

## Research Paper

# Optimal Location Placement of Quality Sensors in Water Distribution Networks by Considering Uncertainty of Parameters

Siroos Harif<sup>1</sup> Mohsen Dehghani Darmian<sup>2\*</sup> Gholamreza Azizyan<sup>3</sup> Shervin Faghihirad<sup>4</sup> Seyed Mohammad Hadi Meshkati<sup>5</sup>

Mohammad Babaei Malekshah<sup>6</sup>

1 Department of Hydraulic Engineering and Hydro-Environment, Water Research Institute, Tehran, Iran.

2 Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

3 Associate Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

4 Department of Hydraulic Engineering and Hydro-Environment, Water Research Institute, Tehran, Iran

5 Department of Hydraulic Engineering and Hydro-Environment, Water Research Institute, Tehran, Iran

6 Department of Hydraulic Engineering and Hydro-Environment, Water Research Institute, Tehran, Iran



10.22125/IWE.2022.349734.1648

Received:  
**July 30, 2022**  
Accepted:  
**October 15, 2022**  
Available online:  
**August 23, 2023**

**Keywords:**  
Water Network  
Pollution, Optimization -  
Simulation, Quality  
Sensors, Uncertainty,  
EPANET

## Abstract

Installing quality sensors in water networks is one of the most effective quality management strategies. In this research, the optimization-simulation approach is used to determine the optimal locations of quality sensors considering the uncertainty of the effective parameters. EPANET software as a simulator and multi-objective genetic and gray wolf algorithms as an optimizer are employed. Two goals including the number of sensors and the maximum possible damage are minimized. To achieve more realistic answers, the contaminant injection node and injection time are considered indefinitely. Six different scenarios are considered for injection duration time and injection mass rate. Also,  $\pm 20\%$  variation for the uncertainty of the demands, and  $\pm 6\%$  for the roughness coefficient are applied. Results demonstrate that the optimal location of quality sensors could greatly reduce the damage caused by the entry of pollutants. Only one sensor installation leads to a reduction of the maximum damage in each of the six scenarios by 42.5, 58.5, 53.96, 44.94, 53.53, and 59 percent, respectively. Also, by increasing the number of sensors up to 20, the maximum damage is reduced to 99%.

## 1. Introduction

Due to their large size and complex configurations, water distribution systems (WDSs) are highly vulnerable to accidental and intentional contamination events. A remarkable number of pollution incidents have been recorded in recent decades. For example, 27000 consumers were affected by water contaminated by Clostridium in Norway in 2019. When the contaminants enter the network can cause irreparable damage to consumers' health besides social and economic instability. Control and protection of all components of water networks are not possible continuously, and there will be always the possibility of contamination of water networks. In this regard, one of the most efficient tools is the

\* **Corresponding Author:** Mohsen Dehghani Darmian

**Address:** Department of Hydraulic Engineering and Hydro-Environment, Water Research Institute, Iran.

**Email:** [Mohsen.dehghanidarmian@gmail.com](mailto:Mohsen.dehghanidarmian@gmail.com)

**Tel:** Number

installation of quality sensors in distribution networks. due to the high cost, and budget constraints, the optimal location of monitoring stations in water distribution networks is a common issue.

A review of previous studies on the optimal locating of quality sensors shows that despite the efforts of various researchers, to simplify the calculations, the complexity of modeling, and simulation of water networks, some simplifying assumptions such as limiting input nodes, number of sensors, and scenarios of infections entering the network have been considered. Also, the uncertainty of influencing parameters in distribution networks is not investigated.

In this research, the optimal location of quality sensors according to two goals: minimizing the number of sensors and minimizing the maximum damage (volume of polluted water consumed by consumers) by considering the probability of occurrence of pollution from all network nodes, as well as the uncertainty related to the roughness of network pipes and demands, is investigated. For this purpose, six different scenarios for the concentration and duration of the pollutant entering the network have been considered. In order to simulate the network, EPANET software was used, and to optimize, gray wolf (GWO) and non-dominated sorting genetic algorithms (NSGA-II) were used simultaneously.

## 2. Materials and Methods

In this research for simulating the effect of a contamination event distributed through the water network, the EPANET 2.0 software was used. EPANET is a computer program performing an extended period simulation of hydraulic and water quality behavior within a drinking water distribution system. In the quality analysis, the concentration is calculated at each node and time step.

## 3. Results

In this research, an uncertainty of  $\pm 20\%$  and  $\pm 6\%$  for demands and roughness coefficient has been considered. Also, the contamination can be entered from all nodes and at any time of the day. Six different scenarios for mass and duration of contaminations have been considered. in scenarios, one to three (S1 to S3), the concentration of the pollutant entered is equal to 10, 25, and 40 gr/min, respectively, and the contamination is injected for 30 minutes. in scenarios four to six (S4 to S6), the concentration of the pollutant entered is equal to 10, 25, and 40 gr/min, respectively, and the contamination is injected for 60 minutes. For all scenarios, the duration of the simulation is 48 hours, and the pollutant enters to network only in the first 24 hours. The optimal Pareto front for all six scenarios is computed.

The results illustrated that node 120 has the highest possible damage in the three scenarios. Therefore, this node is one of the most critical nodes for contamination to enter the network and should be monitored by the sensor. By installing only one sensor in the network at the optimal location, the maximum damage to the network can be reduced by 42.5%, 5.58%, 53.96%, 44.94%, 53.53%, and 59% in scenarios one to six, respectively. By increasing the number of sensors up to 20 sensors, the maximum possible damage in scenarios one to six will be reduced by 99%; But, the costs of installation and maintenance of sensors increase.

## 4. Discussion and Conclusion

In this research, a method based on simulation optimization considering the uncertainty of the effective parameters was presented for optimal placement of quality sensors in water networks.

The investigation and analysis of the results showed that the proposed locations for installing the sensors are in the nodes, which will cause a lot of damage if pollution enters the network from these nodes. Also, the optimal locations of sensors are different for different scenarios; However, some of the network nodes are common in different scenarios and have the most repetition of sensor locations.

## 5. Six important references

1) Dehghani Darmian, M., F. Khodabandeh, G. Azizyan, J. P. Giesy, and S. A. Hashemi Monfared. 2020. Analysis of assimilation capacity for conservation of water quality: controllable discharges of pollutants. *Arabian Journal of Geosciences* 13:1-13.

- 2) Hashemi Monfared, S. A., M. Dehghani Darmian, S. A. Snyder, G. Azizyan, B. Pirzadeh, and M. Azhdary Moghaddam. 2017. Water quality planning in rivers: assimilative capacity and dilution flow. *Bulletin of environmental contamination and toxicology* 99:531-541.
- 3) Nazempour, R., M. A. S. Monfared, and E. Zio. 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.
- 4) Mirjalili, S., S. M. Mirjalili, and A. Lewis. 2014. Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software* 69:46-61.
- 5) Rossman, L. A. 2000. *EPANET 2: user's manual*.
- 6) Darmian, M. D., S. A. H. Monfared, G. Azizyan, S. A. Snyder, and J. P. Giesy. 2018. Assessment of tools for protection of quality of water: uncontrollable discharges of pollutants. *Ecotoxicology and environmental safety* 161:190-197.

### **Conflict of Interest**

Authors declared no conflict of interest.

## جانمایی بهینه سنسورهای تشخیص آلاینده در شبکه‌های توزیع آب با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها

سیروس حریف<sup>۱</sup>، محسن دهقانی درمیان\*<sup>۲</sup>، غلامرضا عزیزیان<sup>۳</sup>، شروین فقیهی‌راد<sup>۴</sup>، سیدمحمد‌هادی مشکاتی<sup>۵</sup>، محمد بابایی ملک‌شاه<sup>۶</sup>

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۰۴/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۳

مقاله پژوهشی

### چکیده

نصب حسگرهای کیفی تشخیص آلودگی یکی از اقدامات مؤثر در مدیریت کیفی شبکه‌های آب می‌باشد. در این پژوهش از رویکرد بهینه‌سازی - شبیه‌سازی به منظور تعیین محل‌های بهینه قرارگیری سنسورهای کیفی استفاده شده است. نرم‌افزار EPANET به‌عنوان شبیه‌ساز و الگوریتم‌های ژنتیک چندهدفه و گرگ خاکستری به‌عنوان بهینه‌ساز، جهت کمینه کردن حداکثر خسارت محتمل و تعداد سنسورهای نصب شده در شبکه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. جهت دستیابی به پاسخ‌های با تطابق بیشتر به واقعیت، گره و زمان ورود آلودگی به شبکه به‌صورت نامعین در نظر گرفته شده و عدم قطعیت پارامترهای مؤثر در فرآیند شبیه‌سازی - بهینه‌سازی نیز لحاظ گردید. شش سناریوی مختلف برای مدت‌زمان و غلظت آلاینده وارد شده مدنظر قرار گرفت. نوسانات برابر  $\pm 20\%$  درصد برای تقاضای گره‌ها و  $\pm 6\%$  درصد برای ضرایب زبری لوله‌های شبکه در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که جانمایی بهینه سنسورهای کیفی بر اساس روش ارائه شده در این پژوهش توانست تا حد زیادی خسارت ناشی از ورود آلاینده‌ها را کاهش دهد. نصب تنها یک حسگر در شبکه حداکثر خسارت وارد شده را در سناریوهای یک تا شش به ترتیب ۴۲/۵، ۵۸/۵، ۵۳/۹۶، ۴۴/۹۴، ۵۳/۵۳ و ۵۹ درصد کاهش داد. همچنین با افزایش تعداد سنسورها تا ۲۰ عدد، حداکثر خسارت تا ۹۹ درصد کاهش یافت.

**واژه‌های کلیدی:** آلودگی سیستم‌های توزیع آب، بهینه‌سازی - شبیه‌سازی، حسگرهای کیفی، عدم قطعیت، EPANET

۱ - عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.  
g.azizyan@eng.usb.ac.ir  
۴ - پژوهشکده هیدرولیک و محیط‌های آبی، موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران. Sh.faghihi@wri.ac.ir  
۵ - پژوهشکده هیدرولیک و محیط‌های آبی، موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران. smh.meshkati@wri.ac.ir  
۶ - پژوهشکده هیدرولیک و محیط‌های آبی، موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران. Babae\_mbm@yahoo.com

۱ - دکترای مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. Siroos.harif@pgs.usb.ac.ir  
۲ - پژوهشکده هیدرولیک و محیط‌های آبی، موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران. Mohsen.dehghanidarmian@gmail.com (نویسنده مسئول)  
۳ - دانشیار، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، گروه مهندسی

## مقدمه

۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱، دهقانی و همکاران، ۱۳۹۸. هاشمی و همکاران (۱۳۹۵). دلیل آن وابستگی کامل حیات انسان به آب می‌باشد که استفاده از آن را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. طبق گزارش بانک جهانی بیشتر از یک میلیارد نفر در جهان به آب آشامیدنی دسترسی ندارند و 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 (UNICEF, 2009). در همین راستا، 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).

کنترل و حفاظت فیزیکی کامل از همه اجزای شبکه‌های توزیع آب به صورت مداوم امکان‌پذیر نیست و احتمال ورود آلودگی همواره وجود دارد. در این راستا یکی از مؤثرترین و کارآمدترین ابزارها، نصب سنسورهای کیفی در شبکه‌های توزیع است. ایستگاه‌های پایش با تشخیص آبی آلودگی، ریسک خطرات احتمالی را کاهش می‌دهند. به دلیل هزینه‌های زیاد مربوط به تهیه، نگهداری و مراقبت از سنسورها از یک طرف و اهمیت شناسایی و تشخیص به موقع ورود آلودگی به شبکه توزیع و کاهش خطرهای ناشی از آن بر روی مصرف‌کنندگان از سوی دیگر، مکان‌یابی بهینه محل‌های ایستگاه‌های پایش در شبکه‌های توزیع آب یک مسئله رایج در مسائل مهندسی آب است.

تحقیقات در زمینه جانمایی سنسورهای سنجش کیفیت آب در شبکه توزیع آب به دهه ۹۰ برمی‌گردد. اولین مطالعات مربوط به بهینه‌سازی سنسورهای تشخیص آلودگی در سیستم‌های توزیع آب شهری، توسط لی و دنینگر انجام گرفته است. (Lee and Deininger, 1992) ارزیابی کیفی سیستم‌های توزیع آب را منوط به نمونه‌برداری‌های پی‌درپی از آب در مکان‌های مناسب دانستند. ایشان با ارائه مفهوم پوشش تقاضا، با استفاده از جهت جریان در شبکه توزیع، تحت شرایط استفاده از یک یا چندین الگوی مصرف آب، روش ارائه شده را توسعه دادند. بعلاوه در این پژوهش از یک روش برنامه‌ریزی خطی با هدف مینیمم کردن تعداد سنسورهای نصب‌شده در شبکه و

سیستم‌های توزیع آب اجزای اصلی زیرساخت‌های عمومی برای انتقال آب آشامیدنی از منابع (مخازن، چاه‌ها، رودخانه‌ها و ...) به مصرف‌کنندگان می‌باشند. هدف سیستم‌های توزیع آب تأمین نیازهای آبی مصرف‌کنندگان چه به لحاظ کمی (دبی و فشار) و چه از منظر کیفی (خواص فیزیکی و شیمیایی آب) متناسب با استانداردهای موجود است. به‌طور کلی هر تهدید و خطری برای شبکه‌های آب شهری، به طور مستقیم بخشی از جامعه را مورد هدف قرار می‌دهد که از آن استفاده می‌کنند (Basupi, 2013). سیستم‌های توزیع آب به دلیل پراکندگی و گستردگی مستعد ورود آلودگی به صورت تصادفی و عمدی هستند. موارد متعددی از ورود آلاینده شیمیایی به شبکه آب شهری در دهه‌های اخیر مشاهده شده است. به طور مثال در سال ۱۹۹۳ در میلوواکی (ایالات متحده آمریکا) ورود آلودگی به شبکه انتقال آب اتفاق افتاد که ۴۰۳۰۰۰ مصرف‌کننده را تحت تأثیر قرارداد، هزاران نفر در بیمارستان بستری شدند و تعدادی هم مرگ‌ومیر به وقوع پیوست (Corso et al., 2003). در سال ۲۰۰۰ در Walkerton کانادا گسترش آلودگی در شبکه ۷ نفر را کشته و هزاران نفر را بیمار کرد. همچنین در ژانویه ۲۰۱۴ به دلیل آلودگی شیمیایی که از رودخانه ELK در غرب ویرجینیا وارد شبکه شده بود، به مدت ۵ روز حدود سیصد هزار نفر، بدون آب شرب بودند (Salomons and Ostfeld, 2016). اخیراً، در سال ۲۰۱۹ در نروژ ۲۷۰۰۰ مصرف‌کننده تحت تأثیر آب آلوده‌شده توسط ماده Clostridium قرار گرفتند (Qiu et al., 2020). هنگامی که یک رخداد در سیستم انتقال آب اتفاق می‌افتد، مانند آلودگی آب در مقیاس وسیع به صورت تصادف یا حمله مخرب، می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر جامعه و اقتصاد داشته باشد.

بحث آلودگی آب و مدیریت کیفی آن در سامانه‌های مختلف آبی از موضوعات مهم و حائز اهمیت است که در تحقیقات زیادی مدنظر قرار گرفته است (Darmian et al., 2018. Dehghani Darmian et al., 2020. Hashemi Monfared et al., 2017. (حریف و همکاران



Moeid, 2001) با توسعه مدل لی و دنینگر از الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزاری برای حل مسئله جانمایی حسگر استفاده کردند. (Ostfeld, 2008). مسئله بهینه‌یابی ایستگاه‌های پایش را بر پایه چهار هدف: کمینه‌کردن زمان

بررسی مطالعات پیشین انجام‌گرفته در رابطه با بهینه‌سازی محل‌های قرارگیری حسگرهای تشخیص ورود آلاینده در شبکه‌های توزیع نشان می‌دهد که با وجود تلاش‌های صورت‌گرفته توسط محققین مختلف، به‌منظور ساده‌سازی مربوط به پیچیدگی در مدل‌سازی و شبیه‌سازی شبکه‌های آب برخی فرضیات ساده کننده مانند محدودکردن محل‌های ورود آلاینده به شبکه، محدودکردن تعداد سنسورهای مورد استفاده در شبکه، محدودکردن سناریوهای آلودگی‌های وارد شده به شبکه و یا در نظر نگرفتن عدم قطعیت مربوط به پارامترهای تأثیرگذار در شبکه‌های توزیع، استفاده شده است؛ لذا در این پژوهش به بررسی تعیین محل‌های بهینه قرارگیری سنسورها با توجه به دو هدف: کمینه کردن تعداد سنسورهای مورد استفاده شده در شبکه و کمینه کردن حداکثر خسارت (حجم آب مصرف شده توسط مصرف‌کنندگان) وارد شده به شبکه‌های توزیع آب (بحرانی‌ترین سناریوی ممکن) با در نظر گرفتن احتمال وقوع آلودگی از تمامی گره‌های شبکه و همچنین عدم قطعیت مربوط به زبری لوله‌های شبکه و میزان آب مصرفی توسط مصرف‌کنندگان، با رویکرد بهینه‌سازی - شبیه‌سازی پرداخته شده است. بدین منظور شش سناریوی مختلف برای غلظت آلاینده وارد شده به شبکه و مدت زمان ورود آلاینده به شبکه‌های توزیع در نظر گرفته شده است. به‌منظور شبیه‌سازی شبکه مورد مطالعه از نرم‌افزار EPANET و به‌منظور بهینه‌سازی از الگوریتم‌های گرگ خاکستری (GWO<sup>5</sup>) و ژنتیک چندهدفه (NSGA-II<sup>6</sup>) بصورت همزمان استفاده شده است.

## مواد و روش‌ها

### نرم‌افزار EPANET

ماکزیمم کردن پوشش قسمت زیادی از سیستم توزیع آب شرب، توسط هر یک از سنسورهای تشخیص آلاینده استفاده گردید. محققان زیادی کار لی و دنینگر را مبنای تحقیق خود قرار دادند و مطالعات پایش شبکه توزیع آب را بر اساس آن ادامه دادند. اولین بار (Al-Zahrani and ) تشخیص آلودگی موجود در شبکه، تأثیرات ناشی از آلودگی بر جمعیت، بهینه‌سازی کردن احتمال کشف آلودگی و کمینه کردن مصرف آلاینده وارد شده قبل از تشخیص توسط ایستگاه‌های پایش، حل نمود. (Comboul and ) (Ghanem, 2013) تحلیل عدم قطعیت را برای جانمایی بهینه حسگرها با هدف بهینه‌سازی کردن احتمال تشخیص نفوذ آلودگی در شبکه توسعه دادند. در این تحقیق از شبیه‌سازی مونت کارلو برای شبیه‌سازی عدم قطعیت متناظر نیاز آبی استفاده شد. (Rathi and Gupta, 2016) دو هدف بهینه‌سازی کردن پوشش نیاز آبی<sup>۱</sup> و احتمال تشخیص آلودگی برای جانمایی بهینه حسگرها را در نظر گرفتند. (Hu et al., 2017) الگوریتم ژنتیک مبتنی بر اسپارک<sup>۲</sup> را برای جانمایی حسگر در یک شبکه توزیع آب بزرگ توسعه دادند. در این تحقیق، معیار جانمایی حسگر در شبکه کمینه کردن زمان تشخیص آلودگی توسط حسگرها بود. (Nazempour et al., 2018) با استفاده از تئوری شبکه پیچیده، دو هدف کمینه‌سازی زمان پوشش آلودگی و بهینه‌سازی پوشش نیاز آبی گره‌ها را برای جانمایی بهینه حسگرها در نظر گرفتند. (de Winter et al., 2019) اهداف مختلفی شامل احتمال تشخیص و شناسایی آلودگی توسط حسگر، متوسط زمانی که حسگر آلودگی را تشخیص می‌دهد و تخمین اثر حمله را در یک رابطه جمع‌بندی کردند و یک مدل تک هدفه مبتنی بر الگوریتم حریصانه<sup>۳</sup> برای جانمایی بهینه حسگرهای شبکه توزیع آب توسعه دادند. اخیراً (Khorshidi et al., 2019) از روش بازی رهبر-پیرو<sup>۴</sup> استفاده کرده و دو هدف کاهش هزینه حسگر و کاهش زمان تشخیص آلودگی را برای جانمایی بهینه حسگرها در نظر گرفتند.

4 - Leader-Follower Game (LFG)

5 - Grey Wolf Optimizer

6 - Non - Dominated Sorting Genetic Algorithm

1 - Demand coverage

2 - Spark-based genetic algorithm (SGA)

3 - Greedy-based algorithm

در این پژوهش به منظور بهینه‌سازی دو هدفه یعنی کمینه کردن تعداد سنسورهای نصب شده در شبکه و کمینه کردن حداکثر خسارت وارد شده به شبکه از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) استفاده شده است. همچنین به منظور تعیین حداکثر خسارت وارد شده به شبکه از الگوریتم گرگ خاکستری استفاده شده است. در ادامه به معرفی این دو الگوریتم پرداخته می‌شود

### الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO)

الگوریتم گرگ خاکستری، الگوریتمی فراابتکاری است که از زندگی گروهی گرگ‌های خاکستری و ساختار و وظایف آنها در شکار الهام گرفته شده است. این الگوریتم در سال ۲۰۱۴ توسط میرجلیلی و همکاران ارائه شده است (Mirjalili et al., 2014). در این الگوریتم همه اعضای گروه دارای سلسله‌مراتب تسلط اجتماعی بسیار دقیقی هستند به طوری که شامل چهار رتبه اصلی بوده و در یک ساختار هرمی مانند شکل ۱، با کاهش تسلط از بالا به پایین مدل می‌شوند. بلندمرتبه‌ترین گرگ گروه، گرگ آلفا نامیده می‌شود که مسئولیت شکار، تعیین زمان و محل خواب و سایر فعالیت‌های گروه را به عهده دارد. سایر گرگ‌ها از گرگ آلفا و تصمیمات او اطاعت می‌کنند. پس از گرگ آلفا، گرگ بتا بالاترین رده را در گروه در اختیار دارد. بتا نقش مشاور گرگ آلفا را ایفا می‌کند و تحت امر آلفا هست. پایین‌ترین دسته در این سلسله‌مراتب، گرگ امگا است، امگا معمولاً از تمام گرگ‌های سطوح بالای خود پیروی می‌کند (Mirjalili et al., 2014). شکار گروهی گرگ‌های خاکستری شامل سه مرحله الف: ردیابی، تعقیب و نزدیک شدن به طعمه ب: دنبال کردن، محاصره کردن و اذیت کردن شکار تا زمان تسلیم شدن طعمه و ج: حمله به سمت طعمه می‌باشد (Muro et al., 2011)

برای مدل‌سازی سلسله‌مراتب اجتماعی گرگ‌ها بهترین پاسخ را آلفا و از بین بهترین راه‌حل‌ها، دومین و سومین را بتا و دلتا در نظر می‌گیریم. بقیه راه‌حل‌های کاندیدا را امگا در نظر می‌گیریم. بهینه‌سازی توسط آلفا، بتا و دلتا هدایت می‌شود و گروه چهارم از این سه گروه پیروی می‌کند. مدل‌سازی رفتار محاصره گرگ‌ها از روابط ۵ و ۶ استفاده می‌کند (Mirjalili et al., 2014)

نرم‌افزار EPANET یک برنامه کامپیوتری می‌باشد که رفتار هیدرولیکی و کیفی آب را در شبکه‌های تحت فشار و به صورت دوره زمانی گسترده شبیه‌سازی می‌کند. مدل EPANET جریان آب در لوله‌ها، فشار در گره‌ها، ارتفاع آب در تانک‌ها و غلظت مواد شیمیایی را در سراسر شبکه طی یک دوره شبیه‌سازی با چندین گام زمانی دنبال می‌کند (Rossman, 2000).

### معادلات شبیه‌سازی کمی آب در نرم‌افزار

به منظور تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع بایستی دستگاه معادلات غیرخطی شامل معادلات پیوستگی در هر گره و معادلات انرژی در هر حلقه به صورت هم‌زمان حل شوند. روابط ۱ و ۲ به ترتیب معادلات پیوستگی و انرژی را بیان می‌کنند (تابش، ۱۳۹۷):

$$\sum_{i \in I_j} Q_{ij} - q_j = 0 \quad j = 1, 2, \dots, n_j \quad (1)$$

$$\sum_{i \in I_\omega} h_i = 0 \quad \omega = 1, 2, \dots, n_\omega \quad (2)$$

در این معادلات  $Q_{ij}$  معرف دبی ورودی از لوله  $i$  به گره  $j$ ،  $q_j$  دبی برداشت از گره  $j$ ،  $n_j$  تعداد گره‌های برداشت شبکه و  $I_\omega$  مجموعه لوله‌های متصل به گره می‌باشند.  $I_\omega$  مجموعه لوله‌ها در حلقه  $\omega$  ام و  $n_\omega$  تعداد حلقه‌های شبکه می‌باشند.  $h_i$  افت هد لوله  $i$  ام است که در این پژوهش از رابطه هیزن - ولیامز استفاده شده و مطابق رابطه زیر تعیین می‌شود (تابش، ۱۳۹۷).

$$h_i = \frac{10.68 L_i Q_i^{1.852}}{CHW_i^{1.852} D_i^{4.87}} \quad (3)$$

در این معادله  $L_i$  طول،  $Q_i$  دبی جریان،  $D_i$  قطر داخلی و  $CHW_i$  ضریب هیزن - ولیامز لوله  $i$  ام است

### معادله شبیه‌سازی کیفی آب در نرم‌افزار

انتقال مواد تشکیل‌دهنده کیفیت آب در امتداد لوله  $i$  ام توسط معادله انتقال کلاسیک زیر ارائه شده است:

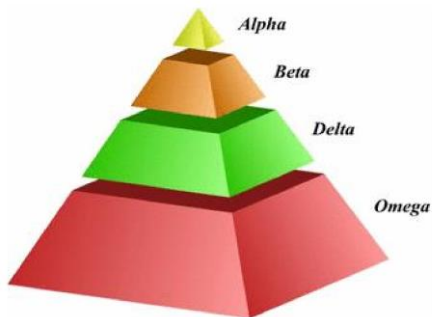
$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -u_i \frac{\partial c_i}{\partial x} \pm R(c_i) \quad (4)$$

این معادله شامل ترم‌های انتقال و واکنش می‌باشد. در این معادله  $c_i$  غلظت آلاینده در لوله  $i$  ام در زمان  $t$  و مکان  $x$  برحسب میلی‌گرم بر لیتر است. مقدار  $u_i$  سرعت جریان آب در لوله  $i$  ام برحسب متر بر ثانیه است. کمیت  $R(c_i)$  مربوط به نرخ واکنش (دیواره و حجمی) است.

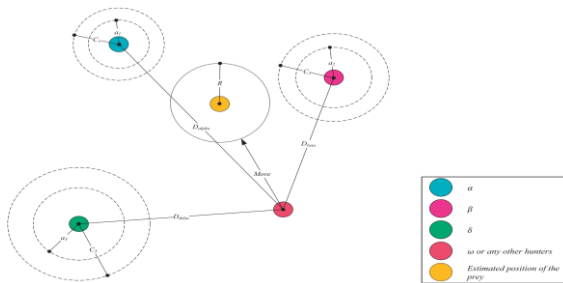
### مدل بهینه‌سازی

در این روابط  $X$  موقعیت مکانی متغیر در وضعیت فعلی و  $X(t+1)$  موقعیت مکانی متغیر در وضعیت بعدی است.

$X_\alpha$  و  $X_\beta$  به ترتیب موقعیت مکانی گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا می‌باشند.  $D_\alpha$ ،  $D_\beta$  و  $D_\delta$  فاصله‌ی پاسخ مورد نظر به ترتیب تا پاسخ آلفا، بتا و دلتا می‌باشند. شکل ۲، چگونگی محاصره جواب نهایی در درون یک دایره به واسطه سه گروه آلفا، بتا و دلتا را در فضای جستجو و همچنین تعیین موقعیت گروه امگا را نشان می‌دهد (Mirjalili et al., 2014).



شکل (۱): ساختار هرمی اجتماع گرگ خاکستری



شکل (۲): موقعیت به‌روزرسانی گرگ‌ها در الگوریتم گرگ خاکستری (Mirjalili et al., 2014).

### الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II)

الگوریتم NSGA-II اولین بار توسط سرینیواس و دب<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۴ معرفی شد. این الگوریتم بهینه‌ساز یکی از الگوریتم‌های کارآمد در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است (Srinivas and Deb, 1994). 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

$$\vec{D} = \vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t) \quad (5)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (6)$$

در این روابط،  $t$  تعداد تکرار فعلی،  $A$  و  $C$  بردارهای ضرب،  $\vec{X}_p$  بردار موقعیت شکار و  $X$  بردار موقعیت یک گرگ است. برای محاسبه بردارهای  $A$  و  $C$  از روابط ۷ و ۸ استفاده می‌شود (Mirjalili et al., 2014).

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (7)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (8)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (8)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (8)$$

بردار  $a$  از ۲ تا صفر به صورت خطی در طول دوره تکرار کاهش می‌یابد.  $r$  بردار تصادفی بین صفر و یک است. باتوجه به تصادفی بودن بردارهای  $r_1$  و  $r_2$  گرگ‌ها می‌توانند موقعیت خود را در فضایی که شکار را دربرگرفته به صورت تصادفی و با استفاده از روابط ۹ و ۱۰ تغییر دهند. شکار گرگ‌های خاکستری اغلب توسط گرگ آلفا هدایت می‌شود. گرگ‌های بتا و دلتا بعضی اوقات در شکار شرکت می‌کنند. برای مدل کردن این رفتار سه مورد از بهترین پاسخ‌های به‌دست‌آمده را ذخیره کرده و دیگر عوامل جستجو را طبق رابطه ۱۱، مجبور کرده تا موقعیت خود را باتوجه به موقعیت بهترین عوامل جستجو به‌روزرسانی نمایند (Mirjalili et al., 2014).

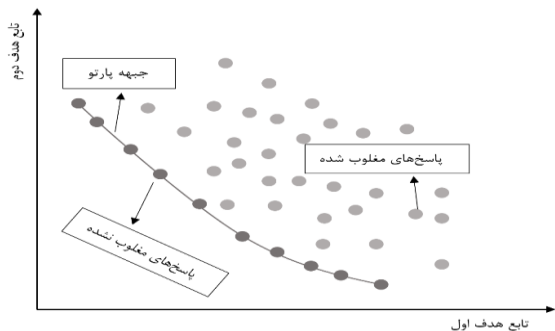
$$\begin{cases} \vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \\ \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}| \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \\ \vec{X}_1 = |\vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha| \\ \vec{X}_2 = |\vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta| \end{cases} \quad (10)$$

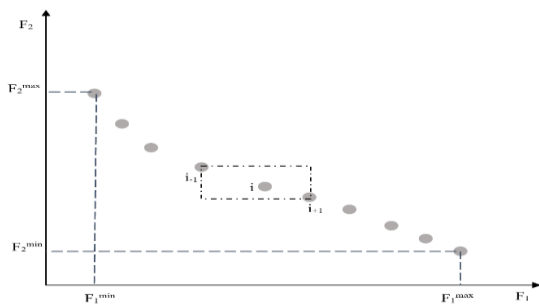
$$\begin{cases} \vec{X}_3 = |\vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta| \\ \vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \end{cases} \quad (11)$$



یکسان هستند فاصله ازدحامی محاسبه شده و اعضای هر دسته بر اساس این شاخص مرتب می‌شوند. قابل ذکر است که هرچه شاخص مذکور بیشتر باشد بیانگر پخش‌شدگی و واگرایی بیشتر اعضای دسته بوده و مطلوب‌تر است (Srinivas and Deb, 1994). شکل ۴.



شکل (۳): مفهوم مرتب‌سازی نامغلوب در NSGA-II



شکل (۴): شاخص فاصله ازدحامی در الگوریتم NSGA-II

رابطه فاصله ازدحامی برای نقطه  $i$  ام نسبت به تابع هدف  $j$  ام به صورت رابطه ۱۳ است. در حالت کلی و برای  $m$  تابع هدف، فاصله ازدحامی نقطه  $i$  ام به صورت رابطه ۱۴ است.

$$d_i^j = \frac{|f_j^{i+1} - f_j^{i-1}|}{f_j^{max} - f_j^{min}} \quad (13)$$

$$d_i = d_i^1 + d_i^2 + \dots + d_i^m = \sum_{j=1}^m d_i^j \quad (14)$$

اشکال ۵ و ۶، فلوجارت مربوط به الگوریتم‌های گرگ خاکستری و ژنتیک چندهدفه را نشان می‌دهند

### توابع هدف

همان‌طور که در قسمت مقدمه عنوان شد هدف از این پژوهش تعیین محل‌های بهینه ایستگاه‌های پایش کیفیت آب باهدف کمینه کردن حداکثر خسارت وارد شده به شبکه‌های توزیع آب در اثر ورود آلاینده‌های مختلف به شبکه است. بدین منظور دو تابع هدف کمینه کردن

متغیر تصمیم و هدف عملیات جستجو را انجام دهد. در الگوریتم ژنتیک ابتدا جمعیتی از پاسخ‌ها یا افراد (کروموزوم‌ها) ایجاد می‌شود. هریک از افراد دارای خصوصیات منحصر به فردی است. این ویژگی‌ها با یک رشته دودویی (ژن) نشان داده می‌شود که روی «کروموزوم» ترکیب می‌شوند. هرکدام از ژن‌ها بیانگر مجهولات مسئله موردنظر هستند. ارزش هر کروموزوم در جمعیت با محدودیت‌ها و قیود مسئله مشخص می‌شود. در هر گام از الگوریتم، افرادی به عنوان والدین از جمعیت انتخاب می‌شوند که از آن‌ها برای تولید فرزندان نسل بعد استفاده می‌شود. سپس با اجرای عملگر جهش روی کروموزوم‌ها و بازترکیب آن‌ها، نسلی جدید از «کروموزوم‌ها» ایجاد می‌شود که حداقل برخی از اعضای آن، نسبت به نسل قبلی، برابری بهتری دارند. این الگوریتم جهت انتخاب اعضای بهینه از دو روش مرتب‌سازی نامغلوب و تعیین شاخص فاصله ازدحامی استفاده می‌کند (Srinivas and Deb, 1994).

مرتب‌سازی نامغلوب<sup>۱</sup>: یک مسئله کمینه که دارای دو متغیر تصمیم‌گیری  $i$  و  $j$  می‌باشد را در نظر می‌گیریم: طبق تعریف  $i$  بر  $j$  غلبه دارد در صورتی که

$$\begin{cases} F(i) \leq F(j) & \text{برای تمامی توابع هدف ها} \\ F(i) < F(j) & \text{برای حداقل یک تابع هدف} \end{cases} \quad (12)$$

در این مرحله اعضای جمعیت در دسته‌هایی طبقه‌بندی می‌شوند به طوری که اعضای دسته اول توسط دیگر اعضای جمعیت نامغلوب باشند. جمعیت دسته دوم تنها توسط اعضای دسته نخست مغلوب باشند و این فرآیند در سایر دسته‌ها ادامه می‌یابد به گونه‌ای که هر دسته توسط اعضای دسته‌های قبل از خود مغلوب می‌شود و بقیه اعضا را مغلوب می‌کند (Srinivas and Deb, 1994). (شکل ۳).

تعیین شاخص فاصله ازدحامی<sup>۲</sup>: این پارامتر نشان‌دهنده نزدیکی و یا دوری هر عضو جمعیت در دسته مشخص به دیگر اعضای جمعیت دسته مذکور می‌باشد. پس از تعیین رتبه هرکدام از اعضای جمعیت برای اعضای که دارای رتبه

2 - Crowding distance

1 - Non dominated Sorting



$$\phi = \begin{cases} 1 & C_{i,t} \geq C_{\text{allowable}} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases}$$

$C_{\text{allowable}}$  غلظت مجاز می‌باشد. در این پژوهش فرض شده است که سنسورها توانایی شناسایی غلظت‌های بالاتر از  $0/01$  میلی گرم بر لیتر را دارند و همچنین غلظت مجاز هم همان  $0/01$  میلی گرم بر لیتر در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن نیاز گره‌ها به صورت لیتر بر ثانیه، گام زمانی شبیه‌سازی بر حسب ثانیه، خسارت به دست آمده بر حسب لیتر آب مصرف شده توسط مصرف‌کنندگان به دست می‌آید.

حال بایستی خسارت تعریف شده برای تمامی گره‌های شبکه و برای تمامی گام‌های زمانی که گره مورد بررسی آلوده می‌باشد محاسبه گردد. لازم به ذکر است که بعد از آگاهی از وجود آلودگی در شبکه برای حفظ سلامت عموم جامعه باید بهترین تدابیر جهت مقابله با آلودگی 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, 2003). در این پژوهش پیش‌بینی می‌شود که پس از تشخیص آلودگی سیستم شبکه آب واکنش نشان داده و یکی از توصیه‌های مذکور انجام گیرد که یا سیستم بسته می‌شود و یا عملکرد آن تغییر می‌کند. به فاصله زمانی از تایم تشخیص آلودگی ( $t_d$ ) تا زمان واکنش نشان دادن سیستم، زمان پاسخ سیستم گفته می‌شود. زمان پاسخ سیستم بسته به نوع سیستم و همچنین شدت آلودگی وارد شده به شبکه آب، برنامه‌ریزی‌های انجام گرفته برای سیستم و ... متفاوت می‌باشد و در این بازه زمانی ایستگاه‌های نظارت اطلاعات مربوط به آلودگی شناسایی شده در شبکه را جمع‌آوری و ذخیره می‌کنند.

خسارت وارد شده به شبکه و کمینه کردن تعداد سنسورهای نصب شده در شبکه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند که در ادامه به بررسی هر کدام از توابع هدف پرداخته می‌شود.

### ۱- تعداد سنسورهای مورد استفاده

به دلیل هزینه‌های زیاد مربوط به تهیه، نگهداری و مراقبت از سنسورهای نصب شده در ایستگاه‌های پایش، به منظور کاهش هزینه‌های مربوطه یکی از اهداف پژوهش، کمینه کردن هزینه‌های مربوط به تعداد سنسورهای نصب شده می‌باشد؛ لذا تابع هدف اول به صورت ذیل تعریف می‌شود.

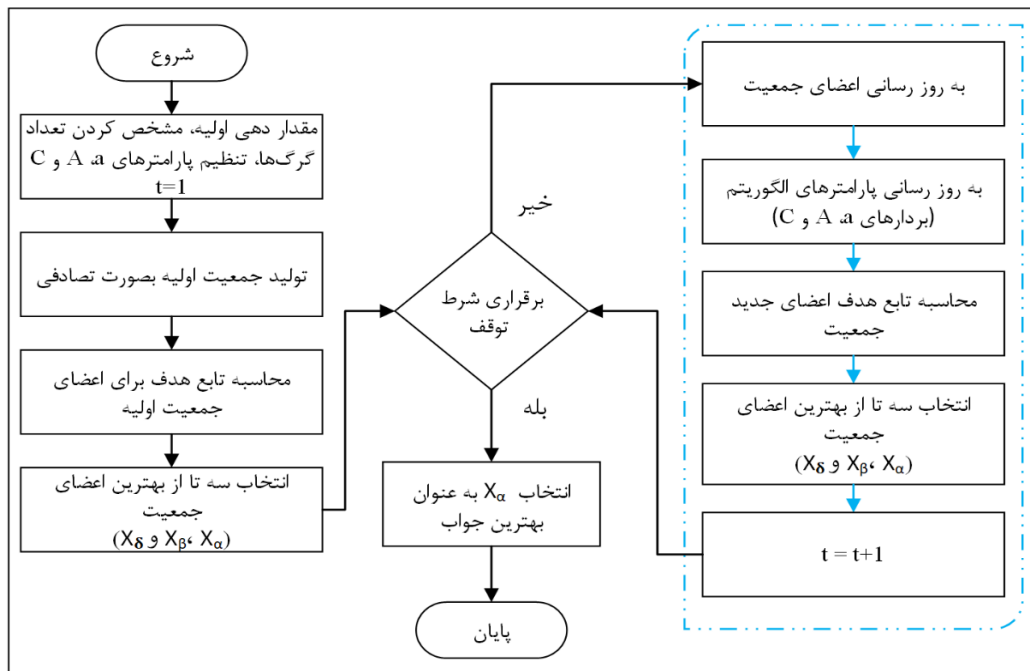
$$F_1 = \min(\sum_{i=1}^{ns} S_i) \quad (15)$$

### ۲- حداکثر خسارت وارد شده به شبکه

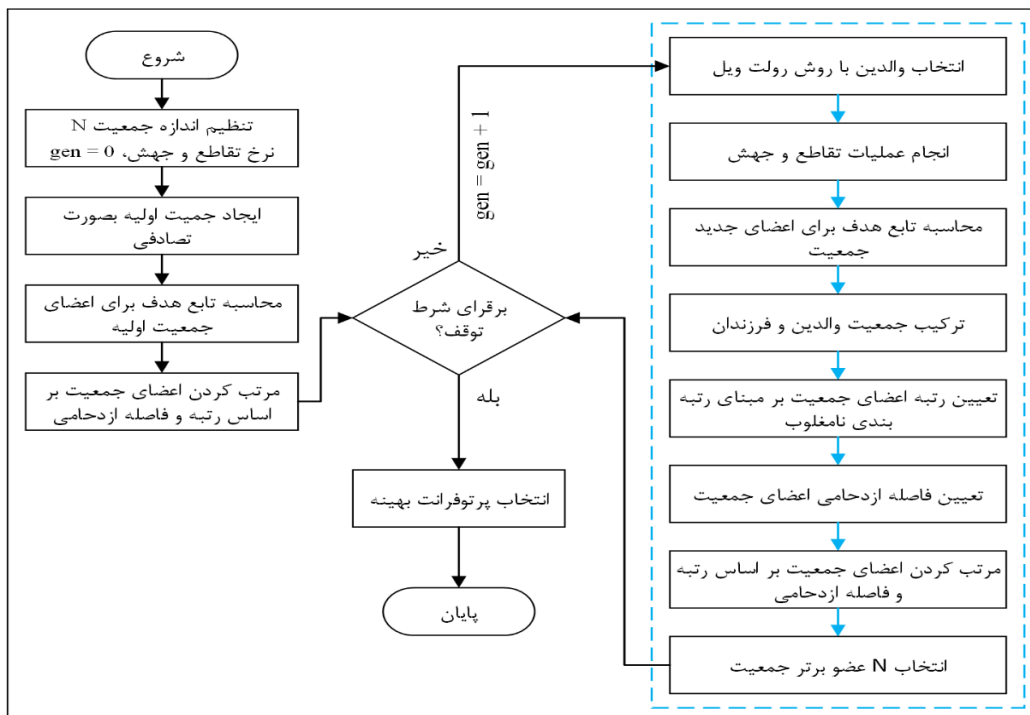
اثر آلودگی وارد شده به شبکه‌های توزیع توسط شاخصی به‌عنوان تابع هدف دوم در نظر گرفته شده است. کسلر و همکاران در سال ۱۹۹۸، مفهوم حجم آب آلوده مصرف شده توسط مصرف‌کنندگان را بیان کردند (Kessler et al., 1998) لذا خسارت ناشی از ورود آلاینده به شبکه‌های توزیع آب به صورت حجم آب آلوده مصرف شده در نظر گرفته می‌شود و به منظور حداقل کردن اثرات منفی ناشی از مصرف آلودگی توسط مصرف‌کنندگان در این پژوهش سعی می‌شود تا حداکثر خسارت وارد شده (حداکثر حجم آب آلوده مصرف شده توسط مصرف‌کنندگان) به کمترین مقدار خود برسد. بدین منظور فرض شود که آلودگی از گره  $z$  ام و در گام زمانی  $s$  وارد شبکه شود، خسارت ایجاد شده در گره  $i$  ام و در گام زمانی  $t$  ام به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$D_{i,t,j,s} = Q_{i,t} * \Delta t * \phi \quad (16)$$

که در آن  $D_{i,t,j,s}$  خسارت در گره  $i$  ام و در گام زمانی  $t$  ام با فرض ورود آلاینده از گره  $z$  ام و در گام زمانی  $s$ ،  $Q_{i,t}$  نیاز مصرفی گره  $i$  ام در گام زمانی  $t$  ام،  $\Delta t$  مدت زمان گام شبیه‌سازی نرم‌افزار EPANET،  $\Phi$  مشخص‌کننده آلوده بودن یا نبودن گره  $i$  ام می‌باشد که به صورت ذیل تعریف می‌شود.



شکل (۵): فلوجارت الگوریتم گرگ خاکستری



شکل (۶): فلوجارت الگوریتم ژنتیک چندهدفه

این پژوهش بازه زمانی ۳۰ دقیقه برای زمان پاسخ سیستم در نظر گرفته شده است ( $T = t_d + 30$ )؛ لذا خسارت کلی وارد شده به شبکه با وجود حسگر در شبکه به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$TD = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^{n_j} D_{i,t} \quad (18)$$

زمان پاسخ سیستم بسته به نوع سیستم و همچنین شدت آلودگی وارد شده به شبکه آب، برنامه‌ریزی‌های انجام گرفته برای سیستم و ... متفاوت می‌باشد و در این بازه زمانی ایستگاه‌های نظارت اطلاعات مربوط به آلودگی شناسایی شده در شبکه را جمع‌آوری و ذخیره می‌کنند. در

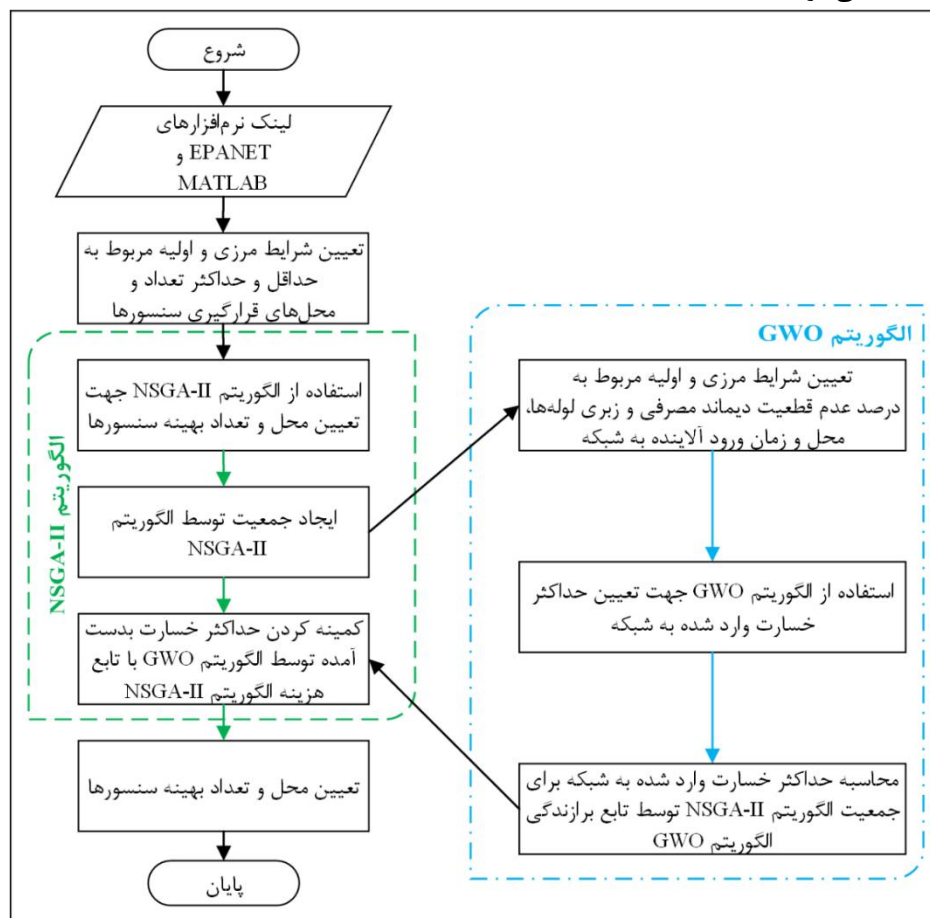
$$F_2 = \min(\max(TD)) \quad (20)$$

به طور خلاصه هرکدام از اعضای جمعیت الگوریتم ژنتیک دارای تعداد و محل متفاوت از قرارگیری سنسورها می باشند و در نتیجه مقدار حداکثر خسارت وارد شده به شبکه نیز تغییر می کند؛ علاوه بر آن نیاز مصرفی گره ها و همچنین ضریب زبری لوله های شبکه تغییر می کند و در نتیجه بازهم مقدار حداکثر خسارت وارد شده به شبکه تغییر می کند، یعنی هر دفعه که تابع هزینه الگوریتم ژنتیک اجرا شود بایستی در داخل آن الگوریتم گرگ خاکستری ابتدا اجرا شود تا حداکثر خسارت وارد شده متناسب با شرایط جدید تعیین شود و سپس الگوریتم ژنتیک این خسارت محاسبه شده را مینیمم کند. شکل ۷، فلوچارت مربوط به مراحل شبیه سازی - بهینه سازی روش ارائه شده در پژوهش را نشان می دهد.

که در آن  $n_j$ ، تعداد کل گره های شبکه و  $T$  زمان واکنش سیستم می باشد. باتوجه به مشخص نبودن محل و مشخصات آلودگی وارد شده به شبکه مقدار خسارت کل شبکه عددی ثابت نبوده و برای در نظر گرفتن بحرانی ترین (بیشترین) مقدار خسارت کل از الگوریتم گرگ خاکستری استفاده شده است. تابع هدف مربوط به این الگوریتم به صورت ذیل تعریف می شود:

$$F = \max(TD) \quad (19)$$

این الگوریتم با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای نیاز مصرفی گره ها، زبری لوله های شبکه و مشخصات آلودگی وارد شده به شبکه اقدام به محاسبه بیشترین خسارت وارد شده به شبکه می کند. پس از آنکه بیشترین خسارت وارد شده به شبکه توسط الگوریتم گرگ خاکستری محاسبه شد حال با کمک الگوریتم ژنتیک بایستی این مقدار خسارت کل را کمینه کرد؛ لذا تابع هدف دوم الگوریتم ژنتیک به صورت ذیل محاسبه می شود:

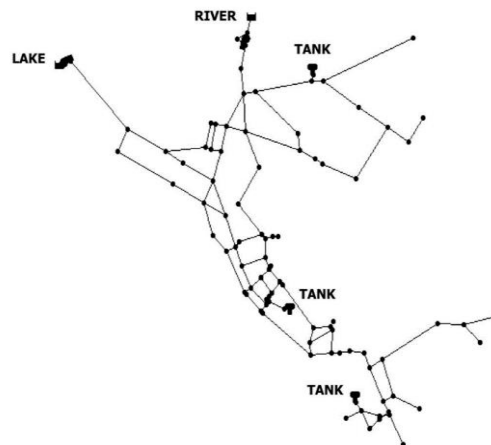


شکل (۷): فلوچارت مراحل شبیه سازی - بهینه سازی پیشنهادی

(مصرف کننده و داخلی)، ۱۱۹ لوله اتصال بین گره‌ها، دو ایستگاه پمپاژ آب، سه مخزن ذخیره و دو مخزن سطحی می‌باشد. شکل ۸، نمایی از این شبکه را نشان می‌دهد

### مشخصات شبکه

شبکه مورداستفاده در این تحقیق، مسئله نمونه ۳ نرم‌افزار EPANET می‌باشد. این شبکه شامل ۹۲ گره

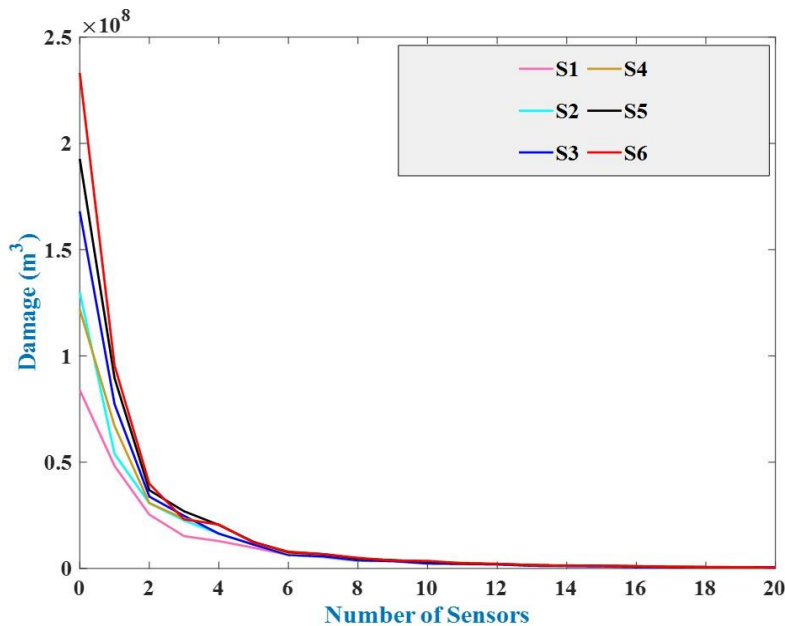


شکل (۸): شبکه مورداستفاده در پژوهش (Rossman, 2000).

پژوهش تمامی گره‌های شبکه به‌عنوان محلی مستعد برای ورود آلاینده به شبکه در نظر گرفته شده‌اند. علاوه بر آن آلودگی در هر ساعت از شبانه‌روز می‌تواند وارد شبکه توزیع گردد. برای مقدار آلاینده و مدت‌زمان تزریق آلاینده وارد شده به شبکه، شش سناریوی مختلف در نظر گرفته شده است به این صورت که در سناریوهای یک تا سه (S1 تا S3)، به ترتیب غلظت آلاینده وارد شده برابر با ۱۰، ۲۵ و ۴۰ گرم بر دقیقه و مدت‌زمان ورود آلاینده به شبکه ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شده است. در سناریوهای چهار تا شش (S4 تا S6)، به ترتیب غلظت آلاینده وارد شده برابر با ۱۰، ۲۵ و ۴۰ گرم بر دقیقه و مدت‌زمان ورود آلاینده به شبکه ۶۰ دقیقه در نظر گرفته شده است. برای تمامی سناریوها مدت‌زمان شبیه‌سازی ۴۸ ساعت در نظر گرفته شده است و تزریق آلاینده به شبکه تنها در ۲۴ ساعت نخست انجام می‌گیرد. مرزهای پارتو بهینه برای هر شش سناریوی موردنظر برای شبکه مورد بررسی در شکل ۹، ارائه شده است.

### نتایج و بحث

باتوجه به آنکه تعداد مصرف‌کنندگان از یک شبکه توزیع بسیار زیاد می‌باشد لذا میزان آب مصرفی از گره‌ها مقدار ثابت نخواهد بود به همین دلیل در این پژوهش بازه ۲۰٪+ تا ۲۰٪- برای لحاظ نمودن اثر عدم قطعیت آب مصرفی از گره‌های شبکه در نظر گرفته شده است. از طرفی در هر شبکه توزیع با گذشت زمان و افزایش سن لوله‌های شبکه، تغییر در ضریب زبری لوله‌ها ایجاد می‌شود و همچنین ممکن است بخشی از لوله‌های شبکه پس از مدتی تعویض شود و در نتیجه بازهم ضریب زبری لوله‌ها تغییر می‌کند؛ لذا علاوه بر مدنظر قراردادن عدم قطعیت مربوط به میزان آب مصرفی، عدم قطعیتی برای ضریب زبری لوله‌ها با نوسان ۶٪+ تا ۶٪- نیز در نظر گرفته شد. همان‌طور که در قسمت مقدمه بیان شد شبکه‌های توزیع آب به دلیل گستردگی زیاد که دارند هر کدام از گره‌های شبکه می‌توانند محلی برای ورود آلاینده به صورت عمده و یا تصادفی باشند لذا در این



شکل (۹): مرزهای پارتوی بهینه تعداد سنسور در مقابل حداکثر خسارت برای شبکه مورد بررسی

در این شکل حداکثر خسارت محتمل در مقابل تعداد سنسورهای نصب شده در شبکه از صفر تا ۲۰ سنسور را نشان می‌دهد. این نتایج مربوط به پیاده‌سازی هم‌زمان دو الگوریتم گرگ خاکستری و NSGA-II با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مذکور برای میزان آب مصرفی گره‌ها و ضریب زبری لوله‌ها می‌باشد. نتایج حاصل نشان داد هنگامی که هیچ‌گونه حسگری در شبکه نصب نباشد، حداکثر خسارت محتمل برای سناریوهای یک تا شش به ترتیب برابر با ۸۴، ۱۳۰/۱، ۱۶۸، ۱۲۱/۹، ۱۹۲/۷ و ۲۳۳/۱ هزار مترمکعب آب می‌باشد گره و زمان ورود آلودگی‌های متناظر با بیشترین خسارات وارد شده به ترتیب برابر با گره ۲۵۷ و زمان ورود ۳۰ دقیقه بامداد، گره ۱۲۰ و زمان ورود ۱:۳۰ دقیقه بامداد، گره ۶۰ و زمان ورود ۳:۳۰ دقیقه بامداد، گره ۱۲۰ و زمان ورود ۲:۰۰ دقیقه بامداد و گره ۲۰ و زمان ورود ۷:۳۰ دقیقه صبح می‌باشند، همان‌طور که مشاهده می‌شود گره ۱۲۰ در سه سناریو گره‌ی با بیشترین خسارت ممکن می‌باشد بنابراین این گره جزو بحرانی‌ترین گره‌ها برای ورود آلودگی به شبکه مورد بررسی می‌باشد و بایستی توسط سنسور پایش لحظه‌ای گردد. تنها با نصب یک سنسور در شبکه در محل بهینه می‌توان حداکثر خسارت وارد شده به شبکه را در سناریوهای یک تا شش به ترتیب به ۵۸/۵،

۵۳/۹۶، ۴۴/۹۴، ۵۳/۵۳ و ۵۹ درصد کاهش داد. مطابق با شکل ۹، با افزایش تعداد سنسورهای نصب شده در شبکه تا تعداد ۲۰ سنسور حداکثر خسارت محتمل وارد شده در سناریوهای یک تا شش تا ۹۹ درصد کاهش می‌یابد؛ اما در مقابل هزینه‌های مربوط به تهیه، نصب و نگهداری سنسورها افزایش می‌یابد. همچنین مطابق با نتایج این نمودار هنگامی که تعداد سنسورهای نصب شده در شبکه تعداد کمتری باشد، کاهش حداکثر خسارت دارای شیب بیشتری بوده و در مقابل وقتی تعداد حسگرها از یک حدی بیشتر شود، حداکثر خسارت وارد شده با شیب خیلی کمتری کاهش می‌یابد. با مقایسه سناریوهای S1 تا S3 و S4 تا S6، مشاهده می‌شود که همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش غلظت آلودگی وارد شده به شبکه، خسارت وارد شده به شبکه نیز افزایش می‌یابد. مقایسه سناریوهای S1 با S4، S2 با S5 و S3 با S6 نشان می‌دهد که با افزایش زمان ورود آلودگی به شبکه خسارت وارد شده به شبکه نیز افزایش می‌یابد. به منظور درک بهتر از محل‌های قرارگیری حسگرها در شبکه مورد بررسی، شکل ۱۰ محل‌های بهینه قرارگیری سنسورهای تشخیص آلاینده برای شش سناریوی مورد بررسی و برای حالات تعداد سنسور برابر با یک، پنج و ده سنسور را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، سنسورهای تشخیص آلاینده به خوبی در نقاط مختلف شبکه پراکنده

سنسورهای لازم، بکار گرفته شده است. حداکثر خسارت وارده به صورت حداکثر مقدار آب آلوده محتمل مصرف شده توسط مشترکین تعریف می‌گردد. در این پژوهش جهت بهینه‌سازی دو هدفه از الگوریتم ژنتیک و به منظور محاسبه حداکثر خسارت محتمل از الگوریتم گرگ خاکستری استفاده گردیده است. بدین صورت که در هر گام از اجرای الگوریتم ژنتیک برای محاسبه تابع هدف اول (حداکثر خسارت محتمل)، الگوریتم گرگ خاکستری به صورت هم‌زمان اجرا شده و حداکثر خسارت محتمل را تعیین می‌کند. قابل ذکر است که به منظور شبیه‌سازی و تحلیل هیدرولیکی و کیفی شبکه موردنظر از اتصال نرم‌افزارهای EPANET و MATLAB استفاده شده است.

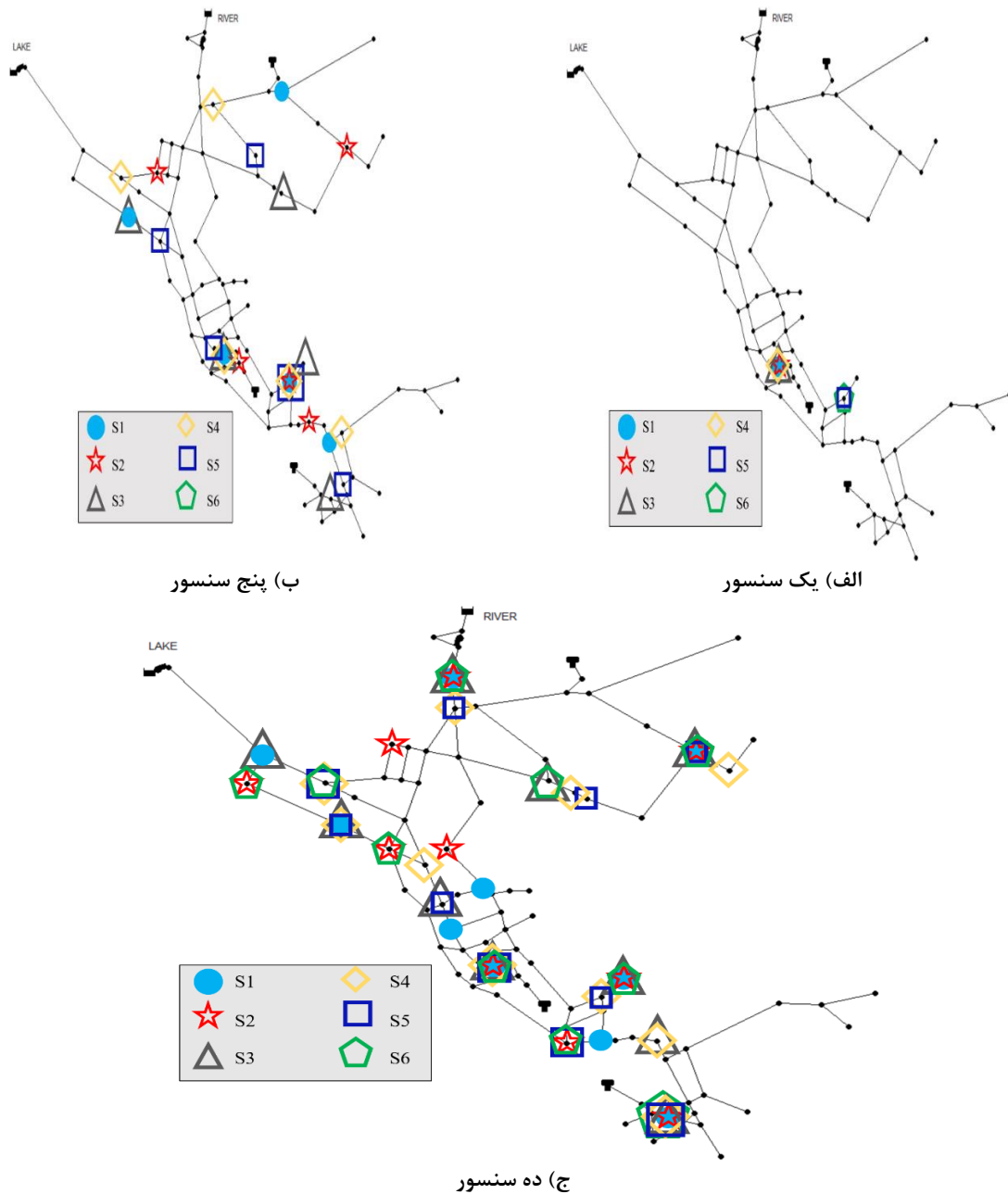
بررسی و تحلیل نتایج نشان داد که محل‌های پیشنهادی برای نصب سنسورها در مسیر جریان گره‌هایی قرار دارد که ورود آلودگی از آن‌ها منجر به بروز بیشترین خسارت ممکن می‌شود. همچنین مطابق با نتایج به دست آمده، نصب تنها یک حسگر در شبکه حداکثر خسارت وارد شده به شبکه را در سناریوهای یک تا شش به ترتیب ۴۲/۵، ۵۸/۵، ۵۳/۹۶، ۴۴/۹۴، ۵۳/۵۳ و ۵۹ درصد کاهش داد. با افزایش تعداد سنسورهای نصب شده در شبکه تا ۲۰ عدد، حداکثر خسارت وارد شده به شبکه تا ۹۹ درصد کاهش یافت. با بررسی بحرانی‌ترین گره در صورت ورود آلودگی به شبکه نتایج حاصل نشان داد که گره ۱۲۰ گرهی با بیشترین خسارت ممکن می‌باشد و بایستی با نصب سنسور به طور پیوسته پایش گردد. یافتن چنین گره‌های حساسی در کلیه شبکه‌های انتقال آب با کمک روش‌ها و مدل‌های شبیه‌ساز - بهینه‌ساز توصیه می‌گردد.

شده‌اند. همچنین محل‌های بهینه قرارگیری سنسورها برای سناریوهای مختلف متفاوت می‌باشد؛ با این وجود بعضی از گره‌های شبکه در سناریوهای مختلف مشترک بوده و بیشترین تکرار محل قرارگیری سنسورها را دارا هستند.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش روشی مبتنی بر شبیه‌سازی - بهینه‌سازی بادر نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مؤثر برای جانمایی بهینه حسگرهای تشخیص آلودگی در شبکه‌های توزیع آب به منظور پایش هر چه بهتر کیفیت آب ارائه گردید. جانمایی حسگرهای تشخیص آلودگی در محل‌های بهینه می‌تواند به تشخیص مناسب آلودگی‌های وارد شده به شبکه به صورت عمدی یا اتفاقی و همچنین اقدامات مدیریتی بعدی کمک شایانی نماید. در این راستا در جهت واقعی‌تر نمودن خروجی‌ها و به منظور در نظر گرفتن تأثیر عدم قطعیت پارامترها در فرایند شبیه‌سازی تغییرات برابر  $\pm 20\%$  درصد برای نیاز آبی هر گره و  $\pm 6\%$  درصد برای ضریب زبری لوله‌های شبکه توزیع در نظر گرفته شد. علاوه بر این باتوجه به اینکه آلاینده از هر یک از نقاط شبکه و در هر زمانی می‌تواند وارد شبکه‌های توزیع شود این مهم نیز در شبیه‌سازی شبکه مورد مطالعه لحاظ گردید. همچنین برای میزان آلاینده ورودی و مدت زمان تزریق (ورود) آلاینده به شبکه نیز شش سناریوی محتمل در نظر گرفته شد.

به منظور تعیین محل‌های بهینه قرارگیری سنسورها در شبکه الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه با اهداف کمینه نمودن حداکثر خسارت وارده به شبکه و کمینه کردن تعداد



شکل ۱۰. محل بهینه قرارگیری سنسورها در شبکه توزیع برای حالات الف) یک سنسور ب) پنج سنسور ج) ده سنسور

## منابع

- تابش، م. ۱۳۹۷. مدل سازی پیشرفته شبکه های توزیع آب. چاپ چهارم. دانشگاه تهران.
- حریف، س.، غ. عزیزیان، م. گیوه چی و م. دهقانی درمیان. ۱۴۰۱. تحلیل و ارزیابی ابزارهای مدیریت کیفی در شبکه های توزیع آب در مقابل ورود آلودگی در شبکه آب شرب شهر زاهدان. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. دوره ۱۲. شماره ۳. ص ۴۳۷-۴۵۳
- حریف، س.، غ. عزیزیان، م. گیوه چی و م. دهقانی درمیان. ۱۳۹۹. بررسی کارایی جریان رقیق ساز، زمان ماند و خروج آب آلوده در مدیریت کیفی شبکه توزیع آب پس از وقوع آلودگی (مطالعه موردی: شبکه آب شرب شهر زاهدان). نشریه اکوهیدرولوژی. دوره ۷. شماره ۴. ص ۱۰۳۳-۱۰۴۵



حریف، س.، غ. عزیزیان، م. گیوه‌چی و م. دهقانی درمیان. ۱۴۰۰. جانمایی بهینه سنسورها در شبکه توزیع آب با هدف شناسایی مشخصات منبع آلاینده در حداقل زمان تشخیص. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. دوره ۱۵. شماره ۲. ص ۳۴۲-۳۵۶

دهقانی درمیان، م.، غ. عزیزیان و س. آ. هاشمی منفرد. ۱۳۹۸. تحلیل و محاسبه ابزارهای موردنیاز برای حفاظت کیفی آب بمنظور کمینه کردن مخاطرات وارده به محیطزیست. نشریه مخاطرات طبیعی. دوره ۸. شماره ۲. ص ۱۴۴-۱۲۳

هاشمی منفرد، س.، آ. م. دهقانی درمیان، ب. پیرزاده و م. اژدری مقدم. ۱۳۹۵. پیش بینی کیفیت آب در جریان های یک بعدی به کمک تابع انتقال آلودگی جدید و اصلاح معیار همگرایی. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. دوره ۲۳. شماره ۲. ص ۱۶۲-۱۴۷

Al-Zahrani, M., and K. Moeid. 2001. Locating optimum water quality monitoring stations in water distribution system. Pages 1-9 in *Bridging the Gap: Meeting the World's Water and Environmental Resources Challenges*.

Basupi, I. 2013. Adaptive water distribution system design under future uncertainty.

Comboul, M., and R. Ghanem. 2013. Value of information in the design of resilient water distribution sensor networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* 139:449-455.

Corso, P. S., M. H. Kramer, K. A. Blair, D. G. Addiss, J. P. Davis, and A. C. Haddix. 2003. Costs of illness in the 1993 waterborne *Cryptosporidium* outbreak, Milwaukee, Wisconsin. *Emerging infectious diseases* 9:426.

Darmian, M. D., S. A. H. Monfared, G. Azizyan, S. A. Snyder, and J. P. Giesy. 2018. Assessment of tools for protection of quality of water: uncontrollable discharges of pollutants. *Ecotoxicology and environmental safety* 161:190-197.

De Winter, C., V. R. Palleti, D. Worm, and R. Kooij. 2019. Optimal placement of imperfect water quality sensors in water distribution networks. *Computers & Chemical Engineering* 121:200-211.

Dehghani Darmian, M., F. Khodabandeh, G. Azizyan, J. P. Giesy, and S. A. Hashemi Monfared. 2020. Analysis of assimilation capacity for conservation of water quality: controllable discharges of pollutants. *Arabian Journal of Geosciences* 13:1-13.

Hashemi Monfared, S. A., M. Dehghani Darmian, S. A. Snyder, G. Azizyan, B. Pirzadeh, and M. Azhdary Moghaddam. 2017. Water quality planning in rivers: assimilative capacity and dilution flow. *Bulletin of environmental contamination and toxicology* 99:531-541.

Hu, C., G. Ren, C. Liu, M. Li, and W. Jie. 2017. A Spark-based genetic algorithm for sensor placement in large scale drinking water distribution systems. *Cluster Computing* 20:1089-1099.

Kessler, A., A. Ostfeld, and G. Sinai. 1998. Detecting accidental contaminations in municipal water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* 124:192-198.

Khorshidi, M. S., M. R. Nikoo, E. Ebrahimi, and M. Sadegh. 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.

Lee, B. H., and R. A. Deininger. 1992. Optimal locations of monitoring stations in water distribution system. *Journal of Environmental Engineering* 118:4-16.

Mirjalili, S., S. M. Mirjalili, and A. Lewis. 2014. Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software* 69:46-61.

Muro, C., R. Escobedo, L. Spector, and R. Coppinger. 2011. Wolf-pack (*Canis lupus*) hunting strategies emerge from simple rules in computational simulations. *Behavioural processes* 88:192-197.

Nazempour, R., M. A. S. Monfared, and E. Zio. 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.

Organization, W.H. 2017.

23. Ostfeld, A., J. G. Uber, E. Salomons, J. W. Berry, W. E. Hart, C. A. Phillips, J.-P. Watson, G. Dorini, P. Jonkergouw, and Z. Kapelan. 2008. The battle of the water sensor networks (BWSN): A design challenge for engineers and algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management* 134:556-568.



- Qiu, M., E. Salomons, and A. Ostfeld. 2020. A framework for real-time disinfection plan assembling for a contamination event in water distribution systems. *Water research* 174:115625.
- Rathi, S., and R. Gupta. 2016. A simple sensor placement approach for regular monitoring and contamination detection in water distribution networks. *KSCE Journal of Civil Engineering* 20:597-608.
26. Rossman, L. A. 2000. EPANET 2: user's manual.
- Salomons, E., and A. Ostfeld. 2016. Slug feed optimal disinfection of water distribution networks following a contamination event. Pages 516-522 in *World Environmental and Water Resources Congress 2016*.
- Srinivas, N., and K. Deb. 1994. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary computation* 2:221-248.
- Toolbox, R. P. 2003. *Planning for and Responding to Drinking Water Contamination Threats and Incidents*. USEPA: Washington, DC, USA.
- UNICEF, WHO. 2009. *Diarrhea: Why children are still dying and what can be done*. New York/Geneva: UNICEF and WHO, 1995.