزریق شده، زمان ورود آلاینده و بازه زمانی ورود آلاینده به شبکه توزیع می‌باشند.

به‌منظور تعیین ماتریس آلودگی و انتخاب ۱۰۰۰ آلودگی برتر باتوجه‌به فرمولهای (۲) و (۳) بیان شده، از الگوریتم ژنتیک تک هدفه استفاده شده است. بدین منظور ابتدا در گام اول تعداد ۱۰۰۰ آلودگی از بین ۵۵۹۱۰۴ آلودگی ممکن با الگوریتم ژنتیک انتخاب گردید. سپس در ادامه در گام دوم با اتصال نرم‌افزار EPANET با نرم‌افزار MATLAB به شبیه‌سازی ماتریس آلودگی موجود پرداخته شد. **شکل ۳**، فلوچارت مربوط به مراحل انتخاب ۱۰۰۰ آلودگی برتر برای ماتریس آلودگی را نشان می‌دهد.

۲-۵- توابع هدف

تابع هدف اول: بیشینه‌سازی درصد تشخیص آلاینده‌ها در شبکه (F_1)

در یک شبکه توزیع مشخص، احتمال تشخیص آلودگی موجود در شبکه به‌صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$F_1 = \frac{1}{TS} \sum_{t=1}^{TS} d_t \quad (4)$$

$$d_t = \begin{cases} 1 & C(i, t) \geq C_{\min} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases}$$

در **این رابطه** چنانچه رویداد آلودگی t (رویداد آلودگی وارد شده به شبکه توزیع با مقدار آلاینده، گره وارد شده به شبکه، زمان و مدت‌زمان تزریق مشخص) توسط سنسورها شناسایی شود $d_t = 1$ در غیر این صورت $d_t = 0$ می‌باشد. TS ، تعداد کل سناریوهای آلودگی‌های وارد شده به شبکه (تعداد آلودگی‌های موجود در ماتریس آلودگی) می‌باشد. همان‌طور که مشخص است تابع هدف اول موردبررسی در

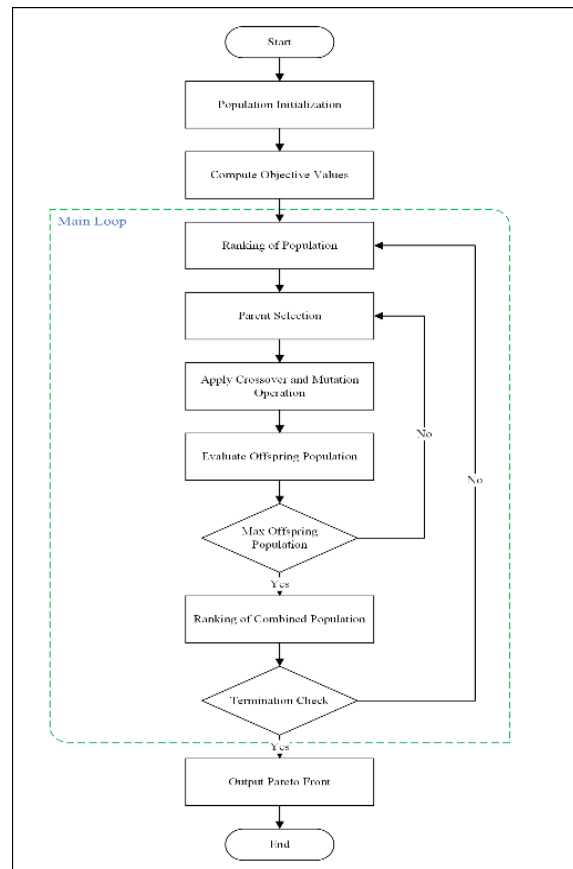


Fig. 1 Flowchart of NSGA-II Algorithm

شکل ۱ فلوچارت الگوریتم NSGA-II

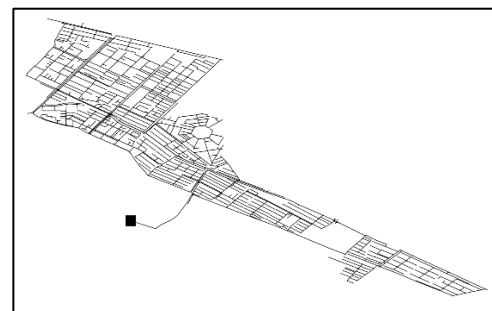


Fig. 2 Zone E Plan

شکل ۲ پلان پهنه E

$$\text{Minimize: } \sum_{i=1}^{i=5} |AS_i - AN_i| + |\sigma S_i - \sigma N_i| \quad (2)$$

$$\text{Subject to: } q_j > 0, j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3)$$

AS_i و σS_i به ترتیب بیانگر میانگین و انحراف معیار

$E(t_d)$ امید ریاضی مربوط به زمان تشخیص آلودگی در سیستم می‌باشد با محاسبه [فرمول بالا](#)، زمان شناسایی آلودگی‌های موجود در ماتریس آلودگی به دست می‌آید و تابع هدف موردنظر باید دارای کمترین مقدار باشد تا به ترکیب بهینه سنسورها دست یابیم.

تابع هدف سوم: کمینه کردن حجم آب مصرفی آلوده (F_3)

به منظور محاسبه حجم آب آلوده شده در شبکه توزیع آب شرب توسط مصرف‌کنندگان از [فرمول ذیل](#) استفاده می‌کنیم:

$$F_3 = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{t=0}^{RT} D_{it} * QTS \quad (7)$$

مطابق با [این فرمول](#) N_p تعداد گره‌های آلوده شده، D_{it} تقاضای مصرفی گره i ام در زمان t ، QTS بازه زمانی بررسی کیفیت آب در شبکه و RT زمان پاسخ سیستم (به فاصله زمانی از تایم تشخیص آلودگی توسط سنسورهای نصب شده در شبکه توزیع t_d تا زمان واکنش نشان دادن سیستم، زمان پاسخ سیستم گفته می‌شود) می‌باشند. چنانچه آلودگی موجود در شبکه توسط سنسورها تشخیص داده نشود به منظور محاسبه حجم آب آلوده مصرف‌شده توسط مصرف‌کنندگان، تابع هدف سوم (F_3) برای تمامی گره‌های آلوده شده و تا ۲۴ ساعت پس از ورود آلودگی به شبکه محاسبه می‌شود.

همان‌طور که در قسمت مقدمه بیان شد مرحله سوم جلوگیری از خطرات ناشی از وجود آلودگی در شبکه، مدیریت پیامد می‌باشد، یعنی بعد از آگاهی از وجود آلودگی در شبکه برای حفظ سلامت عموم جامعه باید بهترین تدابیر جهت مقابله با آلودگی وارد شده به شبکه انجام گیرد. بسته پروتکل واکنشی اداره حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده، توصیه‌هایی جهت کمینه کردن خطرات ناشی از این تهدیدات ارائه نموده است. این توصیه‌ها شامل: ۱- ایزوله کردن ناحیه آلوده شده در شبکه، ۲- اعلام خطر و اطلاع‌رسانی به مردم، ۳- تخلیه آلودگی از شبکه و ۴- ترکیبی از موارد گفته شده می‌باشند (USEPA). در این

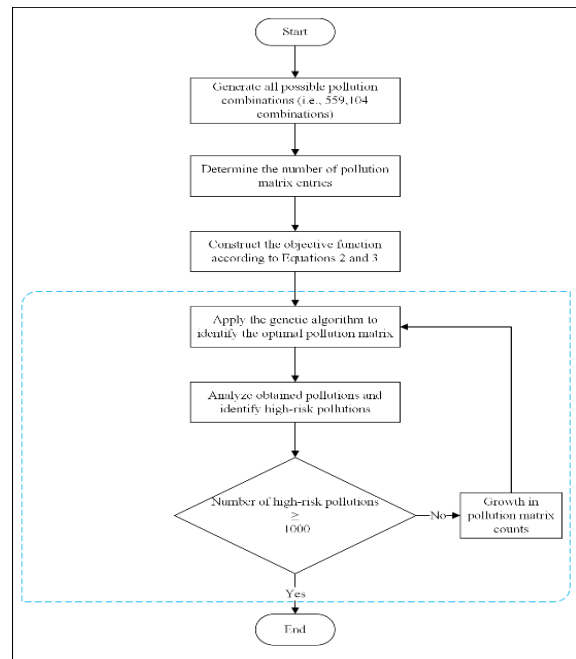


Fig. 3 Flowchart of Selecting Contaminants in the Contamination Matrix

شکل ۳ فلوجارت انتخاب آلودگی‌های ماتریس آلودگی

پژوهش بایستی ماکزیمم گردد.

تابع هدف دوم: کمینه کردن زمان موردانتظار برای تشخیص یک رویداد آلودگی (F_2)

برای یک رویداد آلودگی، مدت زمان سپری شده از لحظه ورود آلاینده به شبکه تا تشخیص آلودگی توسط اولین سنسور را زمان تشخیص می‌نامیم. زمان تشخیص (t_d) به عنوان کمترین زمان تشخیص آلاینده توسط سنسورها تعریف می‌شود.

$$t_d = \min t_i \quad (5)$$

در [این فرمول](#) t_i زمان شناسایی آلودگی در شبکه توزیع توسط سنسور i ام می‌باشد، به منظور دست یافتن به کمترین زمان تشخیص آلودگی‌های موجود در آلاینده، از [فرمول ذیل](#) استفاده می‌کنیم.

$$F_2 = E(t_d) = \sum_{i=1}^n t_{d_i} P(t_{d_i}) \quad (6)$$

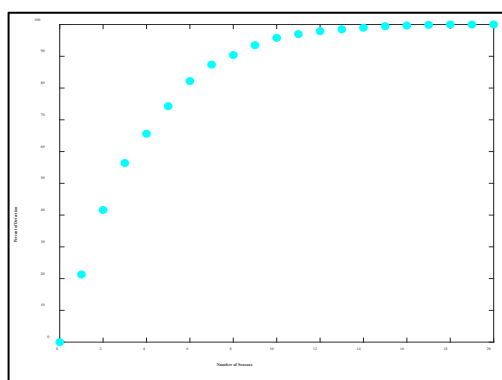


Fig. 4 Optimal pareto front for number of sensors versus percent of detection

شکل ۴ جبهه پرتو بهینه تعداد سنسور در مقابل درصد تشخیص

Harif et al. (2023a) نیز مشاهده شده است و نشان‌دهنده وجود حد بهینه اقتصادی برای تعداد سنسورهای نصب‌شده است.

بررسی تعداد سنسورها در مقابل حداقل زمان تشخیص نشان می‌دهد که در این حالت جواب بهینه، جوابی است که در آن با کمترین تعداد سنسور نصب شده در شبکه بتوان آلاینده‌های وارد شده به شبکه توزیع را در کمترین زمان ممکن شناسایی کرد، به عبارتی دیگر بایستی تعداد سنسورها کاهش یابد و در مقابل زمان تشخیص آلاینده‌ها نیز کاهش یابد. نتایج [شکل ۵](#)، نشان می‌دهد که به‌منظور دستیابی به کمترین زمان تشخیص آلاینده‌های وارد شده به شبکه بایستی از حداکثر تعداد سنسور (۲۰ سنسور) استفاده نمود که در این حالت کمترین زمان تشخیص برابر با ۹۱ دقیقه می‌باشد؛ اما در حالت استفاده از کمترین تعداد سنسور یعنی یک سنسور حداقل زمان تشخیص، بیشترین مقدار ممکن یعنی ۱۱۸۴.۶ دقیقه را دارد. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، بین تعداد سنسورها و زمان تشخیص رابطه‌ای معکوس وجود دارد. این روند از دیدگاه فیزیکی کاملاً قابل توجیه است؛ زیرا افزایش چگالی نقاط پایش موجب کاهش فاصله مکانی بین محل وقوع آلودگی و نزدیک‌ترین سنسور می‌شود و در نتیجه، آلاینده در مدت‌زمان کوتاه‌تری شناسایی می‌گردد. چنین نتایجی در مطالعات مشابه (مانند Harif et al. (2023a) نیز مشاهده شده است. از منظر کاربردی، این نتیجه بر اهمیت استقرار

پژوهش پیش‌بینی می‌شود که پس از تشخیص آلودگی توسط سنسورهای نصب شده در ایستگاه‌های پایش کیفیت آب، سیستم شبکه آب واکنش نشان داده و یکی از توصیه‌های مذکور انجام گیرد که یا سیستم بسته می‌شود و یا عملکرد آن تغییر می‌کند. در این پژوهش بازه زمانی ۹۰ دقیقه برای زمان پاسخ سیستم در نظر گرفته شده است ($RT = t_d + 90$) و همچنین ایستگاه‌های نظارت در بازه‌های زمانی ده دقیقه‌ای اطلاعات مربوط به آلودگی را ثبت می‌کنند ($QTS = 10$).

۳- نتایج و بحث

باتوجه به آن که تعداد سنسورهایی که بایستی در شبکه نصب شوند مشخص نمی‌باشد؛ لذا در این مرحله تعداد سنسورهای موردنیاز نیز به‌صورت تابع هدف در نظر گرفته شده است تا اثر تعداد سنسورها در مقابل هرکدام از توابع هدف عنوان‌شده موردبررسی قرار گیرد. بدین منظور فرض شده است که حداقل و حداکثر تعداد سنسورهای نصب‌شده در شبکه معادل ۱ و ۲۰ سنسور باشد. [شکلهای ۴ تا ۶](#)، جبهه پرتوهای بهینه برای هرکدام از توابع هدف مذکور را نشان می‌دهد. در ابتدا تعداد سنسورها در مقابل حداکثر تشخیص آلاینده‌ها موردبررسی قرار گرفت و جبهه پرتو بهینه مطابق [شکل ۴](#)، بدست آمد. مطابق با توابع هدف تعریف شده جواب بهینه جوابی است که در آن با کمترین تعداد سنسور نصب شده در شبکه بتوان به حداکثر تشخیص آلاینده وارد شده به شبکه دست یافت، به‌عبارتی دیگر بایستی تعداد سنسورها کاهش یابد و در مقابل درصد تشخیص آلاینده‌ها افزایش یابد. مطابق با نتایج [شکل ۴](#)، حداکثر درصد تشخیص آلاینده در حالت استفاده از ۱۸ سنسور و معادل ۱۰۰ درصد می‌باشد و همچنین کمترین درصد تشخیص آلاینده‌های وارد شده به شبکه معادل با ۲۱.۳ درصد و در حالت استفاده از یک سنسور می‌باشد. این نتیجه بیانگر آن است که افزایش تعداد سنسورها تاثیر مستقیم و غیرخطی بر میزان قابلیت تشخیص دارد؛ به‌گونه‌ای که پس از نقطه اشباع (در حدود ۱۸ سنسور)، افزودن سنسور جدید تاثیر محسوسی بر بهبود درصد تشخیص ندارد. چنین رفتاری در مطالعات مشابه (مانند

بیشترین تعداد سنسور (۲۰ سنسور) استفاده کرد که در این حالت ۲۴.۹ میلیون لیتر آب آلوده مصرف می‌شود؛ در مقابل در حالت استفاده از یک سنسور حجم آب آلوده مصرفی توسط مشترکین به بیشترین مقدار ممکن یعنی ۲۳۷.۲ میلیون لیتر می‌رسد. این یافته بیانگر آن است که افزایش تعداد سنسورها نه تنها موجب بهبود دقت و سرعت شناسایی رویدادهای آلودگی می‌شود، بلکه نقش موثری در کاهش پیامدهای بهداشتی و زیست‌محیطی ناشی از انتشار آلاینده‌ها در شبکه دارد. از منظر مدیریتی، این نتیجه اهمیت رویکردی مبتنی بر تحلیل هزینه - فایده را در طراحی سامانه‌های پایش کیفیت آب نشان می‌دهد؛ بدین معنا که سرمایه‌گذاری در نصب سنسورهای بیشتر باید در برابر منافع حاصل از کاهش چشمگیر حجم آب آلوده مصرف‌شده، افزایش اطمینان از سلامت آب شرب و کاهش هزینه‌های تصفیه و جبران خسارت‌های احتمالی ارزیابی شود. در نتیجه، انتخاب تعداد و محل بهینه سنسورها می‌تواند تعادلی منطقی میان هزینه‌های اقتصادی و منافع سلامت عمومی و زیست‌محیطی برقرار کند.

همان‌طور که مشاهده شد تعداد سنسور انتخابی تاثیر بسزایی بر توابع هدف موردبررسی دارد؛ لذا در ادامه به بررسی اثرات متقابل توابع هدف بر یکدیگر پرداخته می‌شود، بدین منظور تعداد پنج سنسور انتخاب شده است. این تحلیل چندهدفه امکان بررسی هم‌زمان تعارض ذاتی بین اهداف مختلف (تشخیص سریع، دقت بالا و حداقل آلودگی مصرفی) را فراهم می‌سازد.

شکلهای ۷ و ۸. نتایج قرارگیری پنج سنسور در شبکه توزیع موردبررسی را نشان می‌دهد. **شکل ۷-الف**، جبهه پرتو بهینه برای بیشینه‌سازی احتمال تشخیص آلاینده‌ها در شبکه (F_1) در مقابل کمینه کردن زمان مورد انتظار برای تشخیص یک رویداد آلودگی (F_2) را نشان می‌دهد. به‌منظور بیشینه کردن احتمال تشخیص ورود آلودگی به شبکه‌های توزیع، ایستگاه‌های پایش باید در نقاط انتهایی شبکه قرار بگیرند تا تعداد رویداد آلودگی بیشتری را شناسایی کنند؛ اما برای حالت کمینه‌کردن زمان تشخیص آلودگی وارد شده به شبکه توزیع سنسورها باید در محل‌های نزدیک به تزریق آلاینده به شبکه قرار بگیرند که این با حالت بیشینه کردن

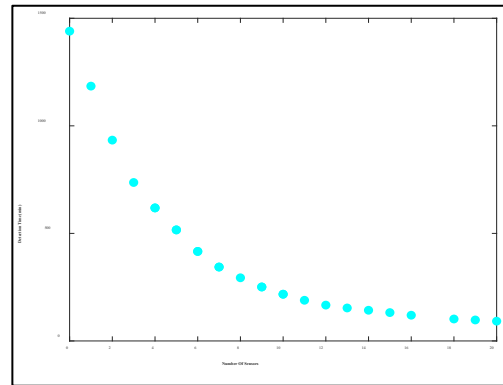


Fig. 5 Optimal pareto front for number of sensors versus detection time

شکل ۵ جبهه پرتو بهینه تعداد سنسور در مقابل زمان تشخیص

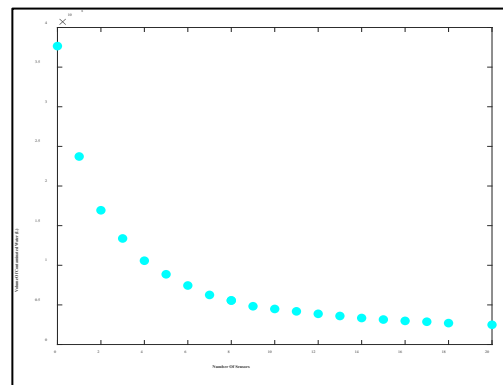


Fig. 6 Optimal pareto front for number of sensors versus contaminated water volume

شکل ۶ جبهه پرتو بهینه تعداد سنسور در مقابل حجم آب آلوده مصرف شده

هدفمند سنسورها در نواحی حساس شبکه تاکید دارد، به‌ویژه در شبکه‌های وسیع که فاصله زیاد میان گره‌ها می‌تواند موجب تاخیر قابل‌توجه در آشکارسازی رویداد آلودگی شود.

در گام آخر دو تابع هدف تعداد سنسورهای نصب شده در شبکه و کمترین حجم آب آلوده مصرفی موردبررسی قرار گرفتند. مطابق با توابع هدف تعریف شده جواب بهینه جوابی است که در آن با کمترین تعداد سنسور نصب شده در شبکه بتوان از مصرف آب آلوده شده توسط مصرف‌کنندگان از شبکه، جلوگیری کرد. نتایج **شکل ۶**، نشان می‌دهد که همان‌طور که انتظار می‌رفت به‌منظور دستیابی به کمترین حجم آب آلوده مصرفی بایستی از

را پوشش می‌دهند و احتمال عبور آلودگی از مقابل سنسور افزایش می‌یابد. با این حال، در چنین حالتی زمان مورد نیاز برای رسیدن آلاینده به سنسورها افزایش می‌یابد، که این امر منجر به افزایش زمان واکنش سیستم در شناسایی رویداد می‌گردد. این رفتار به‌ویژه در شبکه‌هایی با ساختار شاخه‌ای مشهودتر است، زیرا طول مسیر جریان و تعداد گره‌های واسط در این نوع شبکه‌ها بیشتر بوده و موجب تاخیر در انتقال آلودگی به نقاط پایش می‌شود. بنابراین، انتخاب بهینه مکان سنسورها باید با در نظر گرفتن توازن مناسبی میان گستره پوشش شبکه و سرعت واکنش سیستم صورت گیرد تا کارایی کلی سامانه پایش تضمین شود.

شکل ۸-الف، جبهه پرتو بهینه برای بیشینه‌سازی احتمال تشخیص آلاینده‌ها در شبکه (F1) در مقابل کمینه کردن حجم آب مصرفی آلوده (F3) را نشان می‌دهد. به‌منظور بیشینه کردن احتمال تشخیص ورود آلودگی به شبکه‌های توزیع، ایستگاه‌های پایش باید در نقاط انتهایی شبکه قرار بگیرند تا تعداد رویداد آلودگی بیشتری را شناسایی کنند؛ اما برای حالت کمینه کردن حجم آب آلوده مصرف‌شده توسط مصرف‌کنندگان در اثر ورود آلودگی به شبکه توزیع سنسورها باید در محل‌های نزدیک به تزریق آلاینده به شبکه قرار بگیرند که این با حالت بیشینه کردن احتمال

احتمال تشخیص در تضاد هست؛ لذا باید محل بهینه سنسورها با در نظر گرفتن هم‌زمان دو تابع هدف مذکور تعیین شود. به‌منظور جانمایی سنسورها در شبکه توزیع از جبهه پرتو بهینه، سه پاسخ مطابق **شکل ۷-الف**، انتخاب شده است. پاسخ اول برای حالتی است که در آن کمترین زمان تشخیص آلاینده‌ها در بهترین حالت ممکن خود و برابر با ۰.۶۲ دقیقه می‌باشد، همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت حداکثر درصد تشخیص آلاینده‌ها در بدترین حالت ممکن و معادل با ۳/۲ درصد می‌باشد. پاسخ دوم معادل بهترین احتمال تشخیص آلاینده وارد شده به شبکه یعنی ۷۴/۳ درصد و بدترین زمان تشخیص آلاینده‌ها برابر با ۵۱۹/۹ دقیقه می‌باشد. پاسخ سوم معادل پاسخی است که در آن هر دو تابع هدف مذکور در فاصله متوسط از نقطه بهینه (نقطه‌ای که در آن با کمترین زمان ممکن، بیشترین درصد تشخیص آلودگی وارد شده به شبکه حاصل می‌شود) قرار دارند. در این حالت حداکثر احتمال تشخیص معادل ۶۶/۶ درصد و کمترین زمان تشخیص معادل ۱۴۴ دقیقه می‌باشد.

نتایج ارائه شده در **شکل ۷**، نشان می‌دهد که میان دو هدف «بیشینه‌سازی احتمال تشخیص» و «کمینه‌سازی زمان تشخیص» نوعی رابطه متضاد وجود دارد. تمرکز سنسورها در نواحی انتهایی شبکه سبب افزایش احتمال آشکارسازی آلودگی می‌شود، زیرا این نقاط اغلب مسیرهای نهایی جریان

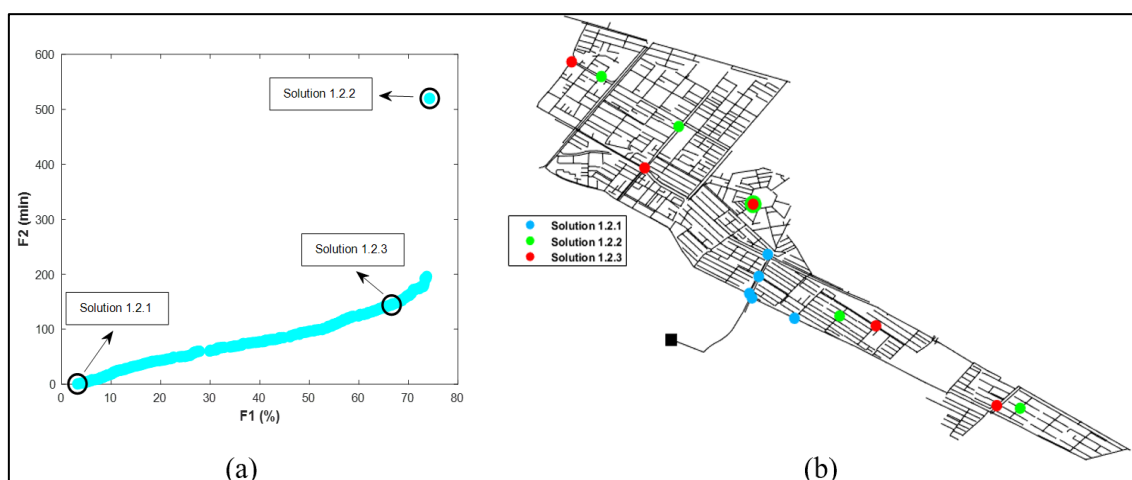


Fig. 7 (a) Optimal Pareto front for percent of detection versus detection time, and (b) Locations of Selected Solutions from the Optimal Pareto Front

شکل ۷ الف - جبهه پرتو بهینه درصد تشخیص در مقابل زمان تشخیص و ب- محل قرارگیری پاسخ‌های انتخابی از جبهه پرتو بهینه

اقتصادی و اجرایی ممکن است بهینه نباشد. بنابراین، راه‌حل‌های واقع در ناحیه میانی جبهه پرتوجبه پرتو (پاسخ سوم) می‌توانند به عنوان گزینه‌های عملی و متوازن برای طراحی واقعی شبکه در نظر گرفته شوند.

به‌طور کلی، نتایج بررسی‌های توابع هدف نشان‌دهنده وجود تعارض ذاتی میان اهداف مختلف طراحی شبکه پایش کیفیت آب است و دستیابی هم‌زمان به تمام اهداف در حالت بهینه ممکن نیست. تحلیل جبهه پرتوهای بهینه نشان داد که افزایش تعداد سنسورها عملکرد شبکه را از نظر احتمال تشخیص، زمان تشخیص و کاهش حجم آب آلوده مصرفی بهبود می‌بخشد، اما از منظر اقتصادی و عملیاتی نیازمند ایجاد توازن منطقی میان هزینه و کارایی است. این یافته‌ها می‌توانند به عنوان راهنمایی برای تصمیم‌گیری مدیریتی در طراحی سیستم‌های پایش هوشمند شبکه‌های آب شهری مورد استفاده قرار گیرند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به‌منظور تعیین محل بهینه ایستگاه‌های پایش در بخشی از شبکه توزیع آب شرب شهر مشهد از روش شبیه‌سازی - بهینه‌سازی استفاده شد. از نرم‌افزار EPANET به‌عنوان شبیه‌ساز و از الگوریتم ژنتیک

تشخیص در تضاد هست؛ لذا باید محل بهینه سنسورها با در نظر گرفتن هم‌زمان دو تابع هدف مذکور تعیین شود. به‌منظور جانمایی سنسورها در شبکه توزیع از جبهه پرتو بهینه سه پاسخ مطابق **شکل ۸-الف**، انتخاب شده است. پاسخ اول برای حالتی است که در آن کمترین حجم آب آلوده مصرف شده در بهترین حالت ممکن خود و برابر با ۸۸/۳۷ میلیون لیتر می‌باشد، همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت حداکثر درصد تشخیص آلاینده‌ها در بدترین حالت ممکن و معادل با ۵۷/۷ درصد می‌باشد. پاسخ دوم معادل بهترین احتمال تشخیص آلاینده وارد شده به شبکه یعنی ۷۴/۳ درصد و بدترین حجم آب مصرف شده برابر با ۱۱۰/۱ میلیون لیتر می‌باشد. پاسخ سوم معادل پاسخی است که در آن هر دو تابع هدف مذکور در فاصله متوسط از نقطه بهینه (نقطه‌ای که در آن با کمترین حجم آب آلوده مصرف شده، بیشترین درصد تشخیص آلودگی وارد شده به شبکه حاصل می‌شود) قرار دارند. در این حالت حداکثر احتمال تشخیص معادل ۷۱/۸ درصد و کمترین حجم آب آلوده مصرف شده معادل ۹۳/۴۲۴ میلیون لیتر می‌باشد.

نتایج ارائه شده در **شکل ۸**، نشان‌دهنده وجود تعارض میان بیشینه‌سازی احتمال تشخیص آلودگی و کمینه‌سازی حجم آب آلوده مصرفی است. اگرچه افزایش تعداد سنسورها یا قرار دادن آن‌ها در مجاورت نقاط تزریق، منجر به کاهش قابل توجه حجم آب آلوده مصرفی می‌شود؛ اما از منظر

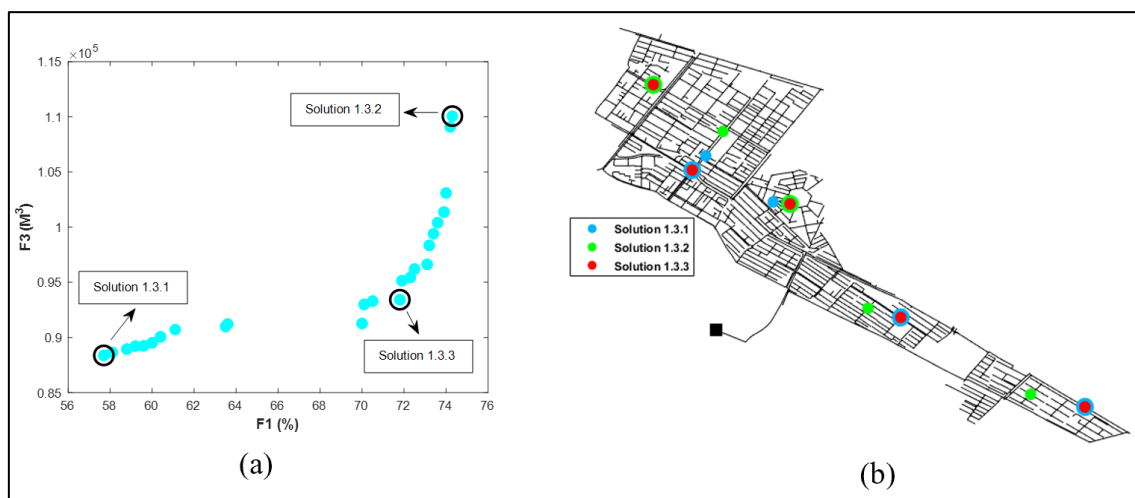


Fig. 8 (a) Optimal Pareto front for percent of detection versus contaminated water volume, and (b) Locations of Selected Solutions from the Optimal Pareto Front

شکل ۸ الف-جبهه پرتو بهینه درصد تشخیص در مقابل حجم آب آلوده شده و ب- محل قرارگیری پاسخ‌های انتخابی از جبهه پرتو بهینه

می‌کند، که این نتایج نشان‌دهنده اثر قابل توجه تعداد سنسورها بر عملکرد شبکه است.

۳. تحلیل هم‌زمان توابع هدف نشان داد که:
- ♦ به‌منظور بیشینه‌سازی احتمال تشخیص (F_1) سنسورها باید در نقاط پایین‌دست شبکه نصب شوند.
 - ♦ برای کمینه‌کردن زمان تشخیص (F_2) و حجم آب آلوده مصرفی (F_3)، سنسورها باید در نزدیکی نقاط ورود آلاینده نصب شوند.

♦ این نتایج بیانگر آن است که بین توابع هدف مورد بررسی تضاد وجود دارد و نمی‌توان تمامی اهداف را هم‌زمان به صورت کامل برآورده کرد.

۴. پاسخ‌های بهینه در قالب جبهه پارتو ارائه شده‌اند و امکان انتخاب محل‌های نصب سنسور بر اساس اهمیت هر تابع هدف فراهم است، که این رویکرد می‌تواند طراحی شبکه را متوازن و قابل اجرا کند.

۵. یافته‌ها نشان می‌دهند که با افزایش تعداد سنسورها و انتخاب موقعیت‌های مناسب، عملکرد شبکه از نظر شناسایی، زمان واکنش و کاهش حجم آب آلوده بهبود می‌یابد؛ اما از دید اقتصادی و عملیاتی نیازمند ایجاد توازن منطقی میان هزینه و کارایی است.

نتایج بدست آمده از این پژوهش می‌توانند به عنوان راهنمایی علمی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در طراحی سیستم‌های پایش هوشمند شبکه‌های آب شرب شهری مورد استفاده قرار گیرند.

تک و چندهدفه به‌عنوان بهینه‌ساز استفاده شد. برای تعیین محل بهینه قرارگیری سنسورها در شبکه توزیع ابتدا مشخصات مربوط به آلاینده وارد شده به شبکه تعیین شد، بدین صورت که آلاینده از تمامی گره‌های شبکه (به جز گره‌های انتهایی شبکه) امکان ورود به شبکه را دارد. همچنین زمان ورود آلاینده در هر ساعت از شبانه‌روز در فاصله زمانی سی‌دقیقه‌ای با مدت‌های ۴۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ دقیقه با مقادیر جرمی ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ گرم بر دقیقه می‌باشند، سپس با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک تک‌هدفه به انتخاب ماتریس آلودگی پرداخته شد. این ماتریس آلودگی دارای ۱۰۰۰ عضو می‌باشد به‌گونه‌ای که اعضای آن نماینده کل آلودگی‌های ممکن برای شبکه هستند. بعد از آماده‌سازی ماتریس آلودگی در مرحله بعد اقدام به تعیین محل‌های بهینه قرارگیری سنسورها با در نظر گرفتن سه تابع هدف: الف) بیشینه‌سازی احتمال تشخیص آلاینده‌ها در شبکه (F_1) ب) کمینه‌کردن زمان موردانتظار برای تشخیص یک رویداد آلودگی (F_2) و پ) کمینه‌کردن حجم آب مصرفی آلوده (F_3) پرداخته شد. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که:

۱. با نصب تنها یک سنسور در شبکه، بیش از ۲۰ درصد آلاینده‌های وارد شده شناسایی می‌شوند و زمان تشخیص و حجم آب آلوده مصرفی به ترتیب تا ۱۷.۸ و ۳۷ درصد کاهش می‌یابد.
۲. نصب سه سنسور باعث شناسایی بیش از ۵۰ درصد آلاینده‌ها می‌شود و نصب ۱۸ سنسور در نقاط مختلف شبکه امکان شناسایی ۱۰۰ درصد آلاینده‌ها را فراهم

5- List of symbol

ANi	Average total pollution present
ASi	Average data related to the pollution matrix
C (mg l^{-1})	Pollutant concentration
D _{it} (m $^3s^{-1}$)	Consumption demand of node i at time t
E(td)	The expected value of the contamination detection time
F ₁	Maximize the detection likelihood
F ₂	Minimize expected detection time
F ₃	Minimize the mass of contamination consumed
σN_i	Standard deviation of all contaminations
σS_i	Standard deviation of contaminations in the pollution matrix

Np	Number of contaminated nodes
qj (m $^3s^{-1}$)	Outflow from node j
QTS (s)	Time period for water quality monitoring
RT (s)	System response time
t (s)	Time
TS	Number of contaminations in the contamination matrix
u _i (ms $^{-1}$)	Flow velocity
x (m)	Distance

Acknowledgments

We would like to express our gratitude to the individuals and organizations (Mashhad Water and

Wastewater Company) who have contributed in any way to the advancement of the research.

Authorship Contribution Statement

Conceptualization, (S.H. and S.A.GH.); Methodology, (S.H. and F.GH.); Software, (S.H.); Data Analysis, (S.H. and S.A.GH.); Writing – Original Draft Preparation, (S.H. and F.GH.); Writing – Review & Editing, (S.H. and S.A.GH.); Supervision, (S.H.).

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

No financial support was received for this study. Mashhad Water and Wastewater Company provided the necessary data for the research.

Data Availability Statement

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author upon reasonable request. For access to the data and additional information, interested researchers may contact the corresponding author via email.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Abbaszadeh, H. Daneshfaraz, R. Sume, V. Abraham, J. (2024). Experimental investigation and application of soft computing models for predicting flow energy loss in arc-shaped constrictions *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society* 73(3):637–661, <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.010>
- Adedoja, O S. Hamam, Y. Khalaf, B. Sadiku, R. (2018). A state-of-the-art review of an optimal sensor placement for contaminant warning system in a water distribution network *Urban Water Journal* 15(10):985–1000 <https://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1597378>
- Bahadur, R. Samuels, W B. Grayman, W. Amstutz, D. Pickus, J. PipelineNet: A model for monitoring introduced contaminants in a distribution system. In: *World Water & Environmental Resources Congress 2003*, 2003. pp 1–6. [https://doi.org/10.1061/40685\(2003\)128](https://doi.org/10.1061/40685(2003)128)
- Balbus, J M. Lang, M E. (2001). Is the water safe for my baby? *Pediatr Clin North Am* 48(5):1129–1152, viii, [https://doi.org/10.1016/s0031-3955\(05\)70365-5](https://doi.org/10.1016/s0031-3955(05)70365-5).
- Bashi-Azghadi, S N. Afshar, A. Afshar, M H. (2018). Multi-period response management to contaminated water distribution networks: dynamic programming versus genetic algorithms *Engineering Optimization* 50(3):415–429, <https://doi.org/10.1080/0305215X.2017.1318871>.
- Basupi, I. (2013). Adaptive water distribution system design under future uncertainty. University of Exeter (United Kingdom).
- Berry, J W. Hart, W E. Phillips, C A. Watson, J-P. A facility location approach to sensor placement optimization. In: *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*, 2006. pp 1–4. [https://doi.org/10.1061/40941\(247\)11](https://doi.org/10.1061/40941(247)11).
- Chang, N-B. Pongsanone, N P. Ernest, A. (2012). A rule-based decision support system for sensor deployment in small drinking water networks *Journal of Cleaner Production* 29(28–37, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.02.010>.
- Chinadaily Lanzhou tap water tainted with benzene. 2014.
- Comboul, M. Ghanem, R. (2013). Value of information in the design of resilient water distribution sensor networks *Journal of Water Resources Planning and Management* 139(4):449–455, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.000025](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.000025)
- Cooper, W J. (2014). Responding to crisis: The West Virginia chemical spill vol 48. ACS Publications. <https://doi.org/10.1021/es500949g>.
- Craun, G F. Calderon, R L. (2001). Waterborne disease outbreaks caused by distribution system deficiencies *Journal-American Water Works Association* 93(9):64–75, <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2001.tb09287.x>
- de Winter, C. Palleti, V R. Worm, D. Kooij, R. (2019). Optimal placement of imperfect water quality sensors in water distribution networks *Computers & Chemical Engineering* 121(200–211, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.10.021>
- Dehghani Darmian, M. Harif, s. Azizyan, G. Faghihirad, S. Meshkati, S M H. Babaei Malekshah, M. (2023). Optimal Location Placement of Quality Sensors in Water Distribution Networks by Considering Uncertainty of Parameters *Irrigation and Water Engineering* 13(13):211–228, <https://doi.org/10.22125/iwe.2022.349734.1648>.
- Ghanadi, M. (2003). Strategies for quality control in water distribution networks *Water and Environment Journal*:4–11. (In Persian)
- Ghimire, S R. Barkdoll, B D. A heuristic method for water quality sensor location in a municipal water distribution system: Mass-released based approach. In: *Water distribution systems analysis*

- symposium 2006, 2006. pp 1–11.
[https://doi.org/10.1061/40941\(247\)11](https://doi.org/10.1061/40941(247)11)
- Harif, S. Azizyan, G. Givchchi, M. Dehghani Darmian, M. (2020). Investigation of the Efficiency of Dilution Flow, Detention Time and Discharge of Contaminated Water on Quality Management of Water Distribution Network After Pollution Incidence (Case Study: Drinking Water Network of Zahedan) *Journal of Ecohydrology* 7(4):1033–1045,
<https://doi.org/10.22059/jje.2020.309105.1377> (In Persian)
- harif, s. Azizyan, G. Givchchi, M. Dehghani Darmian, M. (2021). Determining the Optimal Location of Sensors in the Water Distribution Network in order to Identify the Pollution Source in Minimum Detection Time *Iranian Journal of Irrigation & Drainage* 15(2):342–356,
<https://doi.org/20.1001.1.20087942.1400.15.2.1.0.2>. (In Persian)
- Harif, s. Azizyan, G. Givchchi, M. Dehghani Darmian, M. (2022). Analysis and Evaluation of Water Quality Management Tools in Water Distribution Networks Against Pollution Entrance in Zahedan Water Distribution Network *Irrigation and Water Engineering* 12(3):437–453,
<https://doi.org/10.22125/iwe.2022.146421>. (In Persian)
- Harif, S. Azizyan, G. Dehghani Darmian, M. Givchchi, M. (2023a). Selecting the best location of water quality sensors in water distribution networks by considering the importance of nodes and contaminations using NSGA-III (case study: Zahedan water distribution network, Iran) *Environ Sci Pollut Res Int* 30(18):53229–53252,
<https://doi.org/10.1007/s11356-023-26075-5>.
- Harif, s. Givchchi, M. Dehghani Darmiyan, M. (2023b). Analysis and Quality Management of Water Distribution Networks Under pollution intrusion in the Situation of Water Pressure Reduction (Case Study: Zahedan water Distribution Network) *Irrigation and Water Engineering* 14(1):297–307,
<https://doi.org/10.22125/iwe.2020.216105.1280>. (In Persian)
- Hart, W E. Murray, R. (2010). Review of sensor placement strategies for contamination warning systems in drinking water distribution systems *Journal of Water Resources Planning and Management* 136(6):611–619,
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.000008](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.000008).
<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Kessler, A. Ostfeld, A. Sinai, G. (1998). Detecting accidental contaminations in municipal water networks *Journal of Water Resources Planning and Management* 124(4):192–198,
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1998\)124:4\(192\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1998)124:4(192)).
- Khorshidi, M S. Nikoo, M R. Ebrahimi, E. Sadegh, M. (2019). A robust decision support leader-follower framework for design of contamination warning system in water distribution network *Journal of cleaner production* 214(666–673,
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.010>.
- Lee, B H. Deininger, R A. (1992). Optimal locations of monitoring stations in water distribution system *Journal of Environmental Engineering* 118(1):4–16,
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1992\)118:1\(4\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1992)118:1(4)).
- Namtirtha, A. Kumar, K S. Jain, S. Simmhan, Y. Kumar, M M. (2023). Placement strategies for water quality sensors using complex network theory for continuous and intermittent water distribution systems *Water Resources Research* 59(7): e2022WR033112,
<https://doi.org/10.1029/2022WR033112>.
- Naserizade, S S. Nikoo, M R. Montaseri, H. (2018). A risk-based multi-objective model for optimal placement of sensors in water distribution system *Journal of hydrology* 557(147–159,
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.028>.
- Nazempour, R. Monfared, M A S. Zio, E. (2018). A complex network theory approach for optimizing contamination warning sensor location in water distribution networks *International Journal of Disaster Risk Reduction* 30(225–234,
<https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.04.029>.
- Ostfeld, A. Kessler, A. (2001). Protecting urban water distribution systems against accidental hazards intrusions *Proc, IWA 2*.
- Palleti, V R. Narasimhan, S. Rengaswamy, R. Teja, R. Bhallamudi, S M. (2016). Sensor network design for contaminant detection and identification in water distribution networks *Computers & Chemical Engineering* 87(246–256,
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.12.022>.
- Ponti, A. Candelieri, A. Archetti, F. (2021). A new evolutionary approach to optimal sensor placement in water distribution networks *Water* 13(12):1625,
<https://doi.org/10.3390/w13121625>
- Preis, A. Ostfeld, A. (2008). Multiobjective contaminant sensor network design for water distribution systems *Journal of Water Resources Planning and Management* 134(4):366–377,
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2008\)134:4\(366\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:4(366)).
- Qiu, M. Salomons, E. Ostfeld, A. (2020). A framework for real-time disinfection plan assembling for a contamination event in water

- distribution systems *Water research* 174(115625), <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115625>.
- Rossman, L A. (2001). Epanet 2 manual de usuario *US Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio*
- Shahra, E Q. Wu, W. (2023). Water contaminants detection using sensor placement approach in smart water networks *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 14(5):4971–4986, <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02262-x>.
- Srinivas, N. Deb, K. (1994). Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms *Evolutionary computation* 2(3):221–248, <https://doi.org/10.1162/evco.1994.2.3.221>.
- Süme, V. Daneshfaraz, R. Kerim, A. Abbaszadeh, H. Abraham, J. (2024). Investigation of clean energy production in drinking water networks *Water Resources Management* 38(6):2189–2208, <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03752-9>.
- Trachtman, G B. A "Strawman" Common Sense Approach for Water Quality Sensor Site Selection. In: *Water distribution systems analysis symposium 2006*, 2008. pp 1–13. [https://doi.org/10.1061/40941\(247\)106](https://doi.org/10.1061/40941(247)106)
- Watson, J-P. Greenberg, H J. Hart, W E. (2004). A multiple-objective analysis of sensor placement optimization in water networks. In: *Critical transitions in water and environmental resources management*. pp 1–10. [https://doi.org/10.1061/40737\(2004\)45](https://doi.org/10.1061/40737(2004)45)
- World Health Organization (WHO), 2017
- Xu, J. Fischbeck, P S. Small, M J. VanBriesen, J M. Casman, E. (2008). Identifying sets of key nodes for placing sensors in dynamic water distribution networks *Journal of Water Resources Planning and Management* 134(4):378–385, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2008\)134:4\(378\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:4(378)).
- Xu, Z. Guo, Y. Saleh, J H. (2022). Multi-objective optimization for sensor placement: An integrated combinatorial approach with reduced order model and Gaussian process *Measurement* 187(110370), <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110370>.