

## Research Paper

# Multi-Objective Optimization of Locating the Pollution Detection Sensor in the Urban Water Distribution System Using the Multi-Objective Optimization Algorithm of Coordinated Search

Hamed Mazandaranzadeh<sup>1</sup>, Matin Hendoupour<sup>2</sup>

1. Department of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2. Department of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

Received: 2019.9.7

Revised: 2020.9.21

Accepted: 2020.10.18

Use your device to scan and read  
the article online



DOI: [10.30495/wej.2021.4588](https://doi.org/10.30495/wej.2021.4588)

### Keywords:

Contaminate Warning System,  
Biological Attacks, Water  
Supply Network, EPANET.

### Abstract

**Introduction:** Following the terrorist attacks of September 11, 2001 in the United States, concern about the security of water distribution systems has increased. Water distribution systems are highly vulnerable to intentional or accidental contamination, due to their physical and geographical characteristics. Such threats can affect public trust in the distribution system. Putting a contaminant warning system up, including sensors in the water distribution network, is a hopeful approach to disconnect water supply networks at the time of the occurrence of pollution. Due to the high cost of purchasing, installation and maintenance of such sensors, their location should be calculated by using optimization algorithms.

**Materials and Methods:** In this research, a multi-objective optimization model has been developed using harmony search algorithm to calculate the optimal location of detection sensors in water distribution systems based on two criteria for minimizing the time detection of pollution and maximizing the coverage of sensors. The simulation of events in different scenarios is done by connecting the EPANET hydraulic model toolbox and the MATLAB software, and the second example of EPANET software is as the case study.

**Findings:** The results show that the optimal detection time is 19296 seconds and the optimal coverage is 26494 gallons per minute. By increasing the importance of optimal detection time to the increasing the sensor coverage, the detection time decreased by 32%, and the sensor coverage, by contrast, decreased by 26%.

**Conclusion:** It seems that in situations where two criteria are of equal importance, one of the sensors is located in a crowded place to reduce the time of contamination detection and the other in the middle of the network to increase network coverage.

**Citation:** Mazandaranzadeh H, Hendoupour M. Multi-Objective Optimization of Locating the Pollution Detection Sensor in the Urban Water Distribution System Using the Multi-Objective Optimization Algorithm of Coordinated Search. *Water Resources Engineering Journal*. 2021; 14 (48): 43- 53.

\*Corresponding author: Hamed Mazandaranzadeh

**Address:** Department of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

**Tell:** 00989123810750

**Email:** mazandaranzadeh@eng.ikiu.ac.ir

## Extended Abstract

### Introduction

The water distribution systems are inherently exposed to deliberate or accidental damage. In this regard, the potential of contamination to penetrate the water distribution system is worrying. It should be noted that if the distribution network is exposed to biological or chemical contamination entering the system, this would quickly lead to an irreparable risk to life (1). For instance, the use of contaminated drinking water in May 2000 in Ontario, Canada, resulted in severe poisoning of 2,300 people (2). Although the water quality is controlled in the water-treatment plants, it can noticeably be altered during the transfer process from the water-treatment plant until it reaches consumers. Here, the location of the contaminants entering the network is unpredictable. Moreover, the contaminants can enter the network from several places simultaneously. Placing a water contamination warning system such as sensors in the water distribution network, is a hopeful approach in order to stop the water supply networks in the event of contamination.

Regarding the high cost of purchasing, installing, and maintaining such sensors, their locations must accurately be chosen to install them, such that the installation of sensors could decrease the severity of possible losses and damages. Although in the last two decades, several methods have been proposed by researchers with different objectives to place sensors in the water distribution network and many methods have been developed to solve them, but there is not an agreement among researchers on objectives, methodology, and other aspects of locating the sensors. This paper aims to optimize the location of the sensors based on two conflicting objectives: minimizing the contamination detection time as well as maximizing the sensor coverage.

### Materials and Methods

**model in this paper**, the multi-objective optimization of harmony search algorithm is

utilized to obtain the optimal location of contamination detection based on two criteria: (a) minimizing the contamination detection time and (b) maximizing the sensor coverage. The initial population of the harmony search algorithm is randomly chosen among the nodes of the network, in which the stop condition is also determined to run the model until the best answer is not improved during the last 500 repetitions. Ultimately, Nash, Kalai-Smorovski and Monotonic Area methods are employed to select the final optimal point from the Pareto front points.

By connecting EPANET software and MATLAB software, an integrated model of emission simulation-optimization is created. The second example of EPANET software is investigated as a case study. The proposed network contains 36 nodes, 40 pipes, a pumping station, and two sensors (see Figure 1). In this network, three flow patterns are predicted over 24 hours along with one contamination injection pattern. It is possible to place sensors in any of the nodes. The initial contamination quality of the nodes is assumed to be zero. Regarding the existence of 36 nodes in the network as well as the possibility of simultaneous attack from two nodes, the number of possible scenarios is equal to half the product of 36 in 35 and equal to 630 scenarios. The injection mass of contamination is equal to a constant value of 2 mg/l, and the duration of the injection period is 6hr at the peak consumption (8).

### Findings and Discussion

The results of the Pareto optimal curve indicate that the optimal location for the sensor is nodes 25 and 11. The reason for this can be attributed to the shape of the network, as node 25 is located in a crowded place, so that the installation of sensors at this point will reduce the contamination detection time. Besides, the location of node 11 in the middle of the network will increase the sensor coverage. While the contamination detection time varies from about 13,000 seconds to about 26,000

seconds, the amount of network coverage varies from about 15,000 to 36,000 gallons per minute. In other words, a 100% increase in the contamination detection time can be resulted in a 140% increase in terms of the network coverage. Furthermore, by employing the optimal point selection methods, the optimal contamination detection time of 19296 seconds and the optimal coverage of 26494 gallons per minute are calculated.

### **Conclusion**

The sensors should be installed in a location that can detect the highest population coverage, the shortest contamination detection time, the least spread, and the least amount of contaminated water used. As such, the placement of the sensors can be performed under different objectives. The results revealed where two objectives are of equal importance, one of the sensors is located in a crowded place to decrease the contamination detection time, whereas the other is located in the middle of the network to increase the network coverage. It should be mentioned that as the importance of objectives varies, the location of the sensors changes to either the crowded or central areas of the network as well.

### **Ethical Considerations**

#### **Compliance with ethical guidelines**

All subjects fulfill the informed consent.

#### **Funding**

No funding.

#### **Authors' contributions**

Design and conceptualization: Hamed Mazandaranzadeh, Matin Hendoupour; Methodology and data analysis: Matin Hendoupour; Supervision and final writing: Hamed Mazandaranzadeh.

#### **Conflicts of interest**

The authors declared no conflict of interest.

## مقاله پژوهشی

## بهینه‌سازی چندهدفه جانمایی حسگر تشخیص آلودگی در سیستم توزیع آب شهری با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی هماهنگ

حامد مازندرانی زاده<sup>\*</sup>، متین هندوپور<sup>۱</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۱۶

تاریخ داوری: ۱۳۹۹/۶/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۲۷

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:10.30495/wej.2021.4588

### واژه‌های کلیدی:

سیستم هشدار آلودگی، حملات بیولوژیکی، شبکه آب‌رسانی، EPANET

### چکیده

**مقدمه و هدف:** سیستم‌های توزیع آب به دلیل ماهیت گسترده جغرافیایی، نسبت به ورود آلودگی‌های عمدی و یا تصادفی بسیار آسیب‌پذیر هستند. وجود چنین تهدیدهایی می‌تواند اعتماد عمومی نسبت به سیستم توزیع آب را تحت تأثیر قرار دهد. سیستم هشدار آلودگی شامل استقرار حسگرهایی در شبکه توزیع آب است که باعث قطع شبکه آب‌رسانی در زمان وقوع آلودگی می‌شوند. با توجه به هزینه زیاد خرید، نصب و نگهداری چنین حسگرهایی، باید نسبت به انتخاب محل نصب آن‌ها دقت شود، به نحوی که نصب حسگرها باعث کاهش شدت تلفات و خسارات احتمالی شود. محاسبه محل استقرار این حسگرها بر اساس یکی از اهداف کاهش زمان تشخیص آلودگی، افزایش پوشش حسگرها، کاهش حجم آب آلوده مصرف شده و یا چند هدف همزمان، می‌تواند انجام شود.

**مواد و روش‌ها:** در این پژوهش با استفاده از مدل بهینه‌سازی چند هدفه الگوریتم جستجوی هماهنگ به محاسبه محل استقرار بهینه حسگرهای تشخیص آلودگی بر اساس دو معیار الف- کاهش زمان تشخیص آلودگی و ب- افزایش پوشش حسگرها پرداخته شده است. با اتصال نرم‌افزار EPANET و نرم افزار MATLAB، اقدام به تشکیل مدل یکپارچه شبیه‌سازی-بهینه‌سازی انتشار آلاینده شد و مثال دوم نرم افزار EPANET به عنوان مطالعه موردی بررسی شد.

**یافته‌ها و بحث:** نتایج منحنی بهینه پارتو نشان می‌دهد درحالی‌که زمان تشخیص آلودگی از حدود ۱۳۰۰۰ ثانیه تا حدود ۲۶۰۰۰ ثانیه در تغییر است، مقدار پوشش شبکه از حدود ۱۵۰۰۰ تا ۳۶۰۰۰ گالن بر دقیقه تغییر می‌کند. به عبارت دیگر ۱۰۰٪ افزایش زمان تشخیص آلودگی منجر به افزایش ۱۴۰٪ در پوشش شبکه خواهد شد. همچنین با استفاده از روشهای انتخاب نقطه بهینه نهایی، زمان بهینه تشخیص آلودگی ۱۹۲۹۶ ثانیه و پوشش بهینه ۲۶۴۹۴ گالن در دقیقه محاسبه شد.

**نتیجه‌گیری:** نتایج نشان داد در شرایطی که دو هدف از اهمیت یکسان برخوردار باشند یکی از حسگرها در مکانی پر ازدحام به منظور کاهش زمان تشخیص آلودگی و دیگری در وسط شبکه به منظور افزایش پوشش شبکه قرار می‌گیرد.

\* نویسنده مسئول: حامد مازندرانی زاده

نشانی: گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین، ایران

تلفن: ۰۲۸۳۳۹۰۱۲۳۰

پست الکترونیکی: mazandaranizadeh@eng.ikiu.ac.ir

حسگرها به کمک الگوریتم اکتشافی شاخه و حد به حل مسئله جانمایی حسگرها پرداخت. استفاده از تئوری اطلاعات برای کمک به تعیین موقعیت جایگذاری حسگر در شهر لامرد استان فارس و مقایسه با مطالعات صورت گرفته قبلی نشان می‌دهد استفاده از این تئوری منجر به بهبود در سرعت حل الگوریتم و همچنین افزایش دقت مکان انتخابی خواهد شد (۱۵).

هرچند که در دو دهه گذشته روش‌های مختلفی توسط محققان و با اهداف متفاوت برای جایگذاری حسگرها در شبکه توزیع آب پیشنهاد شده و روش‌های زیادی برای حل آن‌ها توسعه یافته است، اما توافقی در میان محققان در خصوص اهداف، روش‌شناسی و سایر جنبه‌های محاسبه محل قرار دادن حسگرها وجود ندارد. بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد تمرکز بیشتر آنها بر حل مسائل تک هدفه بوده است و مسائل چندهدفه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین در بین اهداف انتخاب شده برای مسائل چند هدفه، تاکنون تحقیقی که همزمان شامل دو هدف متعارض کاهش زمان تشخیص آلودگی و افزایش پوشش حسگر باشد مورد توجه محققین قرار نگرفته است. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد استفاده از الگوریتم‌های جستجوی حریصانه و GA بیشتر مورد توجه محققین بوده است و از الگوریتم‌های جدیدتری نظیر الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه جستجوی هماهنگ (MOHS)<sup>۳</sup> استفاده نشده است. در این پژوهش با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه MOHS به حل مثال شماره ۲ نرم‌افزار EPANET با اهداف الف- کاهش زمان تشخیص آلودگی و ب- افزایش پوشش حسگر پرداخته شده است. در نهایت به منظور انتخاب نقطه مطلوب نهایی از بین نقاط جبهه پارتو<sup>۴</sup> از روش‌های نش، Kalai-Smorovski و Monotonic Area استفاده شده است.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش با استفاده از مدل بهینه‌سازی دوهدفه الگوریتم جستجوی هماهنگ به محاسبه محل استقرار بهینه حسگرهای تشخیص آلودگی بر اساس دو معیار الف- کاهش زمان تشخیص آلودگی و ب- افزایش پوشش حسگرها پرداخته شده است. با اتصال نرم‌افزار EPANET و نرم افزار MATLAB، اقدام به تشکیل مدل یکپارچه شبیه‌سازی-بهینه‌سازی انتشار آلاینده شد و مثال دوم نرم افزار EPANET به عنوان مطالعه موردی بررسی شد. شبکه مثال شماره ۲ نرم افزار EPANET، در این تحقیق به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. این شبکه از ۳۶ گره، ۴۰ لوله، یک ایستگاه پمپاژ و دو حسگر تشکیل شده است (شکل ۱). در این شبکه سه الگوی جریان در بازه زمانی ۲۴ ساعت و یک الگوی تزریق آلودگی پیش بینی شده است. امکان قرارگیری حسگرها در هر یک از گره‌ها وجود دارد، کیفیت آلودگی اولیه گره‌ها برابر صفر در نظر گرفته شده است. با توجه به وجود ۳۶ گره در شبکه و احتمال وقوع حمله هم‌زمان از دو گره، تعداد

سیستم‌های توزیع آب به‌طور ذاتی در معرض آسیب‌های تصادفی یا عمدی قرار دارند. پتانسیل نفوذ آلودگی در سیستم توزیع آب نگران‌کننده است. چنانچه شبکه توزیع در معرض آلودگی شیمیایی یا بیولوژیکی وارد شده به سیستم قرار گیرد، این امر به‌سرعت منجر به بروز خطرات جانی جبران‌ناپذیری خواهد شد (۱). استفاده از آب آشامیدنی آلوده شده در ماه می سال ۲۰۰۰ در انتاریو کشور کانادا منجر به مسمومیت جدی ۲۳۰۰ نفر شد (۲). مفهوم پوشش شبکه توسط حسگر برای اولین بار در سال ۱۹۹۲ در طراحی سیستم هشدار آلودگی ارائه گردید و با استفاده از روش برنامه‌ریزی عدد صحیح نسبت به مکان یابی بهینه نصب حسگرها اقدام شد (۳). در ادامه مدلی با ساختاری ساده و قابل‌استفاده برای شبکه‌های بزرگ، به حل مسئله تعیین مکان بهینه جایگذاری حسگر با تابع هدف افزایش پوشش حسگر پرداخت (۴). در مدل ارائه شده، توسط لی و دینینگر شرط پوشش گره توسط حسگر، شکل‌گیری مقدار کافی جریان آب از گره آلوده شده به سوی حسگر تعیین شد، که یکی از اشکالات این روش فرض شکل‌گیری جریان ماندگار در طراحی بود. ضعف این مدل با تعمیم مسئله به جریان غیر ماندگار و استفاده از غلظت در تابع هدف اصلاح شد (۵). با گسترش دامنه کاربرد روشهای فراکووشی، از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله تعیین موقعیت بهینه قرارگیری حسگرها با هدف بهینه‌سازی پوشش استفاده شد (۶). در مطالعه مستقل دیگری به بررسی همبستگی‌های متقابل بین اهداف متفاوت بهینه‌سازی مانند کاهش زمان تشخیص آلودگی، افزایش سطح پوشش حسگرها و کاهش جمعیت در معرض آسیب در دو شبکه توزیع آب واقعی پرداخته شد (۷). افشار و میری (۸) با استفاده از ماتریس وزن گره‌ها در مدل بهینه‌سازی، هم‌زمان با اجرای مدل، با استفاده از الگوریتم جامعه مورچه‌ها نسبت به محاسبه مکان نصب حسگرها اقدام نمودند.

از الگوریتم جستجوی حریصانه<sup>۱</sup> برای حل مسئله جایگذاری حسگر با احتمال نامساوی حمله در گره‌ها استفاده شده است (۹). با توجه به وجود اهداف متفاوتی که در نصب حسگرها می‌توان به کار گرفت، از الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA\_II)<sup>۲</sup> به منظور بررسی هم‌زمان توابع هدف کمینه‌سازی جمعیت در معرض آلودگی، کمینه‌سازی زمان تشخیص حسگرها، کمینه‌سازی مقدار آب آلوده مصرف‌شده توسط جمعیت و کمینه‌سازی حملات شناسایی‌نشده استفاده شده است (۱۰). سپس مسئله جانمایی حسگرها به صورت بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم حریصانه توسط کرووز و همکاران در سال ۲۰۰۸ به‌صورت چهار مسئله تک هدفه حل شد و بر مبنای شاخص کاهش خطا نسبت به افزایش تعداد حسگر، اهداف مورد مقایسه قرار گرفت. مسئله جانمایی حسگرها با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل و اهداف طراحی با روش وزن دهی فرمول بندی گردید (۱۱). اثر افزایشی تعداد حسگرها با الگوریتم حریصانه توسط چیفتز و همکاران (۱۲) بررسی شد. معیارهای عملکرد برای مسئله استقرار حسگرها توسط پیلر و همکاران (۱۳) مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. ژائو و همکاران (۱۴) در زمینه جانمایی بهینه

<sup>3</sup> Multi-Objective Harmony Search

<sup>4</sup> Pareto Frontier

<sup>1</sup> Greedy Algorithm

<sup>2</sup> Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm

بازه زمانی تزریق ۶ ساعت در زمان پیک مصرف در نظر گرفته شده است (۸).

سناریوهای محتمل برابر نصف حاصلضرب ۳۶ در ۳۵ و برابر ۶۳۰ سناریو است. جرم تزریق آلودگی، مقدار ثابت ۲ میلی گرم بر لیتر و طول

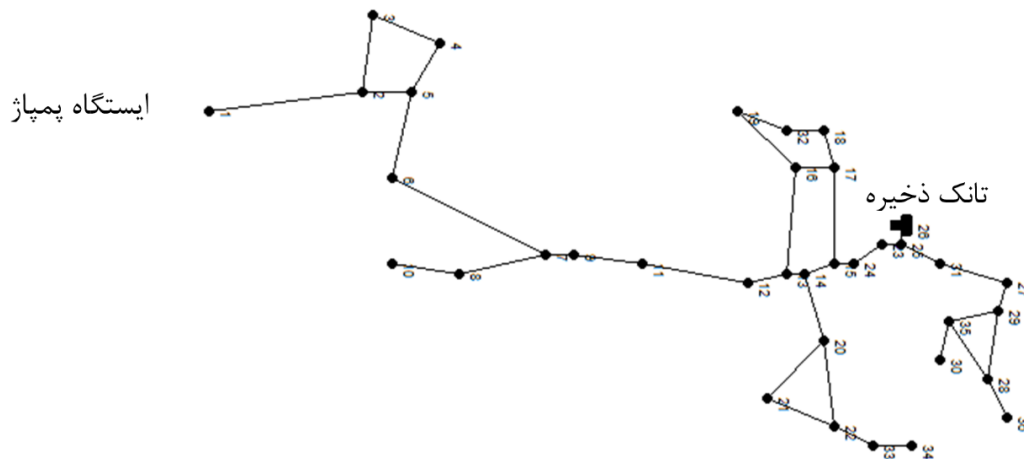


Figure 1\_ Schematic diagram of the case study  
شکل ۱\_ نمودار شماتیک مطالعه موردی

جایگزینی هارمونی‌های اولیه با هارمونی جدید (به‌روزرسانی حافظه هارمونی). / ۷- تکرار مراحل، تا رسیدن به شرایط بهینگی. مدل بهینه سازی پیشنهادی در این پژوهش به‌منظور جانمایی بهینه حسگرها در سیستم توزیع آب شهری، مدل بهینه‌سازی دوهدفه با توابع هدف کاهش زمان تشخیص حسگر و افزایش پوشش حسگر هستند که در جدول (۲) شرح داده شده است. جمعیت اولیه الگوریتم HS به صورت تصادفی در بین گره‌های شبکه انتخاب شد و شرط توقف نیز اجرای مدل تا عدم بهبود بهترین جواب طی ۵۰۰ تکرار گذشته تعیین گردید. در نهایت به‌منظور انتخاب نقطه مطلوب نهایی از بین نقاط جبهه پارتو<sup>۱</sup> از روش‌های نش، Kalai-Smorovski و Monotonic Area استفاده شده است. جزئیات روش‌ها در جدول (۳) آمده است.

#### الگوریتم جستجوی هماهنگ چندهدفه (MOHS)

الگوریتم HS یکی از ساده‌ترین روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری است که تاکنون ارائه شده است. این الگوریتم بهینه‌سازی بر اساس اصول و رفتار موسیقی‌دانان است. هدف آن رسیدن به هارمونی خارق العاده (بهترین موقعیت) به‌وسیله تخمین زیبایی‌شناسی (تابع هدف) است. فرآیند الگوریتم MOHS شامل ۷ مرحله به شرح زیر است (۱۶):  
۱- ایجاد جمعیت اولیه از هارمونی‌ها در ماتریس حافظه هارمونی. / ۲- محاسبه برازندگی هارمونی‌ها بر اساس توابع هدف. / ۳- مرتب کردن جمعیت بر اساس شرط‌های: الف) غلبه، ب) فاصله ازدحامی. / ۴- انتخاب هارمونی‌های برتر بر اساس الف) رتبه جمعیت، ب) فاصله ازدحامی. جدول (۱) / ۵- تولید بردار هارمونی جدید با استفاده از سه عملگر نرخ نگهداری حافظه، نرخ تنظیم هماهنگی و انتخاب تصادفی / ۶-

جدول ۱. فرمول‌های الگوریتم جستجوی هماهنگ چندهدفه (MOHS)

توضیحات	روابط الگوریتم	
شرط‌های غلبه	$(f_i(x_1) \geq f_i(x_2) \quad \forall i=1,2,3,\dots,M)$ and $(f_i(x_1) > f_i(x_2) \quad \exists i=1,2,3,\dots,M)$	
تابع هدف K ام است. کمترین مقدار $f_k^{\min}$ و $f_k^{\max}$ به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار		
محاسبه فاصله ازدحامی	$cd_k(x_i) = \frac{f_k(x_{i+1}) - f_k(x_{i-1})}{f_k^{\max} - f_k^{\min}}$ $cd(x_i) = \sum_{k=1}^M cd_k(x_i)$	
هدف K ام و $cd(x_i)$ کل فاصله ازدحامی جواب $x_i$ به ازای تابع $x_i$ به ازای تمام توابع هدف است.		

جدول ۲. مدل بهینه‌سازی پیشنهادی

توضیحات	مدل بهینه‌سازی	تابع هدف
در این رابطه، $F_1$ تابع هدف، تعداد رخدادهای آلودگی، Node Count تعداد گره‌های شبکه و $t_1$ زمان تشخیص رخداد آلودگی با استفاده از بردار تصمیم $x$ است. برداری صفر و یک است که نمایانگر محل قرارگیری حسگرها است.	$\text{Min } F_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=Nodecount} t_i(x)$ <p>Subject To:</p> $x \in [0, 1]$	تابع هدف کاهش زمان تشخیص
$d_i$ میزان میانگین تقاضای مورد نیاز در گره $i$ (مترمکب بر ثانیه) و $y_i \in [0, 1]$ نشان‌دهنده پوشش یا عدم پوشش گره $i$ است.	$\text{Max } F_2 = \sum_{i=1}^{i=n} d_i \cdot y_i \cdot x$ <p>Subject To:</p> $i=1, \dots, Nodecount$ $y_i \in [0, 1]$ $x \in [0, 1]$	تابع هدف افزایش پوشش شبکه

جدول ۳. فرمول‌های روش‌های محاسبه نقطه بهینه نهایی

توضیحات	فرمول محاسباتی	نام روش
$f_1$ تابع هدف $i$ ام، $d_i$ و $m_i$ به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار تابع هدف $f_1$ است. چنانچه بیشینه‌سازی دو هدف $f_1$ و $f_2$ مورد نظر باشد.	$\text{Maximize } (f_1 - d_1) \times (f_2 - d_2)$ <p>Subject to :</p> $d_1 \leq f_1 \leq m_1$ $d_2 \leq f_2 \leq m_2$	نش متقارن
$w_1$ و $w_2$ به ترتیب درجه اهمیت هدف اول و دوم هستند.	$\text{Maximize } (f_1 - d_1)^{w_1} \times (f_2 - d_2)^{w_2}$ <p>Subject to :</p> $d_1 \leq f_1 \leq m_1$ $d_2 \leq f_2 \leq m_2$	نش نامتقارن
نسبت $\left(\frac{w_2}{w_1}\right)$ شیب خط متقاطع منحنی بهینه پارتو است.	$d_2 + \left[ \frac{(m_2 - d_2)}{(m_1 - d_1)} \right] (f_1 - d_1) \left( \frac{w_2}{w_1} \right) - f_2 = 0$ <p>Subject To:</p> $d_1 \leq f_1 \leq m_1$ $f_2 = g(f_1)$	Kalai-Smorodinsky

## یافته ها

مقادیر بهینه حاصل از حل مدل دوهدفه در قالب جبهه پارتو، در جدول (۴) آمده است. همان گونه که در بخش های قبل توضیح داده شد جبهه پارتو شامل مجموعه جواب هایی است که هیچ یک بر دیگری برتری نداشته و هر یک از آنها از نظر یکی از اهداف مسئله برتری دارد، به طوری که نقاط ابتدایی و انتهایی این جدول به ترتیب

بهترین پاسخ در رویکرد تک هدفه زمان شناسایی آلودگی و پوشش شبکه هستند. جواب شماره ۱ این جدول کمترین مقدار زمان شناسایی و کمترین مقدار پوشش را دارد و جواب شماره ۶ از بیشترین مقدار پوشش و بیشترین زمان شناسایی برخوردار است. سایر جواب ها، جواب هایی میان جواب ۱ و ۶ هستند که هر یک از نظر هدف های زمان تشخیص و سطح پوشش با یکدیگر نامغلوب هستند.

جدول ۴. مجموعه جواب های بهینه در حالت دو هدفه

ردیف	پوشش (گالن بر دقیقه)	زمان (ثانیه)	بهترین جواب
۱	۱۴۹۴۲.۸۱	۱۳۰۳۳	[۲۵,۳۰]
۲	۱۶۲۴۲.۱۹	۱۳۶۰۷	[۲۳,۳۰]
۳	۱۸۱۹۱.۲۵	۱۴۱۶۶	[۲۴,۳۰]
۴	۲۶۴۹۴.۲۶	۱۹۲۹۶	[۲۵,۱۱]
۵	۳۳۶۴۰.۸۲	۱۹۸۵۹	[۱۱,۳۰]
۶	۳۵۵۸۹.۸۸	۲۵۵۷۰	[۱۱,۱۷]

بیشتری نسبت به هدف پوشش برخوردار باشد انتخاب گره های ۲۴ و ۳۰ منطقی است.

## بحث و بررسی

برای تعیین پاسخ نهایی از میان مجموعه جواب های بهینه پارتو، نتایج حاصل از به کارگیری سه روش نش، نش نامتقارن، Kalai-Smorodinsky و Monotonic Area در جدول (۵) ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می شود در صورت یکسان بودن وزن هدف ها ( $w_2, w_1$ )، پاسخ هر سه روش نش، Kalai-Smorodinsky و Monotonic Area یکسان خواهد بود و محل بهینه نصب حسگر گره های ۲۵ و ۱۱ است. دلیل این موضوع را می توان به شکل شبکه نسبت داد (شکل ۱) به گونه ای که گره ۲۵ در محلی پرازدحام واقع شده است و نصب حسگر در این نقطه باعث کاهش زمان تشخیص آلودگی و همچنین قرار گیری گره ۱۱ در وسط شبکه باعث افزایش پوشش حسگرها خواهد شد. چنانچه هدف زمان تشخیص آلودگی نسبت به هدف سطح پوشش شبکه از اهمیت بیشتری برخوردار باشد، جواب بهینه نهایی منطبق بر گره های ۲۴ و ۳۰ خواهد بود به گونه ای که زمان تشخیص آلودگی از ۱۹۲۹۶ ثانیه به ۱۴۱۶۶ ثانیه، در حدود ۲۶ درصد، کاهش خواهد یافت و در مقابل مقدار پوشش از ۲۶۴۹۴ گالن بر دقیقه به ۱۸۱۹۱، در حدود ۳۲ درصد، کاهش خواهد یافت. بررسی شکل شبکه نشان می دهد گره های ۲۴ و ۳۰ هر دو در منطقه پرازدحام که از بیشترین احتمال وقوع حمله برخوردار هستند قرار دارند، لذا چنانچه هدف کاهش زمان تشخیص آلودگی از اهمیت

## نتیجه گیری

حفاظت از سلامت عمومی هدف اولیه و اصلی جاگذاری حسگرها در شبکه آب آشامیدنی است. آلاینده ها در سیستم های توزیع آب به سرعت، مخلوط و رقیق می شوند. به منظور مقابله با حملات بیولوژیکی و کاهش شدت اثر چنین رخدادهایی، می توان از حسگرهای تشخیص آلودگی استفاده کرد. حسگرها باید در محلی نصب شوند که بیشترین پوشش جمعیت، کمترین زمان تشخیص آلودگی، کمترین میزان پخش شدگی و کمترین مقدار آب مصرف شده آلودگی را تشخیص دهند. به این ترتیب جایگذاری حسگرها با اهداف متفاوتی قابل انجام است. در این پژوهش با اتصال دو نرم افزار EPANET و MATLAB با استفاده مدل بهینه سازی چند هدفه MOHS نسبت به تعیین محل جایگذاری حسگر در شبکه مثال ۲ نرم افزار EPANET با دو هدف کاهش زمان تشخیص آلودگی و افزایش پوشش حسگرها اقدام شد. نتایج نشان داد در شرایطی که دو هدف از اهمیت یکسان برخوردار باشند یکی از حسگرها در مکانی پرازدحام به منظور کاهش زمان تشخیص آلودگی و دیگری در وسط شبکه به منظور افزایش پوشش شبکه قرار می گیرد و با تغییر اهمیت هدف ها موقعیت حسگرها به سمت مناطق شلوغ و یا مرکزی شبکه تغییر می یابد.



جدول ۵. تعیین پاسخ بهینه نهایی از میان مجموعه جواب‌های بهینه پارتو

ردیف	پوشش (گالن بر دقیقه)	زمان (ثانیه)	بهترین جواب	روش
۱	۲۶۴۹۴.۲۶	۱۹۲۹۶	[۲۵,۱۱]	نش متقارن
۲	۱۸۱۹۱.۲۵	۱۴۱۶۶	[۲۴,۳۰]	نش نامتقارن (W <sub>1</sub> =۱, W <sub>2</sub> =۲)
۳	۲۶۴۹۴.۲۶	۱۹۲۹۶	[۲۵,۱۱]	نش نامتقارن (W <sub>1</sub> =۲, W <sub>2</sub> =۱)
۴	۲۶۴۹۴.۲۶	۱۹۲۹۶	[۲۵,۱۱]	کالایی - اسمرو دینسکی (W <sub>1</sub> =W <sub>2</sub> =۱)
۵	۱۸۱۹۱.۲۵	۱۴۱۶۶	[۲۴,۳۰]	کالایی - اسمرو دینسکی (W <sub>1</sub> =۱, W <sub>2</sub> =۲)
۶	۲۶۴۹۴.۲۶	۱۹۲۹۶	[۲۵,۱۱]	کالایی - اسمرو دینسکی (W <sub>1</sub> =۲, W <sub>2</sub> =۱)

### ملاحظات اخلاقی

#### پیروی از اصول اخلاق پژوهش

در مطالعه حاضر فرم‌های رضایت نامه آگاهانه توسط تمامی آزمودنی‌ها تکمیل شد.

### مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده پردازی: حامد مازندرانی زاده، متین هندوپور؛ روش شناسی و تحلیل داده‌ها: متین هندوپور، فاطمه فرخایی؛ حامد مازندرانی زاده.

### تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

### حامی مالی

هزینه‌های مطالعه حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شد.

## References

1. Roozbahani, A., Zahraie, B., and Tabesh, M. 2012. "Water Quantity and Quality Risk Assessment of Urban Water Supply Systems with Consideration of Uncertainties", *Journal of Water and Wastewater*, 24, 2-12
2. DOI: 10.1007/s00477-012-0614-9
3. Hrudehy, S. E., Payment, P., Huck, P. M., Gillham, R. W., 2003. "A fatal waterborne 622 disease epidemic in Walkerton, Ontario: Comparison with other waterborne 623 outbreaks in the developed world". *Water Science Technology*, 47(3), 7-14.
4. DOI: 10.2166/wst.2003.0146
5. Lee, B. H. and Deininger, R. A. 1992. "Optimal locations of monitoring stations in water distribution system", *Journal of Environmental Engineering*, 118(1), 4-16.
6. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1992\)118:1\(4\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1992)118:1(4))
7. Kumar A, Kansal M L and Arora G (1997) "Identification of monitoring stations in water Distribution system". *Journal of Environmental Engineering*, 123(8), 746-752.
8. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(1999)125:2(202)
9. Harmant, P., Nace, A., Kiene, L., and Fotoohi F. 1999. "Optimal supervision of drinking water distribution network". *Proceeding, 26th Annual Water Resources Planning and Management Conference*, Reston, Va.
10. DOI: 10.1061/40430(1999)52
11. Al-Zahrani, M., and Syed, J.L., 2004. "Hydraulic reliability analysis of water distribution system", *Journal of the Institute of Engineers, Singapore*, 1(1): 76-91
12. DOI: 10.1007/s11269-017-1686-6
13. Watson, J.P., Greenberg, H.J., and Hart, W. E. 2004, "A multiple-objective analysis of sensor placement optimization in water networks". *Proceedina World Water and*
14. DOI: 10.1001/7073/20047430
15. Afshar A., and Miri Khombi S. M., 2012, "Multi Objective Optimization of Sensor Placement in Water Distribution Networks; Dual Use Benefit Approach", *Journal of Optimization in Civil Engineering*, 5(3): 315-331, (In Persian)
16. <http://ijoce.iust.ac.ir/article-1-218-en.pdf>

17. Berry, J., Fleischer, L., Hart, W.E., Phillips, C.A., and Watson, J.P., 2005 "Sensor placement in municipal water networks", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(3), 237-243.
18. [DOI: 10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2005\)131:3\(237\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:3(237))
19. Ostfeld, A., and Salomons, E. 2008, "The battle of the water sensor networks (BWSN): A design challenge for engineers and algorithms", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(6), 556-568.
20. [DOI: 10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2008\)134:6\(556\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:6(556))
21. Aral M.M, Guan J., and Maslia M.L., 2010, "Optimal design of sensor placement in water distribution networks", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(1), 5-18.
22. [DOI: 10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000001](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000001)
23. Cheifetz, N., and Sandraz, A.C., 2015, "An Incremental Sensor Placement Optimization in a Large Real-World Water System", *13th Computer Control for Water Industry Conference*, CCWI 2015
24. [DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.977](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.977)
25. Piller, O., Deuerlein, J., and Gilbert, D., 2015, "Installing Fixed Sensors for Double Calibration and Early-warning Detection Purposes", *13th Computer Control for Water Industry Conference*, CCWI 2015
26. [DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.909](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.909)
27. Zhao, Y., Schwartz, R., and Salomons, E., 2016, "New formulation and optimization methods for Water sensor Placement", *Environmental Modelling & Software*, 76, 128-136.
28. [DOI: 10.1016/j.envsoft.2015.10.030](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.10.030)
29. Khorshidi, S., Nikoo, M., Sadegh M.R., 2018 "Optimal and objective placement of sensors in water distribution systems using information theory", *Journal of Water Research*, 143, 218-228.
30. [DOI: 10.1016/j.watres.2018.06.050](https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.06.050)
31. Sheng W, Liu KY, Li Y, Liu Y and Meng X Problems in Engineering. Article ID: 871540.
32. [DOI: 10.1155/2014/871540](https://doi.org/10.1155/2014/871540)
33. Geem, Z.W., Kim, J.H., and Loganathan G.V., 2001 "A New Heuristic Optimization Algorithm Harmony Search", *Simulation*, 76(2), 60-68
34. [DOI: 10.1177/003754970107600201](https://doi.org/10.1177/003754970107600201)
35. Haji Rajabi, F., Mazandarani Zadeh, H., 2018, "Multi-Objective optimization of drainage depth based on fair benefits division short-term versus long-term environmental effects", *Journal of Iran-Water Resources Research* 13(4):144-153 (In Persian)
36. [http://iwrr.sinaweb.net/article\\_48027\\_en.html](http://iwrr.sinaweb.net/article_48027_en.html)
37. Harsanyi, J., and Selten, R., 1972 "A generalized nash solution for two-person bargaining games with incomplete information", *Journal of Management Science* 18(5): 80-106.
38. [DOI: 10.1287/mnsc.18.5.80](https://doi.org/10.1287/mnsc.18.5.80)
39. Kalai, E., and Smorodinsky, M., 1975 "Other solutions to Nash's bargaining problem", *Journal of Econometrica*, 43, 513-518.
40. [DOI: 10.2307/1914280](https://doi.org/10.2307/1914280)
41. Krause, A., Leskovec, J., Isovitsch, S., Xu, J., Guestrin, C., Vanbriesen, J., Small, M., and Fischbech, P., 2008 "Optimizing sensor placements in water distribution systems using sub modular function maximization", *Proceeding, 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium*. ASCE, Reston, Cincinnati.
42. [DOI: 10.1061/40941\(247\)109](https://doi.org/10.1061/40941(247)109)
43. Manjarres, D., Landa-Torres, I., Gil-Lopez, S., DelSer, J., Bilbao, M.N., Salcedo-Sanz, S., Geem, Z.W., 2013 "A survey on applications of the harmony search algorithm", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(8), 1818-1831
44. [DOI: 10.1016/j.engappai.2013.05.008](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2013.05.008)
45. Nash, J., 1953, "Two-Person Cooperative Games", *Journal of Econometrica*, 21(1): 128-140.  
DOI: 10.2307/1906951