

Optimal Quality Sensor Placement in Water Distribution Networks under Temporal and Spatial Uncertain Contamination

M. A. Geranmehr¹, M. Yousefi-Khoraem²

1. Researcher at the Institute of Water and Wastewater at Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
(Corresponding Author) mgeranmehr@gmail.com
2. Researcher at Research Institute for Future Studies, Imam Khomeini International University, Ghazvin, Iran

(Received Sep. 23, 2019 Accepted Jan. 30, 2020)

To cite this article:

Geranmehr, M. A., Yousefi-Khoraem, M. 2020. "Optimal quality sensor placement in water distribution networks under temporal and spatial uncertain contamination" Journal of Water and Wastewater, 31(4), 143-155.
Doi: 10.22093/wwj.2020.202339.2931. (In Persian)

Abstract

Contamination of a water distribution network (WDN) is one of the most dangerous events which may occur in accidental or deliberate conditions. The contamination spreads across the network based on the water flow and, as a result, has negative consequences on public health. In this regard, one of the most effective strategies is to install quality sensors. These sensors could reduce the damage due to detecting the contamination and applying appropriate policies. In this study, an optimization approach for quality sensor placement is presented. In this model, based on spatial and temporal uncertainty of input contaminant, a new parameter called maximum possible damage is introduced. Using EPANET as a hydraulic and quality simulator, the damage matrices are calculated for all possible values of temporal and spatial input contamination. In the following, these matrices are used in an optimization model in order to calculate the maximum possible damage. The genetic algorithm is implemented here to solve the problem. The presented method is investigated on a case study network, and results show that this method could find the optimal sensor placement and reduce the damage caused by contamination. As an example, it can be seen that installing one or two sensors could reduce the contaminated water damage by 56% and 78%, respectively.

Keywords: Water Distribution Networks, Quality Sensor, Contamination, Optimization, Uncertainty.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۱، شماره ۴، صفحه: ۱۵۵-۱۴۳

جانمایی بهینه حسگرهای کیفی در شبکه‌های توزیع آب با عدم قطعیت محل و زمان ورود آلودگی

محمدعلی گرانمهر^۱، محمد یوسفی خرایم^۲

۱- پژوهشگر، پژوهشکده آب و فاضلاب دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
(نویسنده مسئول) mgeranmehr@gmail.com

۲- پژوهشگر، پژوهشکده آینده‌پژوهی، دانشگاه بین‌المللی امام‌خمینی، قزوین، ایران

(دریافت ۹۸۷/۱ پذیرش ۹۸۱۱/۱۰)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

گرانمهر، م.ع.، یوسفی خرایم، م. ۱۳۹۹، "جانمایی بهینه حسگرهای کیفی در شبکه‌های توزیع آب با عدم قطعیت محل و زمان ورود آلودگی"

مجله آب و فاضلاب، ۳۱(۴)، ۱۵۵-۱۴۳. Doi: 10.22093/wwj.2020.202339.2931

چکیده

ورود آلودگی به شبکه‌های توزیع آب، یکی از خطرناک‌ترین حوادث محتمل است که می‌تواند به‌صورت تصادفی یا عمدی باشد. با توجه به جریان آب در شبکه، این آلودگی به نقاط مختلف منتقل می‌شود و سلامت مردم را به خطر می‌اندازد. در این راستا، نصب حسگرهای کیفی یکی از مؤثرترین راهکارهاست. با تشخیص آلودگی توسط این حسگرها و اعمال سیاست‌های مناسب پس از آن، خسارت ناشی از مصرف آب آلوده کاهش می‌یابد. در این پژوهش، یک مدل بهینه‌ساز برای جانمایی بهینه محل حسگرهای کیفی ارائه شد. به این منظور، با توجه به عدم قطعیت مربوط به محل ورود آلودگی و گام زمانی ورود آن، پارامتری با عنوان «بیشترین خسارت محتمل» معرفی شد. برای محاسبه این پارامتر، ابتدا ماتریس‌های خسارت برای همه مقادیر محتمل محل و گام زمانی ورود آلودگی و به کمک شبیه‌ساز EPANET محاسبه شدند. در ادامه این ماتریس‌ها در مدل بهینه‌ساز استفاده شده و طرح جانمایی حسگرها با هدف حداقل‌سازی بیشترین خسارت محتمل ارائه شد. در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده شد. نتایج تحلیل یک شبکه نمونه به‌عنوان مورد مطالعاتی نشان داد جانمایی بهینه حسگر(های) کیفی بر اساس روش ارائه شده، تا حد زیادی توانست خسارت ناشی از ورود آلودگی به شبکه را کاهش دهد. به‌عنوان نمونه مشاهده شد که اضافه کردن فقط یک یا دو حسگر کیفی در محل‌های بهینه، می‌تواند خسارت ناشی از آلوده شدن آب را به ترتیب تا ۵۶ و ۷۸ درصد کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های توزیع آب، حسگر کیفی، آلودگی، بهینه‌سازی، عدم قطعیت

۱- مقدمه

اگرچه با مدیریت تزریق کلر، تا حد زیادی آلودگی کنترل می‌شود (Tabesh et al., 2011)، ولی در صورتی که با یک عملیات خراب‌کاری یا تروریستی، یک آلاینده مضر مثل آرسنیک در یک گره از شبکه تزریق شود، آلاینده بر اساس جریان آب منتقل می‌شود و تعدادی از گره‌ها را آلوده می‌کند. در نتیجه در صورت مصرف از

شبکه‌های توزیع آب از مهم‌ترین زیرساخت‌های شهری هستند که عملکرد آن تأثیری مستقیم بر سلامت و آرامش جامعه دارد. یک شبکه توزیع شامل یک یا چند مخزن است و آب به‌صورت ثقلی و یا با استفاده از سیستم پمپاژ در شهر توزیع می‌شود. یکی از چالش‌های مهم در بهره‌برداری شبکه، احتمال ورود آلودگی است.



کمینه کردن اثر آلودگی^۴ (حجم آب آلوده مصرفی^۵، جمعیت در معرض آلودگی^۶ و مقدار آلودگی^۷)، بیشینه کردن احتمال تشخیص آلودگی^۸، بیشینه کردن پوشش تقاضا^۹ و کمینه کردن خطای عملکرد عملکرد حسگرها است (Adedoja et al., 2018).

ورود آلودگی به شبکه، با ۵ ویژگی مختلف شامل نوع آلودگی، جرم آلودگی ورودی، گره ورود آلودگی، زمان شروع ورود آلودگی و طول مدت زمان ورود آلودگی تعریف می‌شود. در این زمینه برای بهینه‌سازی جانمایی حسگرهای کیفی شبکه، ۳ دیدگاه مختلف وجود دارد (Hu et al., 2016). در دیدگاه اول، جانمایی صرفاً برای چند سناریوی محدود و محتمل ورود آلودگی بررسی می‌شود که اصطلاحاً به آن مدل‌های قطعی^{۱۰} گفته می‌شود (Krause et al., 2011).

(Chang et al., 2008) در دیدگاه دوم، یعنی مدل‌های احتمالاتی^{۱۱}، سناریوهای تصادفی معمولاً به روش مونت‌کارلو^{۱۲} برای ورود آلودگی در نظر گرفته می‌شود و جانمایی بهینه حسگرها انجام می‌شود (Rico-Ramirez et al., 2007, Cozzolino et al., 2011, Weickgenannt et al., 2010, Liu and Auckenthaler, 2013, Hu et al., 2020, Hooshmand et al., 2020, Ciaponi et al., 2019, Winter et al., 2019, He et al., 2018) در دیدگاه سوم که در این پژوهش استفاده شده است، جانمایی بهینه حسگرها برای بحرانی‌ترین سناریوی محتمل انجام می‌شود. به این مدل‌ها، مدل‌های قوی^{۱۳} گفته شده که در ادامه برخی پژوهش‌های شاخص در این زمینه بررسی می‌شوند.

ارائه مدل‌های بهینه‌سازی قوی برای جانمایی بهینه حسگرهای کیفی در شبکه با ارائه مجموعه‌ای از مدل‌های جانمایی بهینه با تکیه بر بدترین سناریوی آلودگی از نظر محل ورود و بدون در نظر گرفتن اثر عدم قطعیت زمان ورود، مطرح شد (Carr et al., 2006). (Watson et al., 2009) در ادامه یک مدل چند هدفه برای جانمایی حسگرها به گونه‌ای که در تمامی سناریوهای ورود آلودگی به خوبی عمل کند، ارائه شد (Xu et al., 2010). به عنوان یک پژوهش

این گره‌های آلوده، سلامت مردم به شدت با خطر مواجه می‌شود. به طور کلی، کنترل و حفاظت فیزیکی کامل از همه اجزای شبکه در طول شبانه‌روز امکان‌پذیر نیست و احتمال ورود آلودگی همواره وجود دارد. در این راستا یکی از مؤثرترین راهکارها، نصب حسگرهای کیفی در شبکه است. این حسگرها با تشخیص آلودگی، ریسک خطرات احتمالی را کاهش می‌دهند. با توجه به هزینه زیاد نصب و بهره‌برداری حسگر در تمامی نقاط شبکه، نحوه انتخاب تعداد محدودی نقطه مناسب برای پوشش کل شبکه، یک مسئله متداول در مجامع علمی است. تعیین محل بهینه برای جانمایی تعداد مشخصی حسگر کیفی در شبکه، پرسش اصلی این پژوهش است.

به طور کلی ۴ رویکرد مختلف برای جانمایی حسگرهای کیفی در شبکه وجود دارد (Hu et al., 2016). در رویکرد اول، از تجربیات افراد خبره برای جانمایی حسگرها استفاده می‌شود (Berry et al., 2005, Trachtman, 2008). در رویکرد دوم، جانمایی بر اساس اعمال قوانین مشخص انجام می‌شود. برای مثال در محل اماکن مهم شهر، حسگر کیفی نصب می‌شود (Xu et al., 2012). (Chang et al., 2008) در رویکرد سوم از ابزارهای تئوری و ریاضی مثل نظریه انتروپی^۱ و نظریه قابلیت کنترل^۲ استفاده می‌شود. این روش‌ها معمولاً پیچیدگی محاسباتی دارند و کمتر در عمل استفاده می‌شوند (Shen and Mcbean, 2011, Diao and Rauch, 2013). (Rauch, 2013) رویکرد چهارم که در این پژوهش نیز بررسی شده است، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی - بهینه‌سازی است. در این مدل‌ها با شبیه‌سازی ورود آلودگی‌های مختلف، محل بهینه حسگرها به کمک یک روش بهینه‌سازی تعیین شده که در ادامه جزئیات این مدل‌ها بررسی می‌شود.

یکی از مبانی مهم در هر مسئله بهینه‌سازی، تعریف مناسب توابع هدف، متغیرهای تصمیم و قیود مسئله است. مسئله جانمایی بهینه حسگرهای کیفی در شبکه، می‌تواند به صورت تک هدفه یا چند هدفه بررسی شود. ولی در هر حال، محل حسگرها متغیرهای تصمیم است و توابع هدف نیز به طور عمده شامل مواردی است که آلوده شدن مردم را حداقل کند. این موارد شامل تشخیص سریع آلودگی^۳،

⁴ Contamination Impact

⁵ Volume of Contaminated Water Consumed by Consumers

⁶ Population Exposed to Contamination

⁷ Extent of Contamination

⁸ Detection Likelihood

⁹ Demand Coverage

¹⁰ Deterministic

¹¹ Stochastic

¹² Monte-Carlo

¹³ Robust

¹ Entropy Theory

² Controllability Theory

³ Time of Detection



۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- هیدرولیک شبکه‌های توزیع آب

شبکه‌های توزیع آب، مجموعه‌ای بهم پیوسته از لوله‌ها، مخازن، پمپ‌ها و شیرآلات هستند. تحلیل هیدرولیکی شبکه فرایندی است که با معلوم بودن پارامترهای ورودی مانند موقعیت المان‌های شبکه، تراز ارتفاعی و نیاز آبی گره‌های شبکه، تراز ارتفاعی مخزن، طول، قطر و ضریب اصطکاک داخلی لوله‌ها، پارامترهای خروجی شامل سرعت در هر لوله و فشار در هر گره محاسبه می‌شود. در این راستا، اغلب شبکه‌های توزیع به صورت غیرشاخه‌ای بوده و برای تحلیل هیدرولیکی آن لازم است دستگاه معادلات غیرخطی شامل معادلات پیوستگی در هر گره در معادله ۱ و معادلات انرژی در هر حلقه در معادله ۲ به صورت هم‌زمان حل شوند (Tabesh, 2016)

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

که در آن

Q_{ij} دبی ورودی از لوله i به گره j ام، q_j دبی برداشت از گره j ام است، n_j تعداد گره‌های برداشت شبکه و I_j مجموعه لوله‌های متصل به گره j ام است

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

که در آن

I_ω مجموعه لوله‌ها در حلقه ω ام و n_ω تعداد حلقه‌های شبکه است. h_i افت هد لوله i ام است که در صورت استفاده از رابطه هیزن-ویلیامز، مطابق معادله زیر محاسبه می‌شود (Tabesh, 2016)

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

که در آن

L_i طول، Q_i دبی جریان، D_i قطر داخلی و CHW_i ضریب هیزن-ویلیامز لوله i ام است.

۲-۲- تحلیل کیفی شبکه

در تحلیل کیفی، نحوه پخش و انتشار یک ماده در شبکه بررسی می‌شود و غلظت آن در هر گام زمانی و در هر گره محاسبه می‌شود.

شاخص، جانمایی بهینه حسگرها با هدف کمینه کردن «بیشترین جمعیت تحت پوشش آلودگی» بررسی شد (Ma et al., 2010). البته در این پژوهش اثر تغییرات زمانی نیاز آبی و همچنین اثر عدم قطعیت زمان ورود آلودگی در نظر گرفته نشده است. در ادامه یک مدل بهینه‌ساز چند هدفه برای کمینه کردن تعداد حسگر و کمینه کردن اثر آلودگی پیشنهاد شد که در این پژوهش نیز اثر عدم قطعیت زمان ورود آلودگی در نظر گرفته نشده است (Langowski et al., 2012)

به‌عنوان جمع‌بندی، با توجه به محدودیت هزینه، لازم است جانمایی تعدادی محدود از حسگرهای پایش به صورت بهینه و با هدف کمینه کردن خسارت ناشی از ورود آلودگی به شبکه بررسی شود. همچنین وجود عدم قطعیت‌های نوع آلاینده، محل و گام زمانی ورود آلودگی، غلظت و مدت زمان ورود آلاینده، باعث پیچیدگی مدل‌سازی می‌شود. در این پژوهش، محل و گام زمانی ورود آلودگی به شبکه، دو پارامتر اصلی و دارای عدم قطعیت در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی عدم قطعیت پارامترهای مذکور، کلیه حالت‌های محتمل آنها در نظر گرفته شده و بحرانی‌ترین حالت انتخاب می‌شود. به این منظور، یک مدل بهینه‌ساز تک هدفه و مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای حداقل کردن «بیشترین خسارت محتمل» ناشی از مصرف آب آلوده توسعه داده شده است. در این مدل، متغیرهای تصمیم، نشان‌دهنده شماره گره‌هایی است که حسگرهای کیفی در آنها قرار داده می‌شود. برای محاسبه خسارت، مقدار آب آلوده مصرفی قبل از تشخیص توسط اولین حسگر تعریف شده است. منظور از بیشترین خسارت محتمل، حداکثر خسارتی است که در صورت ورود آلودگی از هر گره و در هر گام زمانی ممکن است به وجود آید. برای محاسبه مقدار بیشترین خسارت محتمل، از ماتریس‌های خسارت استفاده شد که قبل از فرایند بهینه‌سازی محاسبه می‌شوند. به عبارت دیگر، در مدل ارائه شده در این پژوهش، محل بهینه حسگرهای کیفی به گونه‌ای انتخاب می‌شود که بیشترین خسارت ناشی از ورود آلودگی با عدم قطعیت محل و زمان ورود حداقل شود. نوآوری این پژوهش، ارائه یک روش کاربردی و عملی، برای تعیین محل بهینه تعداد مشخصی حسگر کیفی، با استفاده از مفهوم جدید حداقل کردن بیشترین خسارت محتمل برای در نظر گرفتن عدم قطعیت محل و گام زمانی ورود آلودگی است.

از تحلیل دوره گسترده^۲ برای شبیه سازی هیدرولیکی جریان استفاده استفاده شود (Tabesh, 2016).

در این پژوهش، آرسنیک به عنوان آلاینده انتخاب شده است. آرسنیک یک عنصر شیمیایی است که با علامت As شناخته شده و دارای عدد اتمی ۳۳ است. این عنصر معمولاً در مواد معدنی و در مجاورت فلزات و سولفور یافت می شود. مهم ترین استفاده آرسنیک در مقاوم سازی آلیاژهای مس و به خصوص سرب در باتری خودروها است. بعضی از انواع باکتری ها می توانند از آرسنیک به عنوان مولکول های تنفسی استفاده کنند. مقدار کم این عنصر برای حیواناتی مانند موش ها، بزها و حتی انسان ها لازم است. اگرچه این عنصر می تواند در صورت استفاده شدن در مقدار بیش از حد نیاز برای گونه های چند سلولی مانند حیوانات و انسان ها بسیار مضر باشد. حد مجاز آرسنیک در آب های آشامیدنی شهری بر اساس استاندارد ملی ایران مصوب ۱۳۷۶ به مقدار ۵۰ میلی گرم در لیتر بود اما در سال ۱۳۸۸ و با تغییراتی که سازمان جهانی محیط زیست داشت، حد مجاز استاندارد ایران هم به مقدار ۰/۰۱ میلی گرم بر لیتر تقلیل داده شد (Isiri, 2010).

۲-۳- شبیه ساز EPANET

نرم افزار EPANET، یک مدل شبیه ساز هیدرولیکی و کیفی شبکه است که استفاده از آن در پروژه های تحقیقاتی و عملی بسیار متداول است. این مدل به صورت متن باز است و قابلیت اتصال به زبان های برنامه نویسی را دارد. در این نرم افزار از روش گرادیان^۳ برای حل معادلات هیدرولیکی شبکه و از الگوریتم انتقال لاگرانژی^۴ برای حل معادلات کیفی استفاده شد (Rossman, 2000).

۲-۴- خسارت ناشی از ورود آلودگی

همان طور که در بخش مقدمه اشاره شد، اثر آلودگی معمولاً توسط یک شاخص به عنوان تابع هدف در نظر گرفته می شود. در این پژوهش، با توجه به مفهوم حجم آب آلوده مصرفی (Kessler et al., 1998)، خسارت ناشی از ورود و مصرف آلودگی در شرایط عدم وجود حسگر، به صورت مقدار آب آلوده مصرفی تعریف می شود. در

فرایند تحلیل کیفی در شبکه شامل ۳ فرایند انتقال، اختلاط و واکنش های حجمی است. انتقال شامل حرکت در جهت جریان و حرکت در تمام جهات به دلیل اختلاف غلظت است که به کمک قانون بقای جرم و قانون فیک^۱ بیان می شود (Tabesh, 2016)

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -v_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + r(C_i) \quad (4)$$

که در آن

v_i سرعت و C_i غلظت در لوله i ام است که تابعی از مکان (x) و زمان (t) است. همچنین r نرخ واکنش بوده که تابعی از غلظت است.

در فرایند اختلاط، با فرض اختلاط کامل و آبی سیال، غلظت سیال خروجی در گره برابر مجموع وزنی غلظت جریان های ورودی به آن گره است (Tabesh, 2016)

$$C_j = \frac{\sum_{i \in I_j} Q_i C_i + q_j C_{0j}}{\sum_{i \in I_j} Q_i + q_j} \quad (5)$$

که در آن

C_j غلظت در گره j ام و C_{0j} هرگونه غلظت ورودی از خارج از شبکه به گره j ام است.

به عنوان سومین فرایند در تحلیل کیفی، واکنش حجمی تابعی از غلظت ها، نرخ و مرتبه واکنش است و به صورت زیر بیان می شود (Tabesh, 2016)

$$r = BC^{nr} \quad (6)$$

که در آن

B ضریب نرخ واکنش و nr ثابت مرتبه واکنش است. مقدار B برای واکنش تشکیل، مثبت و برای واکنش زوال، منفی خواهد بود.

تحلیل کیفی شبکه شامل حل هم زمان معادلات فوق به همراه معادلات مربوط به اختلاط در مخازن است. لازم به ذکر است برای انجام تحلیل کیفی، ابتدا باید تحلیل هیدرولیکی انجام شود. همچنین به دلیل این که فرایند تحلیل کیفی به زمان وابسته است، لازم است

² Extended Period Simulation (EPS)

³ Gradient Method

⁴ Lagrangian Transport Algorithm

¹ Fick



محتمل آلودگی از ۵ گره و ۱۰ گام زمانی مختلف) عدد ماتریس خسارت باید محاسبه شود

$$M_{s,k} = \begin{bmatrix} m_{1,1,s,k} & \dots & m_{1,n_j,s,k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n_t,1,s,k} & \dots & m_{n_t,n_j,s,k} \end{bmatrix}_{n_t \times n_j} \quad (9)$$

که در آن

$M_{s,k}$ ماتریس خسارت با فرض ورود آلودگی از گره k ام در گام زمانی s ام است. n_t و n_j به ترتیب تعداد کل گره‌های برداشت و گام‌های شبیه‌سازی در شبکه است.

به‌طور کلی مصرف آب آلوده فقط تا قبل از تشخیص توسط حسگرها خواهد بود و پس از آن خسارت صفر می‌شود. به این منظور در این پژوهش از یک ضریب باینری (a) استفاده شد. بنابراین در صورت وجود حسگر کیفی در شبکه، با فرض قطع جریان در صورت تشخیص آلودگی، خسارت به‌صورت زیر اصلاح خواهد شد

$$m'_{t,j,s,k} = a_{t,s,k} \times m_{t,j,s,k} \quad , \quad a_{t,s,k} = \begin{cases} 1 & t \leq \tau_{s,k} \\ 0 & t > \tau_{s,k} \end{cases} \quad (10)$$

که در آن

m' خسارت اصلاح شده بر اساس عملکرد حسگرها است. $\tau_{s,k}$ گام زمانی است که اولین حسگر در شبکه، آلودگی‌ای که از گره k ام در گام زمانی s ام وارد شبکه شده است را تشخیص داده و پس از آن جریان در شبکه قطع می‌شود تا آب آلوده مصرف نشود. $a_{t,s,k}$ پارامتری باینری است که باعث می‌شود خسارت فقط تا قبل از قطع شدن جریان محاسبه شود. بدیهی است مقدار $a_{t,s,k}$ به آرایش حسگرها و مقدار غلظت‌ها بستگی دارد.

همان‌طور که در معادلات قبل مشاهده شد، علاوه بر چیدمان حسگرها، گره و گام زمانی ورود آلودگی به شبکه نیز تأثیر زیادی بر مقدار خسارت دارد. در هر حال، خسارت کل شبکه برابر مجموع خسارت‌ها در همه گره‌ها و همه گام‌های زمانی است

$$G_{s,k} = \sum_{t=1}^{n_t} \sum_{j=1}^{n_j} m'_{t,j,s,k} \quad (11)$$

این راستا، با فرض ورود آلودگی از گره k ام در گام زمانی s ام، خسارت ایجاد شده در گره j ام در گام t ام برابر است با

$$m_{t,j,s,k} = C_{t,j,s,k} \times q_{t,j} \quad (7)$$

که در آن

$m_{t,j,s,k}$ خسارت در گره j ام در گام t ام ناشی از ورود آلودگی از گره k ام در گام زمانی s ام، $C_{t,j,s,k}$ غلظت آلاینده در گره j ام در گام زمانی t ام (با فرض ورود آلودگی از گره k ام در گام زمانی s ام) و $q_{j,t}$ مقدار آب مصرفی (نیاز آبی) در گره j ام در گام زمانی t ام است.

اگر غلظت و نیاز آبی به ترتیب بر حسب میلی‌گرم در لیتر و لیتر در ثانیه بیان شوند، در آن صورت واحد خسارت، میلی‌گرم بر ثانیه شده است که با استفاده از ضریب معرف مدت زمان گام شبیه‌سازی بر حسب ثانیه (ضریب δ)، خسارت ناشی از مصرف آب آلوده بر حسب میلی‌گرم خواهد بود که اگر بر وزن مخصوص آب (10^3 میلی‌گرم بر لیتر) تقسیم شود، به لیتر تبدیل می‌شود که نشان‌دهنده حجم آب آلوده مصرفی بر حسب لیتر است. بنابراین محاسبه خسارت به‌صورت زیر اصلاح می‌شود

$$m_{t,j,s,k} = \frac{\delta}{\rho} C_{t,j,s,k} \times q_{t,j} \quad (8)$$

لازم به ذکر است برای انجام محاسبات واقع‌بینانه، مقدار غلظت که کمتر از مقدار غلظت مجاز است برابر صفر در نظر گرفته شد تا نقشی در محاسبه خسارت نداشته باشند. نکته مهم دیگر این که مصرف آب آلوده فقط تا قبل از تشخیص توسط حسگرها خواهد بود و پس از آن به دلیل قطع جریان در شبکه و عدم مصرف آب، خسارت صفر می‌شود. از سوی دیگر محل حسگرها مشخص نبود و باید در فرایند بهینه‌سازی تعیین شود. بنابراین در این پژوهش قبل از ورود به فرایند بهینه‌سازی، ماتریس‌های خسارت مقدار شدند. منظور از ماتریس خسارت، مقدار خسارت در همه حالت‌های محتمل ورود آلودگی (گره k ام و گام زمانی s ام) است. برای مثال اگر شبکه ۵ گره و ۱۰ گام زمانی داشته باشد، ابعاد هر ماتریس خسارت برابر ۱۰ در ۵ خواهد بود که در کل به تعداد ۵۰ (ورود



که در آن

$G_{s,k}$ خسارت ناشی از مصرف آب آلوده در کل شبکه ناشی از ورود آلودگی از گره k ام در گام زمانی s ام است.

در این پژوهش برای تعیین حداکثر خسارت محتمل (F)، بیشترین (بحرانی‌ترین) مقدار خسارت در میان خسارت‌های ناشی از ورود آلودگی از گره‌ها و گام‌های زمانی مختلف، در نظر گرفته شد

$$F = \max_k (\max_s (G_{s,k})) \quad (12)$$

اکنون محل حسگرها باید به گونه‌ای تعیین شود که F حداقل شود. به عبارت دیگر جانمایی حسگرها باید به نحوی باشد که بدترین خسارت محتمل با فرض عدم قطعیت محل و زمان ورود آلودگی، حداقل شود.

۲-۵- بهینه‌سازی محل حسگرهای کیفی

تهیه حسگرهای کیفی معمولاً پرهزینه است و محل و تعداد آن باید با دقت انتخاب شود. با فرض موجود بودن N عدد حسگر کیفی، محل آن‌ها باید به گونه‌ای باشد که کمترین خسارت ممکن ایجاد شود. به این منظور با توجه به نامشخص بودن گره و زمان ورود آلودگی، لازم است بیشترین خسارت محتمل، حداقل شود. در این راستا، مدل بهینه‌سازی زیر پیشنهاد شد. در این مدل، Z تابع هدف و برابر حداقل‌سازی F (بیشترین خسارت محتمل) است. x_j متغیر تصمیم و به صورت باینری بود که نشان‌دهنده وجود یا عدم وجود حسگر در گره j ام است. X بردار متغیرهای تصمیم مسئله است

$$Z = \min(F) \quad (13)$$

$$X = [x_1 \quad \dots \quad x_j \quad \dots \quad x_{n_j}] \quad (14)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad (15)$$

با توجه به محدودیت تعداد حسگر، قید زیر به صورت تابع جریمه با یک ضریب عددی بزرگ به تابع هدف اضافه شد.

$$\text{Violation} = \begin{cases} 0 & \sum_{j=1}^{n_j} x_j = N \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

که در آن

Violation مقدار تخطی و N تعداد کل حسگر موجود و در دسترس است.

در این پژوهش برای حل مسئله فوق از الگوریتم ژنتیک (Goldberg, 1989) استفاده شد. این الگوریتم آن قدر محل حسگرها را تغییر می‌دهد تا بیشترین خسارت ممکن برای شبکه، حداقل شود. روندنمای کلی روش ارائه شده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۶- الگوریتم ژنتیک

یکی از کارآمدترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی، به ویژه برای مسائل شبکه‌های توزیع آب، الگوریتم ژنتیک است. در این الگوریتم، هر متغیر تصمیم به عنوان یک ژن لحاظ می‌شود و مجموع همه متغیرهای مسأله، یک کروموزوم را تشکیل می‌دهند. ابتدا جمعیت اولیه با تعداد مشخص، تولید شده و هر کدام از اعضای جمعیت که یکی از جواب‌های احتمالی مسئله است، توسط تابع هدف ارزیابی می‌شود. با استفاده از عملگر توزیع، روی بخشی از جمعیت مذکور که تعداد آن‌ها با پارامتر درصد توزیع تعیین می‌شود، فرزندان جدید حاصل می‌شود. ویژگی‌های هر فرزند، ترکیبی از ویژگی‌های والد‌های آن است. برای جلوگیری از به دام افتادن الگوریتم در بهینه محلی، از عملگر جهش استفاده می‌شود. این عملگر، روی درصد مشخصی از جمعیت حاصل از توزیع که تعداد آن با پارامتر درصد جهش تعیین می‌شود اعمال شد و با توجه به پارامتر نرخ جهش، تعدادی از ژن‌های کروموزوم انتخاب شده را به صورت تصادفی تغییر داد تا جواب‌های جدید حاصل شود. این مراحل یک گام حساب می‌شود و به تعداد مشخص شده یا بر اساس شرط توقف مبتنی بر بهبود مقدار تابع هدف، تکرار مراحل فوق ادامه می‌یابد (Goldberg, 1989).

- صحت‌سنجی

در سال ۲۰۰۶، یک رقابت شامل ۱۵ رویکرد مختلف برای جانمایی بهینه حسگرها در امریکا برگزار شد (Ostfeld et al., 2008).

یکی از مراحل این رویداد، جانمایی بهینه ۵ عدد حسگر کیفی



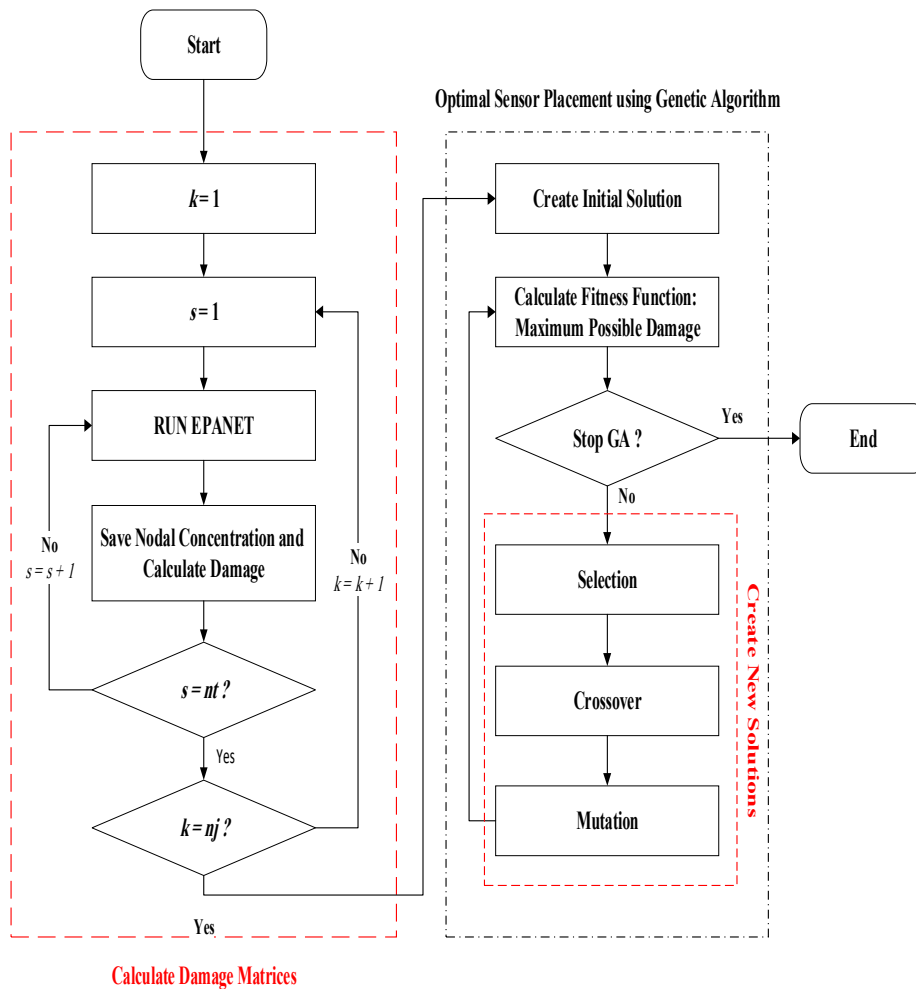


Fig. 1. The flowchart of the presented method

شکل ۱- روندنمای روش ارائه شده

مطالعه موردی

یک شبکه نمونه برای شهری در نواحی مرکزی ایران مطابق شکل ۲ پیشنهاد شده است. در این شکل قطر لوله‌ها بر حسب میلی‌متر و شماره گره‌ها نشان داده شده است. این شبکه، حسگر تشخیص آلودگی ندارد و شامل ۵۳ گره برداشت، ۸۱ لوله و یک مخزن است. الگوی مصرف آب در ۲۴ ساعت، بر اساس نشریه ۳-۱۱۷ (Irivpsps, 2011) در نظر گرفته شد. فرض شد آرسنیک به‌عنوان یک آلاینده خطرناک با غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر ممکن است از گره‌های مختلف و در گام‌های زمانی متفاوت وارد شبکه شده و باعث ایجاد خسارت شود. این شبکه برای ۸ سناریو به شرح ذیل بررسی شد. سناریوی صفر (S0) بدون حسگر بود. در سناریوهای ۱

برای ۱ شبکه نمونه شامل ۱۲۶ گره بود که به روش‌های مختلف بررسی شد. جزئیات مربوط به مثال مربوطه در آن پژوهش موجود است (Ostfeld et al., 2008).

در این پژوهش، جانمایی حسگرها در این شبکه بررسی و نتایج آن همراه با نتایج سایر پژوهشگران در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج به‌دست آمده در هیچ دو روشی مانند هم نیست. ولی برخی گره‌ها در تعداد بیشتری روش، انتخاب شده‌اند.

برای نمونه گره‌های ۸۳، ۱۲۶، ۱۱۲ و ۱۲۳ که از روش ارائه شده در این پژوهش به‌دست آمده‌اند، به ترتیب ۵، ۳، ۱، ۱ بار در سایر پژوهش‌ها نیز پیشنهاد شده بودند.



جدول ۱- نتایج صحت‌سنجی
Table 1. Validation results

Sensor placement method	Selected nodes
Present Study	83 – 99 – 112 – 123 – 126
Reference 1 (Berry et al., 2006)	17 – 21 – 68 – 79 - 122
Reference 2 (Dorini et al., 2006)	10 – 31 – 45 – 83 – 118
Reference 3 (Eliades et al., 2006)	17 – 31 – 45 – 83 – 126
Reference 4 (Ghimire Santosh et al., 2006a)	126 – 30 – 118 – 102 – 34
Reference 5 (Ghimire Santosh et al., 2006b)	126 – 30 – 102 – 118 – 58
Reference 6 (Guan et al., 2006)	17 – 31 – 81 – 98 – 102
Reference 7 (Gueli, 2006)	112 – 118 – 109 – 100 – 84
Reference 8 (Huang Jinhui et al., 2006)	68 – 81 – 82 – 97 – 118
Reference 9 (Krause et al., 2006)	17 – 83 – 122 – 31 – 45
Reference 10 (Ostfeld et al., 2006)	117 – 71 – 98 – 68 – 82
Reference 11 (Preis et al., 2006)	68 – 101 – 116 – 22 – 46
Reference 12 (Propato et al., 2006)	17 – 22 – 68 – 83 – 123
Reference 13 (Trachtman Gary, 2006)	1 – 29 – 102 – 30 – 20
Reference 14 (Wu Zheng et al., 2006)	45 – 68 – 83 – 100 - 118

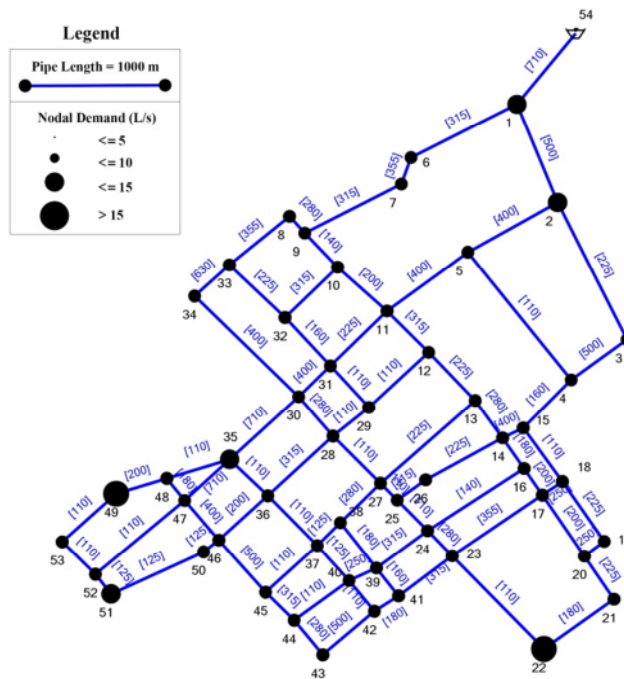


Fig. 2. Case study network
شکل ۲- شبکه مورد مطالعاتی



در سناریوی S2، کاهش ۷۸ درصدی خسارت را نسبت به حالت بدون حسگر نشان می‌دهد. به‌طور کلی هر چقدر تعداد حسگر موجود بیشتر باشد، با جانمایی بهینه، خسارت ناشی از مصرف آب آلوده کمتر می‌شود. با ترسیم مقدار خسارت در مقابل تعداد حسگر موجود که در شکل ۳ نشان داده شده است، مشاهده می‌شود این کاهش خسارت، وقتی تعداد حسگر کمتر باشد، شیب بیشتری داشته و در مقابل وقتی تعداد حسگرهای موجود از حدی بیشتر شود، خسارت با شیب خیلی کمتری کاهش می‌یابد.

بررسی محل قرارگیری حسگرها در سناریوهای مختلف (شکل ۴) نشان می‌دهد که جانمایی حسگرها بسیار متنوع است و الزاماً در همه سناریوها مشابه نخواهد شد. هر چند به‌نظر رسید بعضی گره‌ها مثل گره ۱۱، نقشی حیاتی در شبکه دارد. زیرا در ۵ سناریوی مختلف به‌عنوان محل بهینه برای نصب یکی از حسگرها پیشنهاد شد. در هر حال مشاهده می‌شود در راستای کاهش بیشترین خسارت محتمل، محل‌های پیشنهادی برای حسگرها به‌خوبی در کل شهر توزیع شده است.

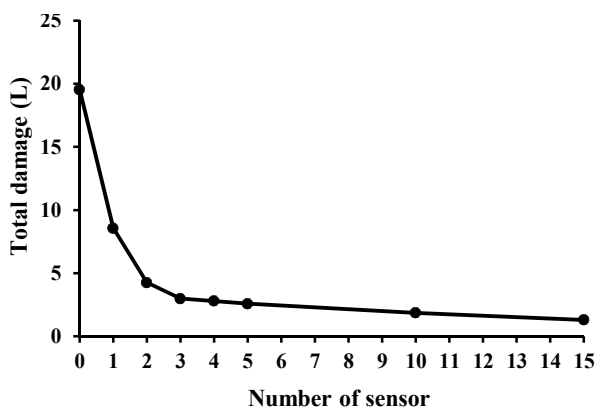


Fig. 3. Total network damage (the objective function) with respect to number of available sensors

شکل ۳- خسارت کل شبکه (مقدار تابع هدف) نسبت به تعداد حسگرهای موجود

یکی دیگر از نتایج مهم قابل‌بحث در شبکه مورد مطالعاتی، بررسی بحرانی‌ترین محل و گام زمانی ورود آلودگی به شبکه است. به‌طوری که بیشترین خسارت محتمل را ایجاد کند. نتایج اغلب سناریوها نشان می‌دهد که اگر آلودگی در گام زمانی ۱۹، که دقیقاً قبل از پیک مصرف ساعت ۲۰ هست، وارد شبکه شود، بیشترین خسارت را ایجاد می‌کند.

تا ۵ (S1-S5) به‌ترتیب ۱ تا ۵ حسگر موجود است. سناریوی ۶ (S6) شامل ۱۰ حسگر و سناریوی ۷ (S7)، ۱۵ حسگر دارد. به‌این منظور از مدل ارائه شده در این پژوهش استفاده شده تا محل بهینه حسگرهای کیفی مشخص شوند.

پارامترهای بهینه‌سازی شامل تعداد جمعیت ۱۰۰ عدد، نرخ توزیع ۸۰ درصد، نوع انتخاب چرخ رولت، نرخ جهش ۳۰ درصد و درصد جهش ۲ درصد انتخاب شد. هر چند با توجه به کم بودن فضای جست و جوی مسئله، الگوریتم حساسیت قابل توجهی به پارامترهای مذکور نشان نمی‌دهد. برای مثال در سناریوی ۱ که فقط ۱ حسگر موجود است، فضای جست‌وجوی مسئله فقط شامل ۵۳ حالت (تعداد گره‌های شبکه) است. لازم به ذکر است در این مثال فرضیات زیر در نظر گرفته شد:

- شبیه‌سازی هیدرولیکی با گام ۱ ساعت و شبیه‌سازی کیفی با گام ۱۵ دقیقه انجام شد.
- امکان نصب حسگر در همه گره‌های برداشت در شبکه وجود داشت.
- احتمال ورود آلودگی از همه گره‌های برداشت در شبکه وجود داشت.
- کل مدت شبیه‌سازی، ۲ روز در نظر گرفته شده که احتمال ورود آلودگی فقط در روز اول بود.
- تزریق آلودگی در راس ساعت یکی از ساعات شبانه‌روز نامشخص شروع شد و به مدت ۱ ساعت ادامه داشت.
- تزریق آلودگی فقط از ۱ گره نامشخص انجام شد و احتمال تزریق هم‌زمان از چند گره وجود نداشت.
- از اثر واکنش کلر موجود در آب با آرسنیک تزریق شده، صرف نظر شد.

۳- نتایج و بحث

نتایج تحلیل هر ۸ سناریوی بهینه‌سازی در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. شکل ۳، مقدار بهینه شده برای حداکثر خسارت محتمل (Z) را نسبت به تعداد حسگر موجود نشان می‌دهد. نتایج نشان داد بیشترین خسارت محتمل وقتی هیچ حسگری در شبکه نباشد، به مقدار ۱۹/۵۴ لیتر است. در صورتی که اضافه کردن یک حسگر در محل بهینه (سناریوی S1) می‌تواند تا ۵۶ درصد مقدار خسارت را کاهش دهد و به عدد ۸/۵۶ برسد. بررسی جانمایی بهینه ۲ حسگر

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، روشی برای جانمایی بهینه تعداد مشخصی حسگر کیفی در شبکه‌های توزیع آب ارائه شد. در این راستا، با در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به محل و گام زمانی ورود آلودگی به شبکه، از ماتریس‌های خسارت برای محاسبه بیشترین خسارت محتمل، بهره گرفته شد. مدل اصلی برای جانمایی حسگرها، ۱ بهینه‌ساز مبتنی بر الگوریتم ژنتیک بود که برای حداقل‌سازی «بیشترین خسارت محتمل» استفاده شد. این مدل قابلیت استفاده برای هر شبکه دلخواه را دارد. یک شبکه نمونه به‌عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شد و نتایج آن در ۸ سناریو بررسی شد. نتایج نشان داد وجود حتی ۱ یا ۲ حسگر کیفی (به ترتیب ۱/۸۹ و ۳/۷۷ درصد تعداد گره‌های شبکه)، به ترتیب می‌تواند تا ۵۶ و ۷۸ درصد خسارت ناشی از ورود آلودگی به شبکه را کاهش دهد. در کل توصیه می‌شود به‌منظور کاهش خسارت ناشی از مصرف آب آلوده، حتماً از حسگر کیفی استفاده شود. در این راستا، مدل ارائه شده در این پژوهش به‌خوبی توانست محل بهینه تعداد مشخصی حسگر را تعیین کند. مطالعه و بررسی سایر عدم قطعیت‌های موجود در مسئله جانمایی حسگرهای کیفی مثل نوع آلاینده و مدت زمان تزریق آلودگی برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود.

۵- قدردانی

از سردبیر گرامی و داوران محترم که نظرات ارزنده آنها باعث غنای پژوهش حاضر شد، قدردانی می‌شود.

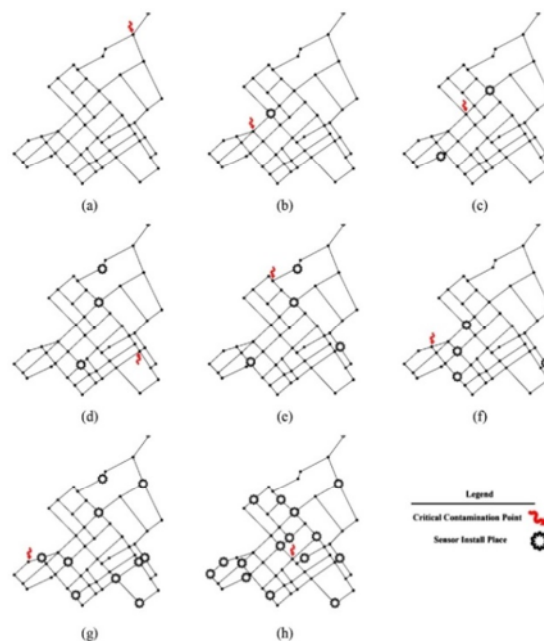


Fig. 4. Optimal sensor placement and critical contamination point in different scenarios; a) S0, b) S1, c) S2, d) S3, e) S4, f) S5, g) S6 and h) S7

شکل ۴- جانمایی بهینه حسگرها و محل بحرانی ورود آلودگی در سناریوهای مختلف: a) S0, b) S1, c) S2, d) S3, e) S4, f) S5, g) S6, h) S7

البته گره ورودی بحرانی در شرایط مختلف جانمایی حسگرها متفاوت بوده و نمی‌توان بحرانی‌ترین گره را به‌صورت مطلق تعیین کرد. در این پژوهش، جانمایی بهینه تعداد مشخصی حسگر به‌صورت سناریوهای مختلف بررسی شد. در عمل برای تعیین تعداد بهینه حسگر، علاوه بر مقدار خسارت، سایر محدودیت‌های اقتصادی و بهره‌برداری نیز باید در نظر گرفته شود.

References

- 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, 985-1000.
- Berry J. W., Hart William, E., Phillips Cindy, A. & Watson, J. P. 2008. A facility location approach to sensor placement optimization. *Water Distribution Systems Analysis Symposium*, 1-4.
- Berry, J. W., Hart, William. E., Phillips, C. A., Uber, J. G. & Walski, T. M. 2005. Water quality sensor placement in water networks with budget constraints. *Impacts of Global Climate Change*. Anchorage, AK., 1-11.
- Carr, R. D., Greenberg, H. J., Hart, W. E., Konjevod, G., Lauer, E., Lin, H., et al. 2006. Robust optimization of contaminant sensor placement for community water systems. *Mathematical Programming*, 107, 337-356.
- Chang, N.-B., Pongsanone, N. P. & Ernest, A. 2011. Comparisons between a rule-based expert system and optimization models for sensor deployment in a small drinking water network. *Expert Systems with Applications*, 38, 10685-10695.
- 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*, 29-30, 28-37.



- Ciaponi, C., Creaco, E., Di Nardo, A., Di Natale, M., Giudicianni, C., Musmarra, D., et al. 2019. Reducing impacts of contamination in water distribution networks: a combined strategy based on network partitioning and installation of water quality sensors. *Water*, 11, 1315.
- Cozzolino, L., Morte, R. D., Palumbo, A. & Pianese, D. 2011. Stochastic approaches for sensors placement against intentional contaminations in water distribution systems. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 28, 75-98.
- Diao, K. & Rauch, W. 2013. Controllability analysis as a pre-selection method for sensor placement in water distribution systems. *Water Research*, 47, 6097-6108.
- Dorini, G., Jonkergouw, P., Kapelan, Z., Di Piero, F., Khu, S. T. & Savic, D. 2008. An efficient algorithm for sensor placement in water distribution systems. *Water Distribution Systems Analysis Symposium*, 1-13.
- Eliades, D. & Polycarpou, M. 2008. Iterative deepening of pareto solutions in water sensor networks. *Water Distribution Systems Analysis Symposium*, 1-19.
- Ghimire Santosh, R. & Barkdoll Brian, D. 2008a. Heuristic method for the battle of the water network sensors: demand based approach. *Water Distribution Systems Analysis Symposium*, 1-11.
- Ghimire Santosh, R. & Barkdoll Brian, D. 2008b. A heuristic method for water quality sensor location in a municipal water distribution system: mass-released based approach. *Water Distribution Systems Analysis Symposium*, 1-11.
- Goldberg, D. E. 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Longman, Menlo Park, CA.
- Guan, J., Aral Mustafa, M., Maslia Morris, L. & Grayman Walter, M. 2008. Optimization model and algorithms for design of water sensor placement in water distribution systems. *Water Distribution Systems Analysis Symposium*, 1-16.
- Gueli, R. 2008. Predator - prey model for discrete sensor placement. *Water Distribution Systems Analysis Symposium*, 1-9.
- He, G., Zhang, T., Zheng, F. & Zhang, Q. 2018. An efficient multi-objective optimization method for water quality sensor placement within water distribution systems considering contamination probability variations. *Water Research*, 143, 165-175.
- Hooshmand, F., Amerehi, F. & Mirhassani, S. A. 2020. Logic-based benders decomposition algorithm for contamination detection problem in water networks. *Computers and Operations Research*, 115, 104840.
- Hu, C., Dai, L., Yan, X., Gong, W., Liu, X. & Wang, L. 2020. Modified NSGA-III for sensor placement in water distribution system. *Information Sciences*, 509, 488-500.
- Hu, C., Li, M., Zeng, D. & Guo, S. 2016. A survey on sensor placement for contamination detection in water distribution systems. *Wireless Networks*, 24, 647-661.
- Huang Jinhui, J., Mcbean Edward, A. & James, W. 2008. Multi-objective optimization for monitoring sensor placement in water distribution systems. *Water Distribution Systems Analysis Symposium*, 1-14.
- Irivpsps 2011. *Guidelines for design of urban and rural water supply and distribution systems, Report No. 117-3 (First Revision)*, Islamic Republic of Iran Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision Press, Iran. (In Persian).
- Isiri 2010. *Drinking water - Physical and chemical specifications, Standard No. 1053 (Fifth Revision)*, Institute of Standards and Industrial Research of Iran Press, Iran. (In Persian).
- Kessler, A., Ostfeld, A. & Sinai, G. 1998. Detecting accidental contaminations in municipal water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 124, 192-198.
- Krause, A., Leskovec, J., Guestrin, C., Vanbriesen, J. & Faloutsos, C. 2008. Efficient sensor placement optimization for securing large water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134, 516-526.
- Krause, A., Leskovec, J., Isovitsch, S., Xu, J., Guestrin, C., Vanbriesen, J., et al. 2008. Optimizing sensor placements in water distribution systems using submodular function maximization. *Water Distribution Systems Analysis Symposium*, 1-17.



- Langowski, R., Brdys, M. A. & Qi, R. 2012. Optimised robust placement of hard quality sensors for robust monitoring of quality in drinking water distribution systems. *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 1109-1114.
- Liu, S. & Auckenthaler, P. 2013. Optimal sensor placement for event detection and source identification in water distribution networks. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 63, 51-57.
- Ma, X., Song, Y., Huang, J. & Wu, J. Robust sensor placement problem in municipal water networks. 2010. *Third International Joint Conference on Computational Science and Optimization*, 291-294.
- Ostfeld, A. & Salomons, E. 2008. Sensor network design proposal for the battle of the water sensor networks (BWSN). *Water Distribution Systems Analysis Symposium*, 1-16.
- Ostfeld, A., Uber, J. G., Salomons, E., Berry, J. W., Hart, W. E., Phillips, C. A., et al. 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.
- Preis, A. & Ostfeld, A. 2008. Multiobjective sensor design for water distribution systems security. *Water Distribution Systems Analysis Symposium*, 1-17.
- Propato, M. & Piller, O. 2008. Battle of the water sensor networks. *Water Distribution Systems Analysis Symposium*, 1-16.
- Rico-Ramirez, V., Frausto-Hernandez, S., Diwekar, U. M. & Hernandez-Castro, S. 2007. Water networks security: A two-stage mixed-integer stochastic program for sensor placement under uncertainty. *Computers and Chemical Engineering*, 31, 565-573.
- Rossmann, L. A. 2000. *EPANET 2 user's manual*, United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, USA.
- Shen, H. & Mcbean, E. 2011. Diminishing marginal returns for sensor networks in a water distribution system. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 60, 286-293.
- Tabesh, M. 2016. *Advanced modeling of water distribution networks*, University of Tehran Press, Tehran, Iran. (In Persian).
- Tabesh, M., Azadi, B. & Roozbahani, A. 2011. Quality management of water distribution networks by optimizing dosage and location of chlorine injection. *International Journal of Environmental Research*, 5, 321-332.
- Trachtman, G. B. 2008. A "strawman" common sense approach for water quality sensor site selection. *Water Distribution Systems Analysis Symposium*, Cincinnati, OH, 1-13.
- Watson, J.-P., Murray, R. & Hart William, E. 2009. Formulation and optimization of robust sensor placement problems for drinking water contamination warning systems. *Journal of Infrastructure Systems*, 15, 330-339.
- Weickgenannt, M., Kapelan, Z., Blokker, M. & Savic, D. A. 2010. Risk-based sensor placement for contaminant detection in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136, 629-636.
- Winter, C. D., Palleti, V. R., Worm, D. & Kooij, R. 2019. Optimal placement of imperfect water quality sensors in water distribution networks. *Computers and Chemical Engineering*, 121, 200-211.
- Wu Zheng, Y. & Walski, T. 2008. Multi-objective optimization of sensor placement in water distribution systems. *Water Distribution Systems Analysis Symposium*, 1-11.
- 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, 378-385.
- Xu, J., Johnson, M. P., Fischbeck, P. S., Small, M. J. & Vanbriesen, J. M. 2010. Robust placement of sensors in dynamic water distribution systems. *European Journal of Operational Research*, 202, 707-716.

