

# Determining the Contamination Source in Water Distribution Networks Using Genetic Algorithm

S. Khalili<sup>1</sup>, M. Tabesh<sup>2</sup>, E. Ghaemi<sup>3</sup>

1. MSc Graduate, Dept. of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2. Prof., School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran  
(Corresponding Author) mtabesh@ut.ac.ir
3. PhD Candidate, Dept. of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received Oct. 26, 2019 Accepted Sep. 1, 2020)

#### To cite this article:

Khalili, S., Tabesh, M., Ghaemi, E. 2021. "Determining the contamination source in water distribution networks using genetic algorithm" Journal of Water and Wastewater, 32(1), 125-135.  
Doi: 10.22093/wwj.2020.206667.2942. (In Persian)

## Abstract

Contamination of drinking water is known as a major threat of water security around the world. As contamination enters a water distribution network, it spreads rapidly into the network and poses health and safety risks to the community. Using a set of sensors to report the concentration of chlorine or any other chemical, useful observations can be made to detect, identify and manage pollution. Based on these observations, location, concentration and start time of contamination can be determined and decision makers can be informed. In this paper, a simulation-optimization approach is used to solve the problem of contamination source characterization in which the EPANET software is used as a simulator and the Genetic Algorithm is used as an optimizer. The model developed in this paper is implemented on EPANET example 3. Modeling of water distribution networks uses information as input data which can cause error in model simulation. Pipe roughness and chlorine deterioration rate are among these inputs. The model has been implemented to find the location, start time and concentration of inlet pollution and the effect of pipe roughness and chlorine deterioration rate on the model responses have been investigated. The pollution entry scenario is applied to the network and the model presented is accurate in finding the location and time of the contamination. As the variables increase, the model accurately estimates the location and time of entry of the contamination but does not have complete accuracy in estimating the concentration of contamination, which is calculated with standard deviation of  $\sigma = 4.8\% - 8.1\%$ .

**Keywords:** Contamination, Water Distribution Networks, Genetic Algorithm, Hydraulic Simulation Method, Pipe Roughness, Chlorine Deterioration Rate.

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۲، شماره ۱، صفحه: ۱۳۵-۱۲۵

## تعیین مشخصات منبع آلودگی در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک

سجاد خلیلی<sup>۱</sup>، مسعود تابش<sup>۲</sup>، الهام قائمی<sup>۳</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب، دانشکده مهندسی عمران،

پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی،

دانشگاه تهران، تهران، ایران

(نویسنده مسئول) mtabesh@ut.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران- محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران،

پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت ۹۸/۸/۴ پذیرش ۹۹/۶/۱۱)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

خلیلی، س.، تابش، م.، قائمی، ا.، ۱۴۰۰، "تعیین مشخصات منبع آلودگی در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک"

مجله آب و فاضلاب، ۳۲(۱)، ۱۳۵-۱۲۵. Doi: 10.22093/wwj.2020.206667.2942

### چکیده

آلوده شدن آب آشامیدنی به‌عنوان یک تهدید برای امنیت آب در سراسر جهان شناخته می‌شود. در شبکه‌های توزیع آب، آلودگی پس از ورود به شبکه به‌سرعت گسترش یافته و خطرات بهداشتی و جانی برای جامعه ایجاد می‌کند. با استفاده از مجموعه‌ای از حسگرها که غلظت کلر یا هر ماده شیمیایی دیگر را گزارش دهند، می‌توان مشاهدات مفیدی برای تشخیص، شناسایی و مدیریت آلودگی ارائه داد. از جمله بر اساس این مشاهدات می‌توان محل، زمان و غلظت آلودگی ورودی به شبکه را تعیین و به تصمیم‌گیرندگان اعلام کرد. در این پژوهش برای حل مسئله تعیین مشخصات منبع آلودگی، از یک رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی استفاده می‌شود که در آن نرم‌افزار شبیه‌سازی شبکه‌های آب تحت فشار EPANET به‌عنوان شبیه‌ساز و الگوریتم ژنتیک به‌عنوان بهینه‌ساز به‌کار رفته است. مدل توسعه‌یافته در این پژوهش، بر روی EPANET Example 3 اجرا شد. در مدل‌سازی شبکه‌های توزیع آب از اطلاعاتی به‌عنوان داده‌های ورودی استفاده شد که می‌تواند سبب بروز خطا در شبیه‌سازی مدل شوند. زبری لوله‌ها و نرخ زوال کلر از جمله این ورودی‌ها هستند. مدل برای پیدا کردن مکان، زمان و غلظت آلودگی ورودی اجرا شده و تأثیر زبری لوله‌ها و نرخ زوال کلر بر جواب‌های مدل بررسی شده است. سناریوی ورود آلودگی بر روی شبکه اعمال شده و مدل ارائه شده در پیدا کردن مکان و زمان آلودگی کاملاً دقیق است. با افزایش متغیرها، مدل مکان و زمان ورود آلودگی را به‌دروستی ارزیابی کرده، اما در ارزیابی غلظت آلودگی دقت کامل را ندارد و غلظت آلودگی با انحراف از معیار  $\sigma = 4/8 - 8/1$  محاسبه می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** آلودگی، شبکه‌های توزیع آب، الگوریتم ژنتیک، تحلیل هیدرولیکی، زبری لوله‌ها، نرخ زوال کلر

### ۱- مقدمه

پیچیده از لوله‌ها، پمپ‌ها و مخازن ذخیره‌سازی هستند که آب تصفیه‌شده، سالم و با کیفیت بالا را برای مصرف‌کنندگان در سراسر جهان مهیا می‌کنند (Tabesh, 2016).

هدف اولیه از شبکه‌های توزیع آب شهری، ارائه آب به مصرف‌کنندگان خانگی، تجاری و صنعتی با کیفیت استاندارد و با فشار مناسب است. شبکه‌های توزیع آب شامل مجموعه‌ای

رویکرد بهینه‌سازی - شبیه‌سازی را با رگرسیون منطقی<sup>5</sup> و یک روش بهبود محلی<sup>6</sup> برای سرعت بخشیدن در همگرایی را ادغام کرده و مسئله را به سرعت حل می‌کند. متغیرهای تصمیم این مسئله شامل محل منبع آلودگی، زمان شروع تزریق و سابقه مربوط به بارگذاری جرمی در هر زمان پس از اولین تشخیص آلودگی بود (Liu et al., 2012).

هو و همکاران پیدا کردن مکان ورود آلودگی را هدف قرار داده و برای حل مسئله از رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی استفاده کردند که از EPANET به عنوان شبیه‌ساز و از GA طاقچه‌ای موازی مبتنی بر کاهش نقشه<sup>7</sup> به عنوان بهینه‌ساز استفاده شده که نه تنها قادر به دستیابی به دقت زیادی در شناسایی منبع آلودگی است بلکه قادر به جستجوی محدوده منبع آلودگی برای بهبود عملکرد نیز است (Hu et al., 2015).

ژوسانگ و همکاران برای حل مسئله تعیین مشخصات منبع ورود آلودگی به شبکه‌های آب، میزان تقاضای آب را غیرقطعی، ولی زمان شروع تزریق و مدت زمان آن را معلوم فرض کرده و مکان و غلظت ورود آلودگی را به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفتند. آنها برای پیدا کردن منبع احتمالی آلودگی از کمینه کردن بیشینه مربع تفاضلات، بین غلظت شبیه‌سازی شده و غلظت واقعی استفاده کردند. برای شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار EPANET و برای بهینه‌سازی از GA استفاده کرده و توانستند مکان و غلظت آلودگی ورودی را حدس بزنند (Xuesong et al., 2017).

وراچیمیس و همکاران با تغییر در محدوده مورد نظارت هر حسگر در شبکه به تعیین مکان ورود آلودگی پرداختند. در نواحی مشکوک به وجود آلودگی، با استفاده از باز و بسته کردن شیرها یا تغییر در شیرهای تنظیم فشار جریان را به مسیری از پیش تعیین شده هدایت کرده تا مورد نظارت حسگر قرار گیرد. از این طریق نواحی نظارت شده حسگرها افزایش یافته که باعث تعیین سریع‌تر مکان آلودگی و همچنین کاهش تأثیر آلودگی بر شبکه آب می‌شود (Vrachimis et al., 2020).

در شبیه‌سازی شبکه‌های توزیع آب پارامترهای ورودی برای مدل می‌توانند به دو گروه پارامترهای هیدرولیکی و پارامترهای

شبکه‌های توزیع آب در مقابل طیف گسترده‌ای از تهدیدها آسیب‌پذیر بوده که این تهدیدها می‌توانند امنیت آبی شبکه را کاهش داده و باعث نارضایتی و یا حتی آسیب رساندن به مصرف‌کنندگان شوند. برای مقابله با این آلودگی‌ها ابتدا باید وجود آلودگی در شبکه تشخیص داده شود. سپس با پیدا کردن محل ورود آلودگی از ادامه یافتن تزریق جلوگیری شده و در نهایت با مدیریت صحیح و انتخاب تمهیدات مناسب، قسمت آلوده شده شبکه برای خدمت‌رسانی آماده بازیابی شود (USEPA, 2003).

در هر یک از سه گام ذکر شده باید مدل و الگویی برای حل مسئله ارائه شود. این پژوهش در پی یافتن هم‌زمان مکان، زمان و غلظت آلودگی ورودی به شبکه بوده و همچنین تأثیر زبری لوله‌ها و نرخ زوال کلر بر جواب‌های مسئله را بررسی می‌کند.

وانکایالا و همکاران با وارد کردن آلودگی از یک منبع آلودگی دلخواه در شبکه و شبیه‌سازی مشاهدات در گره‌های دارای حسگر با رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی که در آن نرم‌افزار EPANET به عنوان شبیه‌ساز و الگوریتم ژنتیک<sup>1</sup> به عنوان بهینه‌ساز عمل می‌کند، به پیدا کردن مکان و غلظت آلودگی پرداختند. آنها عدم قطعیت میزان تقاضای گرهی که دارای طبیعت اتفاقی و متغیر است را با استفاده از مدل گوس<sup>2</sup> و رگرسیون خودکار<sup>3</sup> در مدل اعمال کردند. مدل آنها توانست مکان و غلظت ورود آلودگی را تخمین بزند (Vankayala et al., 2009).

کومار و همکاران برای حل مسئله شناسایی منبع آلودگی از یک روش مبتنی بر شبیه‌سازی - بهینه‌سازی استفاده کردند و برای سنجش تأثیر کیفیت و کمیت داده‌ها بر روی دقت و صحت روش، از تعیین حدود آستانه تشخیص مختلف 0/1، 0/1، 0/2 میلی‌گرم بر لیتر برای حسگرها استفاده کردند. آنها از روش جستجوی استراتژی تکاملی مشترک طاقچه‌ای<sup>4</sup> برای حل مدل استفاده کردند. در این مدل مکان، زمان شروع و الگوی تزریق به عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شد (Kumar et al., 2012).

لیو و همکاران یک روش ترکیبی در زمان واقعی برای تعیین مشخصات منبع آلودگی معرفی کردند. این روش جدید، یک

<sup>1</sup> Genetic Algorithm (GA)

<sup>2</sup> Gaussian Model

<sup>3</sup> Auto Regressive

<sup>4</sup> Niched Co-Evolution Strategies (NCES)

<sup>5</sup> Logistic Regression (LR)

<sup>6</sup> Local Improvement

<sup>7</sup> MapReduce based Parallel Niche Genetic Algorithm (MR-PNGA)

تحلیل سیستم‌های توزیع آب استفاده شود (Rossman, 2000).

## ۲-۲- جعبه‌ابزار EPANET<sup>۴</sup>

جعبه‌ابزار نرم‌افزار EPANET مجموعه‌ای از توابع است که تحلیل شبکه‌های توزیع آب را با استفاده از برنامه‌نویسی کامپیوتری، تسهیل می‌کند. این توابع می‌تواند برای خواندن اطلاعات یک فایل شبکه توزیع آب، تغییر مشخصات مولفه‌های مختلف مانند قطر، طول، دبی تقاضا و الگوی مصرف، اجرای تحلیل‌های متعدد هیدرولیکی و کیفی، گرفتن نتایج خروجی گزینش شده و نوشتن فایل گزارش با فرمت معین استفاده شوند. این جعبه‌ابزار، به خصوص برای توسعه برنامه‌هایی مانند مدل‌های بهینه‌سازی که نیازمند اجراهای متعدد تحلیل شبکه با تغییر پارامترهای ورودی هستند، بسیار کارآمد است (Rossman, 2000).

در این پژوهش به منظور مدل‌سازی واقع‌بینانه‌تر، شبکه به صورت وابسته به فشار نیز مدل شده است. این مدل‌سازی با استفاده از کدنویسی در محیط MATLAB و اتصال آن به شبیه‌ساز هیدرولیکی EPANET 2.0 با استفاده از جعبه‌ابزار EPANET انجام شد.

برای تحلیل هیدرولیکی شبکه مبتنی بر فشار<sup>۵</sup> لازم است در معادله پیوستگی به جای در نظر گرفتن دبی ثابت خروجی، ارتباط میزان دبی خروجی با فشار را جایگزین کرد. برای بیان ارتباط بین فشار و دبی خروجی در گره‌ها، با توجه به پژوهش‌های تابش و همکاران و شیرزاد و همکاران از معادله وانگر و همکاران استفاده شد (Tabesh et al., 2002, Shirzad et al., 2013, Wagner et al., 1988).

از آنجا که شبیه‌ساز EPANET از روش گرادیان برای حل معادلات هیدرولیکی استفاده می‌کند، به این منظور از شبیه‌ساز EPANET و قابلیت Emitter در این نرم‌افزار، استفاده شد.

## ۲-۳- تأثیر تغییر پارامترهای ورودی بر نتایج

زبری لوله‌ها، نرخ زوال کلر و میزان تقاضای آب از جمله ورودی‌هایی هستند که می‌توانند سبب بروز خطا در شبیه‌سازی مدل شوند. مدل کردن تقاضای متغیر آب نیازمند تحلیل عدم قطعیت

کیفیت آب تقسیم شوند. پارامترهای ورودی برای مدل هیدرولیکی، تقاضای گره، قطر لوله، طول لوله و زبری لوله هستند (Pérez et al., 2015).

داده‌های موجود برای این پارامترها می‌توانند دقیق و منطبق با واقعیت نباشند و سبب بروز عدم قطعیت و تأثیر بر نتایج مدل شوند. یکی از اطلاعات ورودی در شبکه‌های توزیع آب، میزان تقاضای آب مصرف‌کنندگان است که به دلیل ثابت فرض شدن باعث ایجاد عدم قطعیت می‌شود (Cristo and Leopardi, 2008).

پارامترهای ورودی برای مدل کیفیت آب، ضریب زوال کلی حجمی<sup>۱</sup> و ضریب زوال کلی جدار لوله<sup>۲</sup> هستند. پاشا و لانسای برای تجزیه و تحلیل تأثیر عوامل مختلف در ایجاد عدم قطعیت در شبکه‌های توزیع آب از شبیه‌سازی مونت کارلو<sup>۳</sup> استفاده کردند (Pasha and Lansey, 2011).

در این پژوهش برای حل مسئله شناسایی محل، زمان ورود و غلظت آلودگی ورودی به شبکه آب، یک رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی انتخاب شده که در آن از نرم‌افزار EPANET به عنوان شبیه‌ساز و GA به عنوان بهینه‌ساز استفاده شده است. نرم‌افزار EPANET بر اساس پژوهش‌های ظفری و تابش و همکاران اصلاح شد تا شبکه به صورت مبتنی بر فشار تحلیل هیدرولیکی را انجام دهد (Zafari, 2015, Tabesh et al., 2014).

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- نرم‌افزار EPANET

EPANET یک برنامه کامپیوتری است که رفتار هیدرولیکی و کیفی آب را در شبکه‌های لوله تحت فشار و به صورت دوره زمانی گسترده شبیه‌سازی می‌کند. شبکه از اجزایی مانند لوله، گره (محل اتصال لوله‌ها)، پمپ، شیرآلات و تانک‌های ذخیره یا مخازن تشکیل شده است. 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. EPANET به عنوان یک ابزار پژوهشی با هدف ارتقای درک پژوهشگران از حرکت و سرانجام آب در شبکه‌های توزیع آب، طراحی شده است. این برنامه می‌تواند برای کاربردهای مختلفی در

<sup>1</sup> Global Bulk Coefficient

<sup>2</sup> Global Wall Coefficient

<sup>3</sup> Monte Carlo Simulation (MCS)

<sup>4</sup> EPANET Toolkit

<sup>5</sup> Head Driven Simulation Method (HDSM)

بوده که موضوع این پژوهش نیست. از این رو تأثیر زبری لوله‌ها و نرخ زوال کلر بر جواب‌های مسئله بررسی خواهد شد. با دسترسی محدود به داده‌ها برای تنظیم و شبیه‌سازی مدل و کمبود اطلاعات مربوط به میزان زبری لوله‌ها و نرخ زوال کلر، می‌توان بین یک شبکه مدل‌سازی شده و شبکه توزیع آب واقعی انتظار وجود خطا داشت. این خطاها می‌توانند در شبیه‌سازی جریان، محاسبه سرعت در لوله‌ها و غلظت قرائت شده در حسگرها رخ دهند. خطا در شبیه‌سازی جریان می‌تواند بر روی مجموعه‌ای از گره‌های بالادست که ممکن است گره تزریق واقعی در میان آنها باشد، تأثیر بگذارد. محاسبه اشتباه سرعت جریان در لوله می‌تواند باعث جابه‌جایی زمانی در محاسبه زمان ورود آلودگی به شبکه شود. در این پژوهش تأثیر تغییر زبری لوله‌ها و نرخ زوال کلر به‌عنوان پارامترهای ورودی بر نتایج نیز بررسی شد.

#### ۲-۴- GA

یکی از الگوریتم‌های تکاملی، GA است که تا به حال بیش از سایر روش‌های بهینه‌سازی در مسائل مربوط به شبکه‌های توزیع آب به‌کار گرفته شده و با توجه به پژوهش‌های پیشین، این الگوریتم نسبت به سایر رویکردها پاسخ‌های دقیق‌تری برای مسئله ارائه می‌دهد. GA اجازه می‌دهد که جمعیتی متشکل از تعداد زیادی افراد<sup>۱</sup> که تحت قوانین انتخاب و ویژه‌ای تشکیل شده‌اند، در طی فرایند تکامل، تابع برازش را برای یافتن جواب‌های بهینه عمومی حل کنند. این الگوریتم برای اولین بار توسط هالند معرفی شد و سپس توسط گلدبرگ تکمیل شد (Holland, 1975, Goldberg, 1989).

در GA ابتدا به‌طور تصادفی چندین جواب برای مسئله تولید شده است که جمعیت اولیه نام دارد و هر جواب یک کروموزوم<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. به‌عبارتی دیگر، کروموزوم‌ها رشته‌هایی از مقدار پیشنهادی برای متغیرهای تصمیم مسئله هستند. در مرحله بعد با توجه به تابع هدف، مسئله ارزیابی می‌شود و کروموزوم‌هایی که پاسخ بهتری برای مسئله موردنظر ارائه دهند، شانس بیشتری برای تولید مجدد<sup>۳</sup> جواب‌های مسئله پیدا می‌کنند. پس از انتخاب

کروموزوم‌های بهتر، بخشی از کروموزوم‌ها با هم تزویج<sup>۴</sup> شده و سپس در بخش دیگری از کروموزوم‌های اولیه جهش<sup>۵</sup> انجام می‌شود می‌شود که با این کار کروموزوم‌های جدیدی تولید می‌شود. از جمع کردن کروموزوم‌های حاصل از تزویج، جهش و جمعیت اولیه، جمعیت جدیدی تولید می‌شود. افراد جمعیت جدید ارزیابی می‌شوند و پس از ارزیابی و رتبه‌بندی، دوباره عمل تزویج و جهش بر روی آنها انجام می‌شود. این روند تا رسیدن به جواب بهینه مسئله یا شرایط توقف GA که توسط کاربر تعریف می‌شود، عدم تغییر در مقدار تابع هدف در تعداد تکرار معین یا رسیدن به مقدار موردنظر در محاسبه تابع هدف ادامه می‌یابد (Zahraie and Hosseini, 2015).

#### ۲-۵- ساختار مسئله

مسئله تعیین مشخصات منبع آلودگی، شامل یافتن محل منبع آلودگی، زمان شروع انتشار و غلظت آلودگی ورودی به شبکه است. تلفیق شبیه‌سازی و بهینه‌سازی یک ابزار قدرتمند برای حل مشکلات در حوضه مدیریت آب و خاک مانند شناسایی منابع آلودگی در آبخوان‌ها فراهم کرده است (Aral et al., 2001). این رویکرد همچنین می‌تواند یک راه‌حل مؤثر برای حل مسئله تعیین مشخصات منبع آلودگی باشد. ساختار مسئله تعیین مشخصات منبع آلودگی در شکل ۱ توضیح داده شده است. در این شکل،  $X(t)$  غلظت منبع آلاینده،  $y_{1,2,\dots,m}(t)$  غلظت در محل‌های نظارت (حسگر) مشخص و  $t$  زمان شبیه‌سازی است. در حسگرها غلظت‌های شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل شبیه‌سازی کیفیت آب، یعنی EPANET تولید می‌شوند. مدل بهینه‌سازی GA، غلظت‌ها را در مکان حسگرهای انتخاب شده تخمین می‌زند و تفاوت بین غلظت‌های تصادفی تولید شده و آلودگی واقعی در گره‌های نظارت را بهینه می‌کند. با گذشت زمان، آلودگی در سراسر شبکه گسترش یافته و گره‌هایی که به‌عنوان مکان‌های حسگر شناخته می‌شوند، غلظت را در فواصل زمانی مشخص گزارش می‌دهند. اندازه‌گیری‌های غلظت که از شبیه‌سازی به‌دست می‌آیند، برای هر حسگر در طول هر گام زمانی ثبت شده و مجموعه‌ای از قرائت‌های مقدار واقعی غلظت منبع آلودگی را تشکیل می‌دهند. متغیرهای

<sup>4</sup> Crossover

<sup>5</sup> Mutation

<sup>1</sup> Individuals

<sup>2</sup> Chromosome

<sup>3</sup> Reproduction

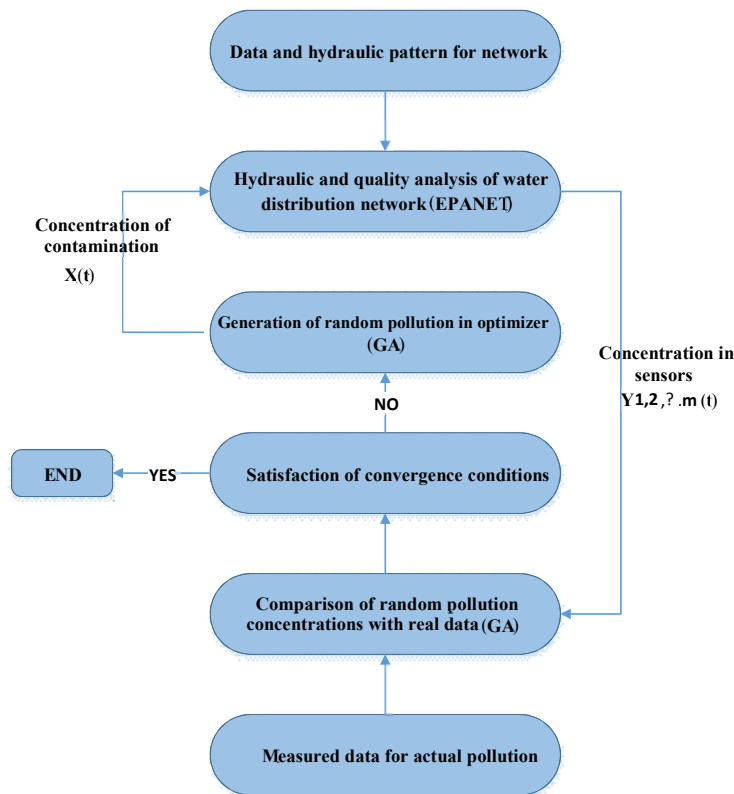


Fig. 1. Integrated structure of simulator and optimizer

شکل ۱- ساختار تلفیقی شبیه‌ساز و بهینه‌ساز

محل منبع و زمان انتشار آن، کار را شروع کرد. در این پژوهش زمان اوج مصرف آب در شبکه EPANET Example 3 ساعت ۱۱ بامداد است. فرض می‌شود زمان شروع تزریق آلودگی برای شبکه نیز در زمان اوج مصرف در نظر گرفته شده و گام زمانی مربوط به آن یک ساعته است. مدت زمان تزریق<sup>۱</sup> در شبکه به صورت پیوسته بوده و برابر ۳ ساعت فرض شده و حسگر هر ۵ دقیقه قرائت انجام می‌دهد. همچنین غلظت آلودگی ورودی به شبکه ۵۰ میلی‌گرم در لیتر فرض شده است. غلظت آلودگی ورودی به شبکه به صورت متغیر پیوسته در نظر گرفته می‌شود که در این پژوهش بیشینه غلظت آلودگی ورودی از ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر بیشتر نیست (Preis et al., 2007).

مقدار کلر آزاد باقیمانده معیار سنجش آلودگی است و نباید کمتر از ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر باشد. مقدار مطلوب کلر باقیمانده ۰/۵ تا ۱ میلی‌گرم در لیتر است. قید کیفی با استفاده از EPANET

<sup>۱</sup>Duration

تصمیم شبکه شامل مکان، زمان و غلظت ورود آلودگی است و می‌توان تابع هدف آن را به صورت معادله ۱ تعریف کرد (Vankayala et al., 2009, Preis and Ostfeld, 2011).

$$\text{minimize } f = \sum_{t=t_0}^{tcr} \sum_{i=1}^{Ns} |C_{it}^{obs} - C_{it}(L, M_{tc}, T_0)|^2 \quad (1)$$

که در آن تابع هدف،  $L$  شناسه گره محل منبع آلودگی،  $M_{tc}$  بارگذاری آلودگی یا مدت زمان تزریق و غلظت آلودگی ورودی،  $T_0$  زمان شروع تزریق آلودگی،  $t_0$  زمان اولین تشخیص آلودگی در حسگر،  $t$  گام زمانی فعلی،  $tcr$  زمان پایان شبیه‌سازی،  $C_{it}^{obs}$  غلظت مشاهده شده در حسگر  $i$  در گام زمانی  $t$ ،  $(L, M_{tc}, T_0)$  غلظت شبیه‌سازی شده در حسگر  $i$  در گام زمانی  $t$ ،  $Ns$  تعداد حسگرها و  $i$  محل مشاهده (حسگر) هستند. برای شناسایی منبع آلودگی واقعی می‌توان با یک حدس برای

تزریق آلاینده با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر در ساعت ۱۱ بامداد به مدت ۳ ساعت در گره‌های ۱۸ و ۶۳ از شبکه EPANET Example 3 در نظر گرفته شد. دایره‌ها مشخص‌کننده محل قرارگیری حسگرها (محل‌های نظارت) در شبکه هستند که بر اساس پژوهش‌های پیشین، انتخاب شدند (Liu et al., 2012).

### ۳- نتایج و بحث

برای تولید آلودگی فرضی، آلوده‌کننده یک بار از گره ۱۸ و بار دیگر از گره ۶۳ با الگوی تزریق ذکر شده به شبکه وارد شد. پارامترهای GA برای اجرای بهینه‌سازی و پیدا کردن زمان شروع تزریق و مکان آلودگی وارد شده به شبکه در جدول ۱ و نتایج حاصل از اجرای مدل در شکل‌های ۳ و ۴ و جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. مدل بر روی رایانه‌ای با سیستم عامل ویندوز ۷ نسخه ۶۴ بیتی، با پردازنده ۷ هسته‌ای ۱/۷۳ گیگاهرتز و حافظه داخلی ۸ گیگابایت اجرا شد.

مدل با در نظر گرفتن پارامترهای GA ذکر شده در جدول ۱ اجرا و پس از هم‌گرایی در کمینه کردن خطا، برترین افراد آخرین نسل به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم بررسی شد. جواب‌های ارائه شده میانگین حاصل از اجراهای متعدد بهینه‌ساز است. تمامی افراد نسل آخر در هر دو سناریو، به ترتیب گره ۱۸ و ۶۳ را به عنوان محل محتمل ورود آلودگی معرفی کرده و در حل هر دو سناریو، ساعت شروع تزریق ۱۱ بامداد گزارش شد. جواب ارائه شده توسط GA برای شبیه‌سازی آلودگی وارد شده در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. مدت زمان اجرای مدل ۸۰ دقیقه بود.

جدول ۱- پارامترهای GA

Table 1. Genetic Algorithm parameters

Parameters	value
Population size	200
Number of generations	20
Tournament selection	3
Coupling rate	0.7
Mutation rate	0.5
Type of mutation	Gaussian

Toolkit در محیط برنامه‌نویسی در هنگام تحلیل کیفی اعمال شد. با هر بار حدس زدن آلودگی، شبیه‌سازی کیفیت آب اجرا شده و برای هر گام زمانی، غلظت برای تمام گره‌های دارای حسگر، ثبت شد. تفاوت میان مقدار غلظت قرائت شده حاصل از محل واقعی منبع آلودگی و محل پیش‌بینی شده منبع آلودگی برای هر حسگر و برای هر گام زمانی به دست می‌آید. تابع هدف بهینه‌سازی در این پژوهش، مقدار حداکثر خطا را به حداقل می‌رساند. هدف این بود که مکان، زمان شروع تزریق و غلظت آلودگی ورودی به‌گونه‌ای پیش‌بینی شوند که با مشخصات منبع واقعی آلودگی کمترین تفاوت را داشته باشند.

### ۲-۶- مطالعه موردی

شبکه EPANET Example 3 که یکی از مسائل نمونه آموزشی و در دسترس در EPANET است که در این پژوهش بررسی شد (شکل ۲). این شبکه شامل ۱۱۷ لوله، ۹۲ گره، ۳ مخزن ذخیره هوایی (تانک)، ۲ منبع تامین آب و ۲ پمپ سرعت ثابت بود. اطلاعات کامل شبکه مذکور در پژوهش ژوسانگ و همکاران آمده است (Xuesong et al., 2017).

فرض بر این است که تمام گره‌ها در شبکه، فقط آب را به مناطق مسکونی عرضه می‌کنند. دو سناریو ورود آلودگی به شبکه به صورت

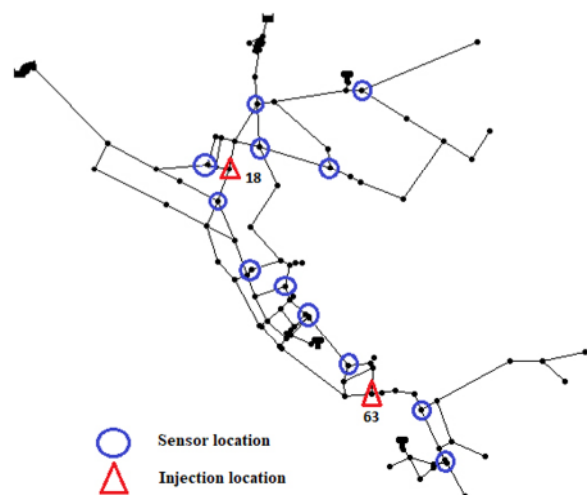


Fig. 2. EPANET example 3 network, location of sensors and pollution entry nodes

شکل ۲- شبکه EPANET example 3. محل قرارگیری حسگرها و گره‌های ورود آلودگی

جدول ۳- جواب‌های برتر GA با سه متغیر تصمیم برای مکان ورود آلودگی (توزیع آلودگی در گره ۶۳)

**Table 3.** Top GA solutions with three decision variables for pollution entry point (Injection contamination to node 63)

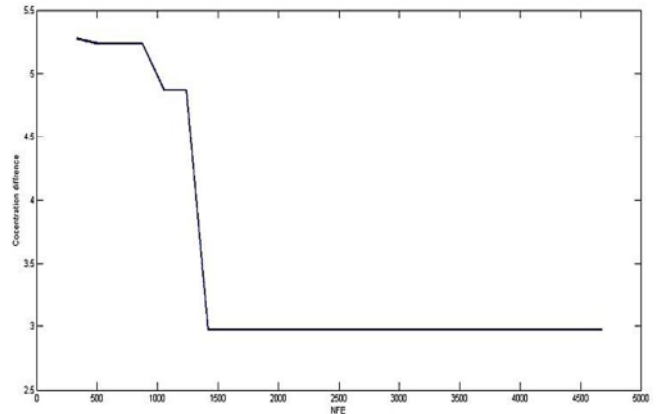
Node	Concentration (mg / l)	Injection start time (Hosseinifard et al., 2020)
63	51	11 Am
63	48	11 Am
63	53	11 Am
63	59	11 Am

در شبکه EPANET Example 3 گره واقعی ورود آلودگی به درستی شناسایی شد. در این حالت مدل در حدس زمان شروع تزریق نیز کاملاً دقیق عمل می‌کند و در تمامی جواب‌های برتر ارائه شده، زمان شروع تزریق به درستی حدس زده شد. غلظت‌های برآورد شده توسط بهینه‌ساز اختلاف کمی با مقدار موردنظر (۵۰ میلی‌گرم در لیتر) دارند و انحراف از معیار این غلظت‌ها برای گره ۱۸ برابر با  $\sigma = 6/6\%$  و برای گره ۶۳ برابر با  $\sigma = 4/8\%$  است.

در شبیه‌ساز EPANET نرخ زوال حجمی به صورت پیش فرض ۱- و زبری لوله‌ها در رابطه هیزن- ویلیامز<sup>۱</sup> برابر ۱۳۰ در نظر گرفته می‌شود. به منظور بررسی تأثیر تغییرات نرخ زوال حجمی بر روی جواب‌های ارائه شده، مدل با نرخ زوال‌های ۰/۸- و ۱/۲- اجرا و تأثیر آن بر جواب‌ها بررسی شد. با توجه به تأثیر زبری لوله بر سرعت و هیدرولیک شبکه، باید مقدار تأثیر تغییرات این عدد فرض شده، بر روند شبیه‌سازی- بهینه‌سازی دیده شود. از این رو مدل با زبری‌های ۱۵۰ و ۱۱۰ نیز اجرا و جواب‌های ارائه شده بررسی شد.

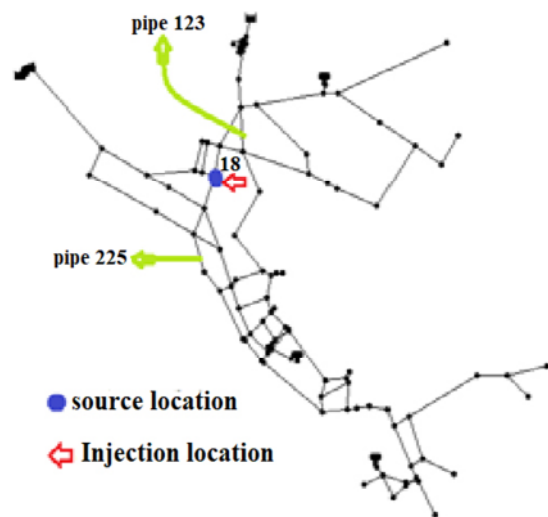
مدل چهار بار به ترتیب، با زبری ۱۱۰ و ۱۵۰ برای لوله‌ها و ضریب زوال کلر ۰/۸- و ۱/۲- اجرا شد. نتایج نشان داد که اعمال این تغییرات در مدل تأثیری بر جواب‌های بهینه‌ساز ندارد. همچنان مدل در تعیین مکان ورود و زمان شروع تزریق آلودگی کاملاً توانمند است و متغیر مکان (گره ۱۸) و زمان شروع (۱۱ بامداد) به درستی تخمین زده شدند. برای غلظت آلودگی ورودی نیز تخمین‌های خوبی ارائه می‌دهد. در ادامه مدل با تغییر هم‌زمان زبری لوله و ضریب زوال کلر (زبری ۱۱۰ همراه با ضریب زوال ۱/۲- و

<sup>1</sup> Hazen-William



**Fig. 3.** Convergence of optimizer for contamination entered from node 18

شکل ۳- نمودار هم‌گرایی بهینه‌ساز برای آلودگی ورودی از گره ۱۸



**Fig. 4.** Failed pipes for HDSM analysis  
شکل ۴- لوله‌های دچار شکست به منظور تحلیل HDSM

جدول ۲- جواب‌های برتر GA با سه متغیر تصمیم برای مکان ورود آلودگی (توزیع آلودگی در گره ۱۸)

**Table 2.** Top GA solutions with three decision variables for pollution entry point (Injection contamination to node 18)

Node	Concentration (mg / l)	Injection start time (Hosseinifard et al.)
18	49	11 Am
18	51	11 Am
18	52	11 Am
18	37	11 Am



جدول ۵- جواب‌های برتر GA برای حل با سه متغیر تصمیم (تحلیل DDSM)

**Table 5.** Top GA solutions with three decision variables for pollution entry point (DDSM analysis)

Node	Concentration (mg / l)	Injection start time (Hosseinifard et al., 2020)
18	46	11 Am
18	55	11 Am
18	43	11 Am
18	41	11 Am

جدول ۶- جواب‌های برتر GA برای حل با سه متغیر تصمیم (تحلیل HDSM)

**Table 6.** Top GA solutions with three decision variables for pollution entry point (HDSM analysis)

Node	Concentration (mg / l)	Injection start time (Hosseinifard et al., 2020)
18	53	11 Am
18	43	11 Am
18	41	11 Am
18	60	11 Am

متأثر از فشار موجود در آن گره بوده و با تغییر فشار، دبی نیز تغییر می‌کند. مدل با وجود شکست در لوله‌های ۱۲۳ و ۲۲۵ برای حل مسئله با سه متغیر تصمیم مکان، زمان و غلظت آلودگی و با هر دو تحلیل هیدرولیکی DDSM<sup>۱</sup> و HDSM اجرا شد. نتایج حاصل از تحلیل DDSM و HDSM به ترتیب در جداول‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. با توجه به این دو جدول مشاهده می‌شود که در هر دو تحلیل گره منبع آلودگی و زمان شروع تزریق به درستی معرفی شده است. با خارج شدن شبکه از حالت نرمال، همچنان قرائت غلظت در حسگرها این توانایی را به مدل بهینه‌ساز می‌دهد تا منبع و مشخصات ورود آلودگی را به درستی تشخیص دهد. با تغییر تحلیل هیدرولیکی از DDSM به HDSM، به دلیل تغییر دبی و فشار در گره‌ها و سرعت در لوله‌ها و به تبع آن، غلظت‌ها در مدل کیفی متفاوت هستند. انحراف از معیار غلظت‌های برآورد شده توسط بهینه‌ساز نسبت به مقدار موردنظر ۵۰ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب برای تحلیل DDSM و HDSM  $\sigma = 6/4\%$  و  $\sigma = 8/1\%$  است. با

<sup>1</sup> Demand Driven Simulation Method (DDSM)

زبری ۱۵۰ همراه با ضریب زوال ۰/۸- اجرا شد که نتایج نشان داد که اعمال این تغییرات در روند جستجوی بهینه‌ساز برای یافتن متغیرهای تصمیم تأثیری ندارد. خروجی مدل برای تغییر زبری به ۱۱۰ و ضریب زوال به ۱/۲- برای آلودگی وارد شده از گره ۱۸ در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴- جواب‌های برتر GA با سه متغیر تصمیم و تغییر ضریب زبری و نرخ زوال کلر (توزیع در گره ۱۸)

**Table 4.** Top GA solutions with three decision variables for pollution entry point and changing the coefficient of roughness and rate of chlorine deterioration (Injection contamination to node 18)

Node	Concentration (mg / l)	Injection start time (Hosseinifard et al., 2020)
18	51	11 Am
18	53	11 Am
18	46	11 Am
18	59	11 Am

مشاهده شد که با تغییر ضریب زبری لوله و نرخ زوال کلر، مدل گره ورود آلودگی را به درستی حدس می‌زند. در این حالت مدل در حدس زمان شروع تزریق نیز کاملاً دقیق عمل می‌کند و در تمامی جواب‌های برتر ارائه شده، زمان شروع تزریق به درستی حدس زده می‌شود. غلظت‌های برآورد شده توسط بهینه‌ساز اختلاف کمی با مقدار موردنظر ۵۰ میلی‌گرم در لیتر دارند و انحراف از معیار این غلظت‌ها  $\sigma = 5/1\%$  است.

برای اجرای مدل در حالت تحلیل مبتنی بر فشار و سنجیدن استحکام آن، فرض می‌شود که در لوله‌های شبکه به صورت دلخواه لوله‌های ۱۲۳ و ۲۲۵ که در شکل ۴ نشان داده شده است، شکست رخ داد و هیدرولیک شبکه از حالت عادی خارج شد.

حداقل فشاری که در فشارهای کمتر از آن هیچ دبی از گره خارج نمی‌شود برابر صفر و فشار مطلوب گرهی برابر ۲۶ متر در نظر گرفته شده است. شکست لوله باعث افزایش افت هد در لوله‌ها و در نتیجه کاهش فشار در گره‌ها می‌شود. فشار گره‌ها به‌طور متوسط ۳۵ درصد کاهش یافت.

در تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا کاهش فشار گره بر دبی خروجی از گره تأثیری نداشته و دبی خروجی برابر دبی مورد تقاضای گره است. در تحلیل مبتنی بر فشار دبی خروجی از هر گره

به درستی حدس زده شده‌اند و همچنان مدل با دقت ۱۰۰ درصد مکان و زمان ورود آلودگی را شناسایی کرده است. غلظت‌های برآورد شده توسط بهینه‌ساز اختلاف کمی با مقدار مورد نظر ۵۰ میلی‌گرم در لیتر دارند و انحراف از معیار این غلظت‌ها به ترتیب  $\sigma = 6/6\%$  و  $\sigma = 5/1\%$  است. به منظور بررسی جامع‌تر مسئله تعیین مشخصات منبع ورود آلودگی به شبکه‌های توزیع آب پیشنهاد می‌شود در صورت وجود داده‌های مورد نیاز، مدل‌سازی بر روی شبکه آب شهری با اندازه بزرگ انجام شود. در این پژوهش ضریب زبری لوله و نرخ زوال کلر برای بررسی تأثیر داده‌های ورودی بر نتایج مدل انتخاب شدند. پیشنهاد می‌شود عدم قطعیت دیگر داده‌های ورودی در مسئله نیز ارزیابی شوند. در فاز دوم پژوهش پیشنهادات فوق مدنظر قرار خواهد گرفت.

توجه به دقت بیشتر تحلیل هیدرولیکی HDSM، توصیه می‌شود که جواب‌های تحلیل HDSM در نظر گرفته شوند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

با استفاده از نرم‌افزار EPANET برای شبیه‌سازی شبکه آب و آلودگی‌های ورودی به آن و GA برای بهینه‌سازی و رسیدن به جواب بهینه، مسئله آلودگی در شبکه‌های آب ساخته شد. نتایج به دست آمده از مثال حل شده نشان داد که مدل ارائه شده در این پژوهش برای شبکه بررسی شده، در حدس مکان ورود آلودگی، زمان شروع تزریق و غلظت آلودگی ورودی بسیار توانمند بوده و کاملاً دقیق عمل می‌کند. با اعمال تغییر در ورودی‌های مدل، متغیرهای تصمیم مسئله شامل مکان، زمان و غلظت آلودگی ورودی

#### References

- Aral, M., Guan, J. & Morris, L. M. 2001. Identification of contaminant source location and release history in aquifers. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(3), 225-34.
- Cristo, C. D. & Leopardi, A. 2008. Uncertainty Effects on Pollution Source Location in Water Networks, 8<sup>th</sup> Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio, USA, 1-10.
- EPAUS. 2003. *Framework for cumulative risk assessment*. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, USA.  
[https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-11/documents/frmwrk\\_cum\\_risk\\_assmnt.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-11/documents/frmwrk_cum_risk_assmnt.pdf)
- Goldberg, D. E. & Holland, J. H. 1988. Genetic algorithms and machine learning, *Machine Learning*, 3(2), 95-99.
- Holland, J. H. 1975. *Adaptation in natural and artificial systems*, MIT Press. USA.
- Hosseinfard, S. M., Aroon, M. A. & Dahrazma, B. 2020. Application of PVDF/HDTMA-modified clinoptilolite nanocomposite membranes in removal of reactive dye from aqueous solution. *Separation and Purification Technology*, 251, 117294.
- Hu, C., Zhao, J., Yan, X., Zeng, D. & Guo, S. 2015. A mapreduce based parallel niche genetic algorithm for contaminant source identification in water distribution network, *Ad Hoc Networks*, 35, 116-26.
- Kumar, J., Brill, E. D., Mahinthakumar, G. & Ranjithan, S. R. 2012. Contaminant source characterization in water distribution systems using binary signals, *Journal of Hydroinformatics*, 14(3), 585-602.
- Liu, L., Zechman, E. M., Mahinthakumar, G. & Ranjithan, S. R. 2012. Identifying contaminant sources for water distribution systems using a hybrid method. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 29(2), 123-136.
- Pasha, M. K. & Lansey, K. 2011. Effect of parameter uncertainty on water distribution systems model prediction, *World Environmental and Water Resources Congress: Bearing Knowledge for Sustainability*, Palm Springs, California, USA, 68-78.
- Pérez, R. Sanz, G., Cugueró, M. À., Blesa, J. & Cugueró, J. 2015. Parameter uncertainty modelling in water distribution network models. *Procedia Engineering*, 119, 583-592.

- Preis, A. & Ostfeld, A. 2011. Hydraulic uncertainty inclusion in water distribution systems contamination source identification. *Urban Water Journal*, 8(5), 267-277.
- Preis, A., Ostfeld, A. & Perelman, L. 2007. Contamination source detection with fuzzy sensors data, *World Environmental and Water Resources Congress: Restoring Our Natural Habitat*, Tampa, Florida, USA, 1-13.
- Rossman, L. A. 2000. *EPANET 2 user's manual, water supply and water resources division*, National Risk Management Research Laboratory, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, USA.
- Shirzad, A., Tabesh, M., Farmani, R. & Mohammadi, M. 2013. Pressure-discharge relations with application to head-driven simulation of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(6), 660-70.
- Tabesh, M. 2016. *Advanced modeling of water distribution networks*. University of Tehran press, Tehran, Iran. 585p. (In Persian)
- Tabesh, M., Shirzad, A., Arefkhani, V. & Mani, A. 2014. A comparative study between the modified and available demand driven based models for head driven analysis of water distribution networks. *Urban Water Journal*, 11(3), 221-30.
- Tabesh, M., Tanyimboh, T. T. & Burrows, R. 2002. Head-driven simulation of water supply networks, *International Journal of Engineering Transactions A: Basics*, 15(1), 11-22.
- Vankayala, P., Sankarasubramanian, A., Ranjithan, S. R. & Mahinthakumar, G. 2009. Contaminant source identification in water distribution networks under conditions of demand uncertainty. *Environmental Forensics*, 10(3), 253-63.
- Vrachimis, S. G., Lifshitz, R., Eliades, D. G., Polycarpou, M. M. & Ostfeld, A. 2020. Active contamination detection in water-distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, 146(4), 324-335
- Wagner, J. M., Shamir, U. & Marks, D. H. 1988. Water distribution reliability: analytical methods. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, 114(3), 235-275.
- Xuesong, Y., Jie, S. & Chengyu, H. 2017. Research on contaminant sources identification of uncertainty water demand using genetic algorithm. *Cluster Computing*, 20(2), 1007-1016.
- Zafari, M. 2015. Minimization the effects of contaminant emission in water distribution system based on head driven simulation method. MSc. Thesis, University of Tehran, Tehran, Iran. 107p. (In Persian)
- Zahraie, B. & Hosseini, S. M. 2015. *Genetic algorithms and optimization engineering*, Gutenberg Pub., 298p. (In Persian)