

EXTENDED ABSTRACTS

Investigating the Effect of Pressure-Based Hydraulic Analysis on the Quality Reliability of Water Distribution Networks as for Residual Chlorine and THM using EPANET-MSX

Massoud Tabesh*, Fatemeh Sajjadi, Niloufar Karimi

School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 27 October 2024; **Reviewed:** 26 March 2025; **Accepted:** 12 April 2025

Keywords:

EPANET-MSX, Reliability, Residual chlorine, Trihalomethane, Water distribution network.

1. Introduction

In recent decades, with the rapid growth of industries and population, environmental pollution, especially water resources, has increased greatly. One of the common methods to disinfect water and eliminate pathogenic microbes is chlorination. But this process, especially when the water contains naturally occurring organic matter (NOM), can lead to the production of dangerous byproducts such as trihalomethanes (THMs). These compounds, which have carcinogenic properties, can give an unpleasant taste and smell to water. To investigate and model these complex processes in water distribution systems, specialized software such as EPANET-MSX is used. which, based on the demand-based hydraulic analysis, enables simultaneous simulation of qualitative species interacting with each other. One of the important points in these studies is paying attention to water pressure in distribution networks. Pressure-based analysis helps researchers to better understand the actual performance of the network and provide appropriate solutions to improve water quality. In the present study, the undeniable role of HDSM (Head Depend Simulation Method) hydraulic analysis on the quality analysis results of the network was considered, and the EPANET-MSX multispecies qualitative analysis model is combined with the HDSM hydraulic analysis model. Also, in this study, based on the laws and criteria of drinking water quality standards, penalty curves are provided for the quality parameters of residual chlorine and trihalomethane, and based on that, the quality reliability of the network is checked in terms of these two important parameters.

2. Methodology

The research methodology combines hydraulic pressure analysis (HDSM) and multi-species water quality simulation using the EPANET-MSX software. This involves modeling chlorine decay, THMs (Trihalomethanes) formation, and the impact of water age on chemical reactions. The software can simulate interactions between different chemical species in water, providing a dynamic model of chlorine's effectiveness and the growth of harmful byproducts like THMs.

2.1. Hydraulic analysis (HDSM)

This method models the relationship between water pressure and flow. It addresses a limitation of demand-based models, which assume full water supply even in low-pressure conditions. In reality, water pressure impacts how much water can be distributed, so HDSM provides a more accurate representation of flow in the network.

2.2. Water quality analysis (EPANET-MSX)

The MSX version of EPANET allows for multi-species simulations that consider the interaction between chlorine and organic materials, leading to the formation of THMs. By simulating water age, the study observes how longer water retention times increase the decay of chlorine and the concentration of THMs.

2.3. Quality reliability

2.3.1. Quality penalty curves

Maximum or minimum limits are set for the allowable concentration of substances present in water. These limits may be upper, lower, or both, depending on the substance being considered. To accurately assess the condition of a substance in water, you can use a penalty curve. This involves defining a function for different values of the substance concentration in water. This function assigns a number between zero (undesirable condition) and one (desirable condition) to different concentration values of the substance. This curve represents the actual performance of water distribution networks based on water quality parameters (Fig. 1).

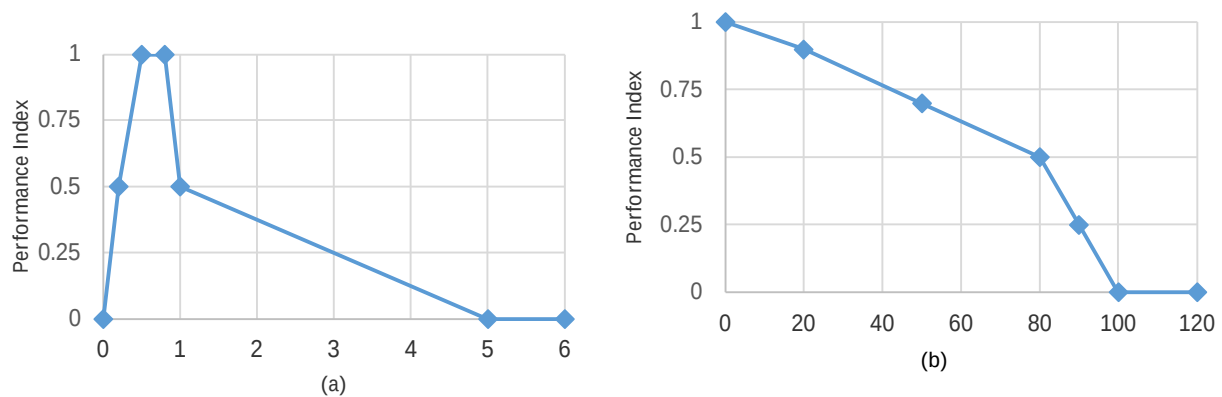


Fig. 1. Proposed penalty curve for: **a)** Residual free chlorine (mg/l), **b)** trihalomethane (µg/l)

2.3.2. Combined qualitative reliability index of residual chlorine and trihalomethane

Different researchers have proposed various indices to evaluate the water quality performance of distribution networks, including water quality reliability. A water quality failure occurs when the water supplied by the network doesn't meet the required quality for consumption. In this study, eq. (1) was used to calculate water quality reliability.

$$\frac{\sum_s \sum_j PI_{js} Q_{js}^{avl} t_s}{\sum_s \sum_j Q_{js}^{req} t_s} = R_{WQ} \quad (1)$$

Where Q_{js}^{avl} is the available flow rate at node j in stage s , Q_{js}^{req} is the demand at node j in stage s , PI_{js} is the performance factor obtained based on the residual chlorine and trihalomethane levels at the nodes and from the performance factors shown in Fig. 1. (performance capability of node j in stage s), t_s is the duration of stage s , j index representing the demand node, and s index representing the operating stages. It is necessary to use an index that considers both residual chlorine and formed trihalomethane parameters at the same time. In order to consider the residual chlorine and formed trihalomethane at the same time, the integrated reliability index is used in the form of eq (2).

$$R_{WQ} = \sqrt{R_{WQCl} * R_{WQTHM}} \quad (2)$$

3. Case studies

The model was applied to two different water distribution networks: Sample network 1 (4 nodes and 5 pipes) and sample network 2 (water distribution in the city of Mahalat)

Case study 1)

In the first network, the study tested normal and reduced pressure scenarios to observe changes in chlorine and THM levels. Under normal pressure, both chlorine and THM concentrations were stable. However, in scenarios where only 64% of the water demand was met due to pressure loss, chlorine levels dropped significantly, while THM concentrations rose, indicating a degradation in water quality (Table 1).

Table 1. Calculation results of integrated qualitative reliability index using EPANET-MSX-HDSM software (network 1)

Scenario	Demand supply ratio (%)	Consolidated qualitative reliability
scenario1	100	0.928
Scenario2	86	0.798
Scenario3	64	0.593

Case study 2)

The second case, which focused on Mahallat's larger network, tested scenarios where only 30% and 90% of water demand was met. Results showed a nearly 70% drop in the water quality reliability index when only 30% of demand was supplied. The findings emphasized the severe impact of reduced pressure on water quality, where insufficient water flow led to the formation of harmful by products (Table 2).

Table 2. The results of the calculations of the integrated quality reliability index using the EPANET-MSX-HDSM software (network 2)

Scenario	Demand supply ratio (%)	Consolidated qualitative reliability
scenario1	90	0.857
Scenario2	40	0.367
Scenario3	30	0.265

4. Conclusion

The integration of hydraulic pressure analysis with multi-species water quality simulations provides a more reliable approach for assessing the performance of water distribution networks. The findings underscore the need for utilities to monitor not only the flow of water but also the pressure, especially under conditions where demand exceeds supply. Ensuring proper chlorine levels while minimizing harmful byproducts like THMs requires dynamic and pressure-sensitive models like EPANET-MSX-HDSM. In low pressure conditions, it's necessary to use a pressure-based hydraulic model. To perform a quality analysis, a model is also needed that simultaneously considers the interacting species of interest. For this purpose, EPANET-MSX software was used, which is essentially a development of EPANET software and has the capability to simulate multiple chemical and biological species interacting with each other EPANET-MSX performs quality analysis based on demand-driven hydraulic analysis. To address this issue and enable the use of the EPANET-MSX software package to perform multi-species quality analysis in conjunction with HDSM hydraulic analysis, a program was developed in the MATLAB programming environment that integrates the HDSM hydraulic analysis model with the EPANET-MSX multi-species model the water quality reliability index was assessed for chlorine and THM. To do this, penalty curves were defined for these substances. The method used in this study was implemented on two water distribution networks.

The key findings results

- **Impact of Pressure:** The study found that hydraulic pressure has a direct impact on water quality. Low-pressure conditions result in a significant reduction in chlorine levels and an increase in THMs, affecting the overall safety of the drinking water.
- **Water Age and Quality:** Water stagnation increases the decay of disinfectants like chlorine and fosters the formation of THMs. The longer the water remains in the network, the more likely it is to degrade in quality.
- **Software Effectiveness:** The EPANET-MSX-HDSM software proved to be an effective tool for simulating both hydraulic and water quality changes in real-time. It offered a more accurate picture of water quality under different pressure scenarios compared to traditional demand-based models.
- **Using the results of EPANET-MSX-HDSM software in determining the integrated reliability index** (in terms of chlorine and trihalomethane), with a decrease in the demand supply ratio, a significant decrease in the index value was observed. Therefore, this index varies significantly in different operating pressures, and in some network pressure conditions, the changes are very large and significant. For example, in the first sample network, in a scenario where 64 percent of the demand is met, a 36 percent decrease in the integrated water quality reliability is observed, and in the second sample network, in the scenario where 30 percent of the demand is met compared to the scenario where 90 percent of the demand is met, a decrease of approximately 70 percent in the integrated water quality reliability index is observed.

بررسی تأثیر تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار در قابلیت اطمینان کیفی شبکه‌های توزیع آب (از نظر کلر باقی‌مانده و تری‌هالومتان) با بهره‌گیری از نرم‌افزار EPANET-MSX

مسعود تابش^{1*}، فاطمه سجادی²، نیلوفر کریمی³

¹ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

² دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

³ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

دریافت: 1403/8/6، بازنگری: 1404/1/6، پذیرش: 1404/1/23، نشر آنلاین: 1404/1/23

چکیده

ارزیابی عملکرد شبکه‌های توزیع آب بر اساس پارامترهای کیفی و رعایت مقدار کلر باقی‌مانده در گره‌های مصرف از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. مدل‌های شبیه‌سازی مبتنی بر تقاضا در شرایط کمبود فشار، نتایجی به‌دور از واقعیت ارائه می‌دهند. از سوی دیگر، برای شبیه‌سازی کیفی آب، رویکرد تک‌گونه‌ای، ناکارآمد و تا حدودی غیرواقعی است؛ زیرا در شبکه‌های توزیع آب، مواد زیادی با هم تعامل دارند. در این مقاله، به‌منظور ارزیابی دقیق عملکرد شبکه از نظر پارامترهای کیفی کلر و تری‌هالومتان در شرایط نرمال و کمبود فشار، مدل شبیه‌ساز کیفی چندگونه‌ای EPANET-MSX توسعه داده شده است. این برنامه توسعه یافته که تحت عنوان نرم‌افزار EPANET-MSX-HDSM یاد شده است، قادر به شبیه‌سازی هیدرولیکی و کیفی شبکه به‌صورت توأمان و دینامیکی است و قابلیت استفاده در شرایط نرمال و کمبود فشار را دارد. مدل پیشنهادی بر روی دو شبکه توزیع از جمله شبکه توزیع آب شهر محلات مورد آزمایش قرار گرفته و با بهره‌گیری از منحنی‌های جریم‌های که برای کلر و تری‌هالومتان تعریف شده، قابلیت اطمینان شبکه از نظر این پارامترها بررسی شده است. بر اساس نتایج، استفاده از نرم‌افزار توسعه داده شده در شرایط وجود کمبود فشار می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه‌ای نتایج قابلیت اطمینان کیفی شبکه را تحت تأثیر قرار دهد. چنان‌که در شبکه نمونه اول، در سناریویی که در آن 64 درصد تقاضا تأمین می‌شود، کاهش 36 درصدی در قابلیت اطمینان کیفی تلفیقی و در شبکه نمونه دوم، در سناریوی تأمین 30 درصد تقاضا نسبت به سناریوی تأمین 90 درصد تقاضا، کاهش تقریبی 70 درصدی این شاخص مشاهده می‌شود.

کلیدواژه‌ها: EPANET-MSX، تحلیل کیفی چندگونه، قابلیت اطمینان، تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار، کلر باقی‌مانده، تری‌هالومتان، شبکه توزیع آب.

1- مقدمه

ضدعفونی کننده باقی‌مانده در سیستم توزیع آب (WDS)¹ Zilin و همکاران، (2024) برای کنترل آلودگی میکروبیولوژیکی باید در سطح قابل قبولی تنظیم شود (Goodarzi و همکاران، 2020؛ Wang و Zhu، 2022).

با کلرزی آب حاوی مواد آلی طبیعی (NOM)² محصولات جانبی گندزدایی (DBPs)³ از قبیل تری‌هالومتان‌ها (THMs)⁴ و هالواسیتیک اسیدها (HAAs)⁵ تشکیل می‌شوند که به‌عنوان موادی

در دهه‌های اخیر، صنعتی شدن و رشد اقتصادی- اجتماعی منجر به افزایش روزافزون آلودگی محیط زیست شده که تأثیر نامطلوب بر کیفیت منابع آب داشته است. گندزدایی با کلر، خطر ابتلا به عفونت‌های بیماری‌زا را کاهش می‌دهد (Maheshwari و همکاران، 2018). اما در عین حال ممکن است به‌عنوان یک تهدید شیمیایی نیز برای سلامتی انسان به‌شمار بیاید. به‌همین دلیل مواد

4. Trihalomethanes
5. Haloacetic Acids

1. Water Distribution System
2. Natural Organic Matter
3. Disinfection By-products



EPANET2 یک مدل هیدرولیکی و کیفی آب متداول است که بر مبنای تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا، برای شبیه سازی فرایندهای کیفیت آب در سیستم های توزیع آب مورد استفاده قرار می گیرد و این امکان را می دهند تا ویژگی های فیزیکی شبکه، تقاضای آب و سایر عوامل را برای شبیه سازی رفتار شبکه و شناسایی مشکلات بالقوه برای بهبود را مدل سازی کنند (Mohseni و همکاران، 2022؛ Abdy Sayyed و همکاران، 2014).

این مدل، شبیه سازی اضمحلال کلر، رشد DBPs و سن آب را ممکن می سازد (Rossman، 2000). در واقع این مدل، یک مدل تک گونه ای و محدود به ردیابی دینامیکی یک جزء شیمیایی تک مانند کلر، یا سن آب است و قابلیت شبیه سازی گونه های چندگانه (چندگونه در تقابل با هم) را ندارد (Shang و همکاران، 2008). EPANET-MSX توسعه ای بر نرم افزار EPANET است که بر مبنای تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا، شبیه سازی گونه های کیفی در تعامل با یکدیگر را به طور هم زمان ممکن می سازد (Sayyed Abdy و همکاران، 2014).

مدل سازی کیفیت آب چند گونه ای برای شبیه سازی واکنش های شیمیایی پیچیده در سیستم های توزیع آب آشامیدنی حیاتی است و محققان مختلف از این نرم افزار به منظور شبیه سازی کیفی چندگونه ای استفاده کرده اند. مدل های یکپارچه فرآیند EPANET-MSX کلر و محصولات جانبی آن در سیستم های توزیع آب آشامیدنی مورد بررسی قرار گرفته است.

Fisher (2023) و Burkhardt و همکاران (2023) حذف کلر مرتبط با نیکوتین در آب آشامیدنی از منظر امنیت آب آشامیدنی و Fisher و همکاران (2021) مدل سازی پروفیل های کلر باقی مانده و تری هالومتان را در سیستم های توزیع آب پس از تصفیه (پیش کلر زنی) با استفاده از ابزار EPANET-MSX ارائه نمودند. در تحقیقات دیگری مدل سازی رشد مجدد باکتری ها و تشکیل تری هالومتان در سیستم های توزیع آب (Abhijith و همکاران، 2021) و بررسی بهینه سازی مقدار ضد عفونی آزاد مبتنی بر کلر برای کنترل انحلال سرب (Pb) و در عین حال محدود کردن تشکیل محصولات جانبی ضد عفونی (DBPs) در شبکه های توزیع آب توسط مدل کیفی EPANET-MSX اجرا شده است (Maheshwari و همکاران، 2020).

Chang و همکاران (2010) یک مدل چندگونه ای کیفیت آب شبکه توزیع آب برای محاسبه کلر باقی مانده براساس گندزدایی

سرطان زا شناخته شده اند و مشکلاتی در طعم و بو نیز ایجاد می کنند (Goodarzi و همکاران 2020؛ Gopal و همکاران، 2007). بنابراین علاوه بر غلظت کلر، غلظت تری هالومتان ها نیز باید کنترل شود و در محدوده استاندارد باشد.

NOM بر اثر تجزیه بیولوژیکی مواد آلی مانند اسیدهای آمینه، اسیدهای چرب، فنل، استروئیدها، هیدروکربن ها، پلیمرها و غیره تشکیل می شود (Gopal و همکاران، 2007) و کلر نیز که یک اکسیدکننده قوی است بسیاری از مواد آلی طبیعی را که پس از تصفیه در آب باقی مانده است اکسید می کند. واکنش کلر با مواد آلی طبیعی، موجب شکل گیری محصولات جانبی ضد عفونی می شود که برای سلامتی انسان مضر هستند. برخی از این واکنش ها نیز طعم یا بوی بدی را تولید می کنند که موجب رنجش مصرف کنندگان می شود (Wang و Zhu، 2022؛ Fisher و همکاران، 2011). تری هالومتان ها شامل کلروفرم، دی کلروبرومتان، دی برم کلرومتان و برموفرم هستند. مجموع این چهار ماده به عنوان تری هالومتان کل (TTHMs)¹ شناخته می شود (Rodriguez و همکاران، 2007).

امروزه نرم افزارهای گوناگونی برای تحلیل هیدرولیکی شبکه های توزیع آب وجود دارد. تحلیل هیدرولیکی شبکه های توزیع آب را می توان به دو صورت مبتنی بر تقاضا (DDSM)² یا مبتنی بر فشار (HDSM)³ انجام داد (Lee و همکاران، 2016؛ Sarisen و همکاران، 2022؛ Chang و همکاران، 2021). مدل های شبیه سازی مبتنی بر تقاضا، با ثابت در نظر گرفتن دبی برداشتی از گره ها بدون در نظر گرفتن میزان فشار موجود با واقعیت در تطابق نیستند و ممکن است باعث نتایج غیر واقعی مانند فشار منفی شوند. در واقعیت، مقدار قابل برداشت در هر گره وابسته به فشار موجود در آن گره است. بنابراین مدل های DDSM، تنها در شرایط عادی که حداقل فشار استاندارد برای تأمین تقاضای آب وجود دارد، معتبر است و در شرایط کمبود فشار، نتایج قابل اعتمادی نشان نمی دهد (Reddy، 1998؛ Tabesh و Elango، 1989؛ Choi، 2021).

برای شبیه سازی عملکرد واقعی شبکه، لازم است رابطه بین فشار و دبی در گره ها در نظر گرفته شود. این نوع از تحلیل، تحلیل مبتنی بر فشار نامیده می شود. این روش می تواند به عنوان یک ابزار مناسب برای نشان دادن عملکرد واقعی یک شبکه مورد استفاده قرار گیرد (Chang و همکاران، 2021).

مدل‌های تحلیل پارامترهای کیفیت آب براساس EPANET به دلیل تحلیل تک‌گونه پارامترهای کیفی برای استراتژی‌های بهینه دوز کلر در سیستم‌های توزیع دقیق نیستند و مدل چندگونه EPANET-MSX برای تحلیل واکنش‌های کلر در آب و در دیواره‌های لوله و تشکیل محصولات جانبی مرتبط، بر محدودیت‌های EPANET غلبه می‌کنند (Fisher, 2023).

در تحقیق Alemtsehay و Tiku (2017) نشان داده شده که قابلیت اطمینان EPANET-MSX در حالت تحلیل مبتنی بر فشار (HDSM) بیشتر از زمانی است که تحلیل مبتنی بر تقاضا (DDSM) صورت می‌گیرد و نتایج واقعی‌تر خواهد بود. کاهش در میزان سرعت به دلیل فشار کم منجر به کاهش میزان دبی جریان لوله و باعث افزایش سن آب می‌شود. در نتیجه، به مرور زمان غلظت کلر کاهش و غلظت محصولات جانبی ضد عفونی افزایش می‌یابد. غلظت‌های کلر و THM به سن آب بستگی دارد و سن آب نیز علاوه بر فشار، به موقعیت مکانی در شبکه و خواص مسیرهای تأمین دبی در گر‌ها بستگی دارد.

مطالعه Zuthi و همکاران (2023) در شهر چانگرام برای تری‌هالومتان‌ها (THMs) در شبکه توزیع آب نشان داد که غلظت‌های THMs در سراسر شبکه از 33 تا 486 میکروگرم در لیتر متغیر است. حدود 60% از کل گر‌ها غلظت‌های THMs بالای 150 میکروگرم در لیتر را نشان دادند. در حالی که این میزان برای اکثر (99%) گر‌ها بالای 50 میکروگرم در لیتر است. کلر آزاد باقی‌مانده، یکی از پیش‌سازهای تشکیل THMs در شبکه توزیع، نیز توسط EPANET شبیه‌سازی شده است. پس از شبیه‌سازی و به دست آوردن مقادیر پارامترهای کیفی، لازم است با ارائه شاخص‌های مناسب قابلیت اطمینان از این اطلاعات در بهره‌برداری شبکه‌های توزیع آب استفاده نمود. در پژوهش‌های پیشین، مطالعات گوناگونی از قبیل قابلیت اطمینان کیفیت آب بر اساس آنتروپی بهبود یافته در یک سیستم توزیع آب (Wang و همکاران، 2022؛ Wang و Zhu, 2021)، افزایش قابلیت اطمینان حسگرهای تشخیص آلودگی در سیستم‌های توزیع آب (Abhijith و همکاران، 2023) ارزیابی قابلیت اطمینان شاخص کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل‌های برگرفته از داده توسط (Najafzadeh و همکاران، 2022) انجام شده است و محققان مختلف در این زمینه شاخص ارائه کرده‌اند.

Mays (2002) قابلیت اطمینان کیفی آب را به صورت احتمال این که غلظت آلاینده از حداکثر سطح آلاینده (MCL)² تجاوز نکند

هم‌زمان به وسیله کلر و دی‌اکسیدکلر با استفاده از ابزار EPANET-MSX ارائه نمودند.

Klosterman و همکاران (2010) از مدل‌های کیفی آب برای شبیه‌سازی وقایع آلودگی فرضی استفاده کردند. در این تحقیق، ابتدا میزان زوال و میزان جذب سطحی آرسنیک در آزمایشگاه بررسی و سپس توسط مدل کیفی EPANET-MSX اجرا شد. Zanjani (2015) آلودگی گسترده شبکه‌های توزیع آب شهری را بررسی کرد. در این تحقیق، به منظور شبیه‌سازی وقایع آلودگی شیمیایی و بیولوژیکی از برنامه EPANET-MSX استفاده شد. آلودگی شیمیایی در نظر گرفته شده در این مطالعه، آرسنیک بود. در این برنامه، شبیه‌سازی معادلات مربوط به زوال آرسنیک توسط گندزدا و تشکیل آرسنات انجام شد. باکتری اشرشیاکلی¹ نیز به عنوان آلودگی بیولوژیکی وارد شده به شبکه مورد شبیه‌سازی قرار گرفت.

Vijay و همکاران (2017) از نرم‌افزارهای EPANET و EPANET-MSX برای شبیه‌سازی شبکه آب به منظور مشخص کردن رویه کشف آلودگی‌ها و مدل کیفی آب استفاده کردند. سیستم از یک الگوریتم تشخیص رویداد آلودگی برای تشخیص یک رویداد تصادفی با استفاده از جعبه ابزار EPANET MATLAB استفاده می‌کرد. این تحقیق اثرات وقایع آلودگی و غلظت کلر اولیه بر روی زوال کلر را نشان داد. پارامترهای کیفی از جمله کلر حجمی، آرسنیت محلول تجزیه‌پذیر حجمی و حوادث آلودگی مختلف با استفاده از روش آماری مونت کارلو شبیه‌سازی شد. در این مطالعه از روش DDSM برای شبیه‌سازی هیدرولیکی استفاده شد.

Helbling و VanBriesen (2009) از نرم‌افزار EPANET-MSX برای شبیه‌سازی وقایع آلودگی میکروبی و پاسخ کلر به ورود برخی عوامل میکروبی در شبکه‌های توزیع آب کوچک استفاده کردند. زیرا تغییرات غلظت کلر باقی‌مانده می‌تواند به عنوان شاخصی از آلودگی میکروبی مورد استفاده قرار گیرد (Hall و همکاران، 2007).

Cardoso و همکاران (2018) از نرم‌افزار EPANET-MSX برای شبیه‌سازی واکنش‌های شیمیایی آلودگی پاراتیون (Parathion) در شبکه توزیع آب استفاده کردند که گونه‌های پاراتیون (Parathion)، کلر آزاد و پاراکسون (Paraxon) در طول شبیه‌سازی چندگونه‌ای مدنظر قرار گرفتند. همچنین به منظور تعیین موقعیت استراتژیک سنسورها برای تشخیص به موقع حملات آلودگی، از روش بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شده است (Cardoso و همکاران، 2021).

واکنشی است که بیش از یک گونه واکنش دهنده در آن درگیر است. علاوه بر آن، تغییرات سن آب در سرتاسر یک سیستم توزیع آب نیز از موارد مهم مدیریت کیفی شبکه‌های توزیع آب به‌شمار می‌رود که مدل EPANET-MSX قادر به مدل‌سازی آن است (Shang و همکاران، 2008). سن آب، معادل زمان صرف شده توسط یک ذره آب در شبکه است. سن آب ورودی به شبکه از طریق مخازن یا گره‌های منبع، برابر صفر است. در مدل EPANET-MSX، سن آب را می‌توان به‌عنوان یک جزء واکنشی که رشد آن از سینتیک مرتبه صفر با نرخ ثابت 1 است، (هر لحظه آب یک ثانیه مسن‌تر می‌شود) معرفی نمود. در مطالعات گذشته، اضمحلال کلر توسط مدل‌های گوناگونی مدل‌سازی شده است. در این مطالعه، از مدل مرتبه دو ارائه شده توسط (Clark, 1998) با توجه به دقت بالای آن استفاده می‌شود. این مدل، با در نظر گرفتن همه مواد واکنش دهنده به‌عنوان یک ماده فرضی، یک واکنش فرضی یک‌طرفه به‌صورت رابطه (1) را در نظر می‌گیرد:

$$aA + bB \rightarrow pP \quad (1)$$

که A معرف کلر، B معرف مواد واکنش دهنده فرضی، P محصولات جانبی ناشی از گندزدایی و a ، b و p ضرایب استوکیومتری واکنش هستند. با توجه به واکنش فرض شده، معادلات دیفرانسیلی برای نشان دادن نرخ تغییرات غلظت کلر و مواد اکسید شونده به‌صورت رابطه (2) برقرار هستند:

$$\frac{dC_A}{dt} = -k_A C_A C_B, \quad \frac{dC_B}{dt} = -k_B C_A C_B \quad (2)$$

که به‌ترتیب C و K با اندیس A غلظت و ضریب نرخ زوال مربوط به گندزدا و با اندیس B مربوط به ترکیبات اکسیدشونده هستند. Clark (1998) براساس رابطه (1)، تشکیل محصولات جانبی ناشی از کلرزنی مثل TTHM را به‌صورت تابعی خطی نسبت به کلر مصرف شده و به‌صورت رابطه (3) نشان داد:

$$TTHM(t) = Tx(t) + M \quad (3)$$

که $x(t)$ کل کلر مصرف شده در زمان t ، $T=p/a$ پارامتر مدل که کلر مصرف شده $x(t)$ و TTHM تشکیل شده را به‌هم تبدیل می‌کند و M غلظت TTHM موجود در زمان $t=0$ است. پارامتر T در این مدل بسته به کیفیت آب، ساختمان و ترکیب شیمیایی مواد آلی موجود، می‌تواند تا حدود زیادی منطقه به منطقه متغیر باشد. انتقال مواد در EPANET-MSX طبق معادله انتقال، با فرض اختلاط کامل و لحظه‌ای در گره‌ها و با استفاده از به‌کارگیری روش لاگرانژی

با این که سطح مواد ضدعفونی کننده باقی مانده بالاتر از سطح معینی باشد تعریف کرد.

Ostfeld و همکاران (2002)، Fillion و همکاران (2004)، Tabesh و Dolatkahi (2006)، به‌ترتیب شاخص شکست زمانی کیفیت تحویل شده، شاخص شکست کیفی و شاخص کارایی کیفی شبکه را ارائه کردند که هر یک دارای مشکلات و محدودیت‌هایی است. از جمله محدودیت‌های شاخص‌های قابلیت اطمینان گذشته این است که منحنی‌های جریمه تعریف شده برای کلر آزاد باقی مانده در شبکه تطابق کاملی با استاندارد کیفی آب‌های آشامیدنی نداشته و برای برخی از پارامترها از جمله THM نیز شاخصی ارائه نشده است.

در مطالعه حاضر، نقش غیرقابل انکار تأثیر تحلیل هیدرولیکی HDSM بر روی نتایج تحلیل کیفی شبکه در نظر گرفته شد و مدل تلفیقی تحلیل کیفی چندگونه‌ای EPANET-MSX با مدل تحلیل هیدرولیکی HDSM برای یک شبکه توزیع آب نمونه کوچک متشکل از یک مخزن، 4 گره مصرف و 5 لوله و همچنین شبکه توزیع آب شهر محلات با 237 لوله و 194 گره اجرا شده است. سپس بر اساس ضوابط و استانداردهای کیفی آب آشامیدنی، منحنی‌های جریمه برای پارامترهای کیفی کلر باقی مانده و تری‌هالومتان ارائه و براساس آن، قابلیت اطمینان کیفی شبکه از نظر این دو پارامتر مهم به‌صورت جداگانه و تلفیقی بررسی می‌شود.

2- روش‌شناسی

2-1- تحلیل هیدرولیکی HDSM

در تحلیل هیدرولیکی به‌روش HDSM، جریان خروجی گره‌ای تحت تأثیر و مرتبط با فشار موجود در آن گره است. برای بیان رابطه بین فشار و دبی خروجی در گره‌ها، با توجه به مطالعات (Tabesh, 2016) از فرمول Wagner و همکاران (1988) استفاده شده است. در این مطالعه، روش HDSM توسعه داده شده توسط (Zafari, 2015) با بهره‌گیری از قابلیت Emitter و با استفاده از جعبه‌ابزار نرم‌افزار EPANET2 در محیط برنامه‌نویسی MATLAB به‌کار گرفته شده است.

2-2- تحلیل کیفی چندگونه‌ای

مدل EPANET-MSX مدلی است برپایه موتور هیدرولیکی نرم‌افزار EPANET، برای شبیه‌سازی واکنش‌های پیچیده بین دو یا چندگونه شیمیایی یا بیولوژیکی تشکیل محصولات جانبی گندزدایی ناشی از واکنش بین کلر آزاد و مواد آلی طبیعی (NOM)،

دسته تقسیم می‌کنند. دسته اول پارامترهایی که وجود آن‌ها در آب ضروری است و برای آن‌ها یک مقدار حداقل غلظت مورد نیاز تعریف می‌شود. دسته دوم پارامترهایی که وجود آن‌ها در آب مطلوب نیست و مقدار آن‌ها در شبکه به یک مقدار حداکثری غلظت مجاز محدود می‌شود. در این مطالعه، دو پارامتر کیفی در آب بررسی می‌شود. در ابتدا میزان کلر باقی‌مانده (Gómez-Coronel و همکاران، 2023؛ Tabesh، 2016؛ Coelho، 1996) در گرہ‌ها بررسی و سپس یک منحنی برای مقدار تری‌هالومتان در آب معرفی می‌شود. کلر به عنوان ماده‌ای که برای گندزدایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، جزء دسته اول و تری‌هالومتان به عنوان ماده‌ای که به صورت ناخواسته تولید می‌شود در دسته دوم قرار می‌گیرد. برای ایجاد منحنی جریمه پس از انتخاب متغیرها، شرایط مرزی هر متغیر بر اساس حدود مجاز تعیین شده در آیین‌نامه‌ها، دستورالعمل‌ها و استانداردهای کیفیت منابع آب ایران و جهان همچون استاندارد ملی 1053 مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (ویرایش 1403)، استاندارد کیفیت آب آشامیدنی سازمان جهانی بهداشت (WHO) و استاندارد کیفیت آب سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (U.S.EPA) تعیین می‌شود. وجود کلر باقی‌مانده در آب ضروری است و برای آن، یک مقدار حداقل غلظت مورد نیاز تعریف می‌شود، اما وجود تری‌هالومتان در آب مطلوب نیست و مقدار آن در شبکه به یک مقدار حداکثری غلظت مجاز محدود می‌شود.

2-4-1-1- منحنی جریمه برای کلر باقی‌مانده در گرہ‌ها

منحنی جریمه، در این تحقیق طبق استاندارد 1053، مقدار کلر آزاد باقی‌مانده حداقل 0/2 میلی‌گرم بر لیتر در محل مصرف و مقدار توصیه شده آن پس از مدت زمان نیم ساعت تماس در شرایط عادی، حداقل 0/5 تا 0/8 در هر نقطه از شبکه، برحسب میلی‌گرم بر لیتر است. در این بازه قابلیت عملکرد کلر آزاد باقی‌مانده 1 به مفهوم بهترین حالت سرویس‌دهی است. ضمن این‌که سرویس‌دهی قابل قبول 0/2 و 1 میلی‌گرم بر لیتر با قابلیت عملکرد 0/5 و برای غلظت‌های بیشتر از 5 میلی‌گرم بر لیتر و غلظت صفر حالت عدم سرویس‌دهی با قابلیت عملکرد 0 اختصاص داده می‌شود. این استاندارد، مقدار حداکثر مجاز کلر به عنوان گندزدا در آب آشامیدنی را 5 میلی‌گرم بر لیتر آورده است. سازمان بهداشت جهانی (WHO، 2011)، حداقل و حداکثر غلظت کلر آزاد را در نقطه تحویل 0/2 و 5 میلی‌گرم بر لیتر مجاز اعلام کرده است. بنابراین منحنی جریمه پیشنهادی برای کلر، مطابق شکل (2) است (Tabesh، 2016).

وابسته به زمان (TDM)¹ صورت می‌گیرد و سینتیک واکنش‌های شیمیایی توسط مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیلی معمولی (ODES)² به مدل معرفی می‌شوند. با انتگرال‌گیری از آن‌ها در زمان، تغییرات غلظت گونه‌های موجود، شبیه‌سازی شده و توسط روش‌های انتگرال‌گیری عددی حل می‌شوند.

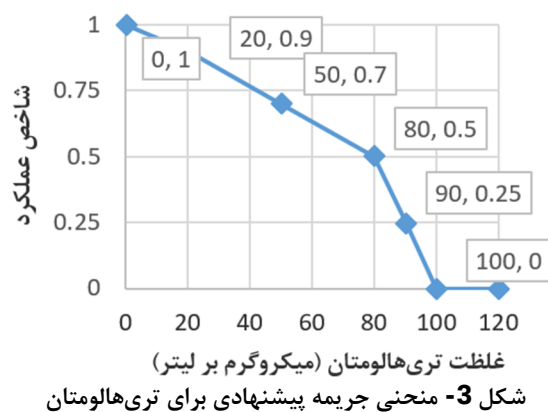
2-3- ارتباط تحلیل هیدرولیکی HDSM و تحلیل کیفی چندگونه‌ای

برای انجام تحلیل هیدرولیکی HDSM در این مطالعه، ابتدا شبکه در نرم‌افزار EPANET شبیه‌سازی شد. سپس در محیط برنامه‌نویسی MATLAB با استفاده از جعبه‌ابزار نرم‌افزار EPANET (Rossman، 2000؛ Maheshwari و همکاران، 2018) و کد توسعه داده شده توسط (Zafari، 2015) با بهره‌گیری از فرمول Wagner و همکاران (1988) محاسبات HDSM انجام شد. برای انجام تحلیل کیفی چندگونه‌ای با استفاده از EPANET-MSX نیاز است تا گونه‌های در تعامل با هم و سینتیک واکنش‌های میان آن‌ها تعریف شوند. این امر کاربران را قادر می‌سازد تا طیف گسترده‌ای از واکنش‌های شیمیایی را مدل کنند. در محیط برنامه‌نویسی MATLAB با استفاده از جعبه ابزار برنامه EPANET-MSX برنامه‌ای نوشته شد که نتایج هیدرولیکی به دست آمده از تحلیل هیدرولیکی HDSM را با فایل مربوط به واکنش‌های EPANET-MSX با پسوند msx تلفیق نموده و از طریق آن می‌توان غلظت گونه‌های تعریف شده و مورد بررسی را به دست آورد. فلوجارت مربوطه در شکل (1) نشان داده شده است. این برنامه توسعه یافته که قابلیت تحلیل هیدرولیکی HDSM و تحلیل کیفی چندگانه را دارا است، به اختصار به صورت EPANET-MSX-HDSM بیان شده است.

2-4-2- قابلیت اطمینان کیفی

2-4-1-1- منحنی‌های جریمه کیفی

معمولاً برای غلظت مجاز مواد موجود در آب حدهای بیشینه یا کمینه تعیین می‌شود. به منظور بررسی دقیق وضعیت یک ماده در آب می‌توان از منحنی جریمه استفاده کرد. بدین ترتیب که تابعی برای مقادیر مختلف غلظت ماده در آب تعریف شود که در آن به مقادیر مختلف غلظت ماده، عددی بین صفر (حالت نامطلوب) و یک (حالت مطلوب) نسبت داده می‌شود. این منحنی نمایانگر عملکرد واقعی شبکه‌های توزیع آب بر اساس پارامترهای مربوط به کیفیت آب است. برای معرفی منحنی جریمه پارامترهای کیفی را به دو

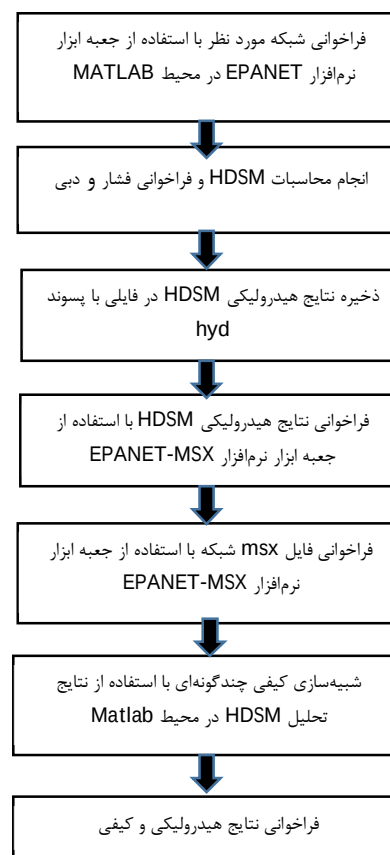


با توجه به مخاطرات بهداشتی تری‌هالومتان‌ها، U.S.EPA در سال 1979 ضوابطی را برای کنترل تری‌هالومتان‌ها در آب آشامیدنی منتشر کرد که طبق آن حداکثر مقدار مجاز (MCL) برای کل تری‌هالومتان‌ها با عنوان متوسط مقدار سالانه در آب آشامیدنی 100 میکروگرم بر لیتر تعیین شد که از سال 1998 تاکنون این مقدار به 80 میکروگرم بر لیتر تقلیل یافته است.

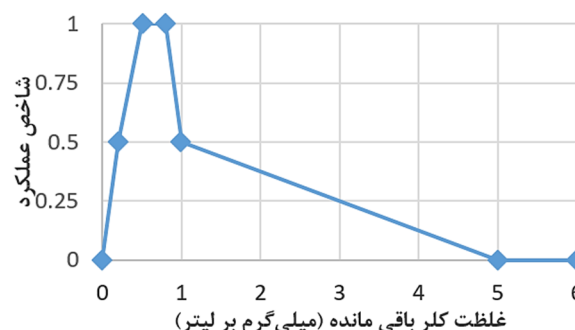
اتحادیه اروپا، مقدار 100 میکروگرم بر لیتر را به‌عنوان حداکثر غلظت مجاز تعریف کرده است. استانداردهای 1053 و WHO، مقدار حداکثر مجاز ترکیبات تری‌هالومتان‌ها در آب آشامیدنی را به‌صورت زیر آورده‌اند: کلروفرم: 0/3 میلی گرم بر لیتر، برمودی کلرومتان: 0/06 میلی گرم بر لیتر، دی‌برموکلرومتان: 0/1 میلی گرم بر لیتر و برموفرم: 0/1 میلی گرم بر لیتر. مجموع این ترکیبات که تری‌هالومتان کل را تشکیل می‌دهد، طبق این دو استاندارد 560 میکروگرم بر لیتر است. اما طبق این دو استاندارد حداکثر غلظت مجاز THM برابر مجموع این چهار ترکیب نیست. با توجه به شکل (3)، در غلظت صفر میلی گرم بر لیتر THM، قابلیت عملکرد 1 به مفهوم بهترین حالت سرویس‌دهی است. با افزایش غلظت از 0 تا 100 میلی گرم بر لیتر قابلیت عملکرد کاهش می‌یابد، به‌طوری که در نقطه 100 میلی گرم بر لیتر و غلظت‌های بیشتر از این مقدار حالت عدم سرویس‌دهی با قابلیت عملکرد 0 اختصاص داده می‌شود.

2-4-2- قابلیت اطمینان کیفی

برای ارزیابی عملکرد کیفی شبکه‌های توزیع آب، محققان مختلف شاخص‌های مختلفی از جمله قابلیت اطمینان کیفی را ارائه داده‌اند. شکست کیفی مربوط به زمانی است که آب فراهم شده توسط شبکه، کیفیت لازم را برای مصرف توسط مصرف‌کنندگان ندارد. در این مطالعه، از رابطه (4) برای محاسبه قابلیت اطمینان کیفی استفاده شده است (Gupta و همکاران، 2012).



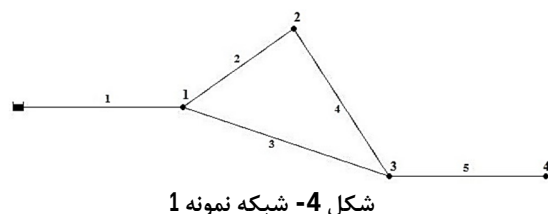
شکل 1- نحوه ارتباط شبیه‌ساز هیدرولیکی HDSM و شبیه‌ساز کیفی چندگونه‌ای



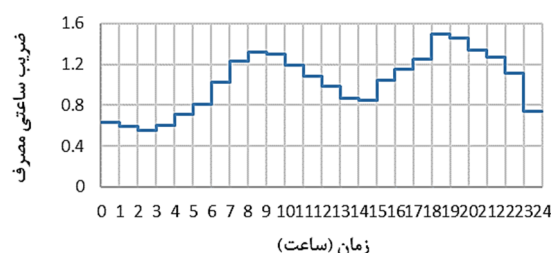
2-4-1-2- منحنی جریمه برای تری‌هالومتان در گر‌ها

منحنی جریمه‌ای که برای تری‌هالومتان پیشنهاد شده، با توجه به حداکثر غلظت مجاز تری‌هالومتان تعیین شده و در شکل (3) قابل مشاهده است. این منحنی براساس استانداردهای 1053، EPA و WHO و استاندارد اتحادیه اروپا که ضوابطی به‌شرح زیر دارند ارائه شده است.

کمترین میزان مصرف برای ساعت 2 تا 3 صبح بوده و بیشترین مصرف در ساعت 18 تا 19 اتفاق می‌افتد. در این شبکه، غلظت ثابت کلر به میزان 1 میلی گرم بر لیتر در گره منبع اعمال شد. تحلیل شبکه به صورت دوره گسترده زمانی و به مدت 72 ساعت صورت گرفت تا غلظت‌ها به حالت پایدار خود برسند. نتایج ارائه شده برای این شبکه و همچنین شبکه نمونه 2، نتایج 24 ساعت شبیه‌سازی است.



شکل 4- شبکه نمونه 1



شکل 5- نوسانات ساعتی مصرف در شبکه نمونه 1

3-1-1-1- نتایج حاصل از مدل‌سازی کیفی با استفاده از نرم‌افزارهای EPANET-MSX و EPANET-MSX-HDSM و مقایسه آن‌ها

ابتدا شبکه با استفاده از نرم‌افزار EPANET-MSX و سپس توسط نرم‌افزار EPANET-MSX-HDSM تحلیل شد. برای مقایسه نتایج حاصل از تحلیل کیفی با استفاده از نرم‌افزارهای EPANET-MSX و EPANET-MSX-HDSM، دو سناریوی فشار نرمال در شبکه و کمبود فشار شبکه ناشی از افت هد مخزن در نظر گرفته شده است. در هر سناریو، نتایج تحلیل کیفی از نظر سن آب، غلظت کلر باقی‌مانده و غلظت تری‌هالومتان حاصل از این دو نرم‌افزار مقایسه شده است. برای مقایسه رفتار شبکه از لحاظ تغییرات سن آب، غلظت کلر باقی‌مانده و تری‌هالومتان تشکیل یافته، در حالت تحلیل شبکه با استفاده از نرم‌افزارهای EPANET-MSX و EPANET-MSX-HDSM، دو گره از شبکه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بدین منظور، گره 1 که گره‌ای نزدیک به مخزن است و همچنین گره 3 که در فاصله نسبتاً دورتری از مخزن قرار گرفته

$$R_{WQ} = \frac{\sum_s \sum_j P_{I_{js}} Q_{js}^{avl} t_s}{\sum_s \sum_j Q_{js}^{req} t_s} \quad (4)$$

که Q_{js}^{avl} دبی موجود در گره j در مرحله s ، Q_{js}^{req} میزان تقاضای گره j در مرحله s ، $P_{I_{js}}$ ضریب عملکردی است که با توجه به میزان کلر باقی‌مانده و تری‌هالومتان در گره‌ها و از ضریب عملکرد شکل‌های (2) و (3) به دست می‌آید (قابلیت عملکرد گره j در مرحله s)، t_s زمان اجرای مرحله s ، j اندیس بیانگر گره تقاضا و s اندیس بیانگر مراحل کار هستند.

2-4-3- شاخص قابلیت اطمینان کیفی تلفیقی کلر باقی‌مانده و تری‌هالومتان تشکیل یافته

افزایش کلر آزاد باقی‌مانده می‌تواند کیفیت میکروبی آب را بهبود دهد در حالی که کیفیت شیمیایی آب را کاهش می‌دهد. امکان دارد برای شبکه حالتی به وجود آید که کیفیت آب از نقطه نظر کلر باقی‌مانده مطلوب باشد اما در شاخص تری‌هالومتان تشکیل یافته، وضعیت شبکه چندان مطلوب نباشد. امکان وجود عکس این حالت نیز وجود دارد. بنابراین لازم است از شاخصی استفاده شود که هر دو پارامتر کلر باقی‌مانده و تری‌هالومتان تشکیل شده را هم‌زمان مد نظر قرار دهد. برای در نظر گرفتن هم‌زمان کلر باقی‌مانده و تری‌هالومتان تشکیل شده، از شاخص قابلیت اطمینان تلفیقی به صورت رابطه (5) استفاده می‌شود.

$$R_{WQ} = \sqrt{R_{WQCL} * R_{WQTHM}} \quad (5)$$

که R_{WQ} شاخص تلفیقی قابلیت اطمینان کیفی آب، R_{WQCL} شاخص قابلیت اطمینان کیفی از نظر کلر باقی‌مانده و R_{WQTHM} شاخص قابلیت اطمینان کیفی از نظر تری‌هالومتان هستند. دلیل ارائه این رابطه به صورت میانگین هندسی شاخص کلر باقی‌مانده و شاخص تری‌هالومتان این است که میانگین هندسی شاخص‌های فوق در حالات حدی (مثل حالتی که مقدار یک شاخص بالا و مقدار دیگری پایین است)، عملکرد بهتری نسبت به میانگین حسابی این دو شاخص دارد.

3- مطالعه موردی

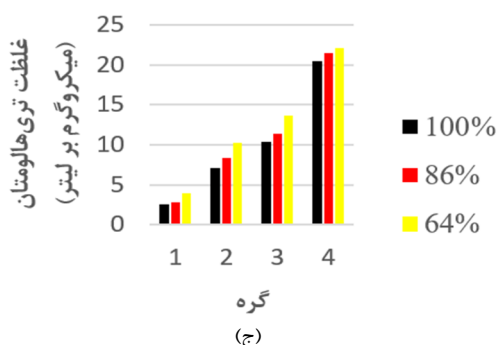
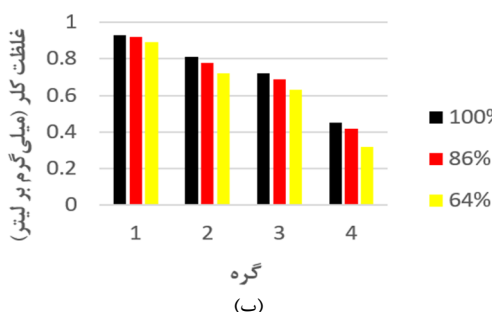
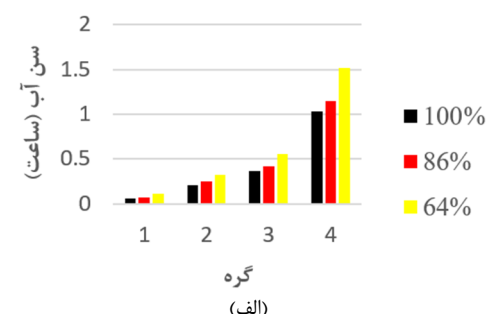
3-1- شبکه نمونه 1

در این مطالعه، شبکه شکل (4) به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. این شبکه، یک شبکه کوچک متشکل از یک مخزن، 4 گره مصرف و 5 لوله است. نمایش هندسی ضرایب مصرف آب در ساعات مختلف شبانه‌روز در شکل (5) نشان داده شده است.

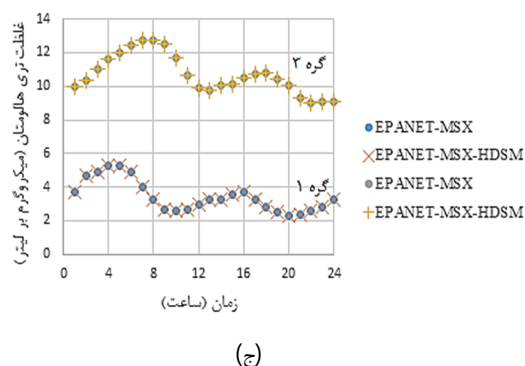
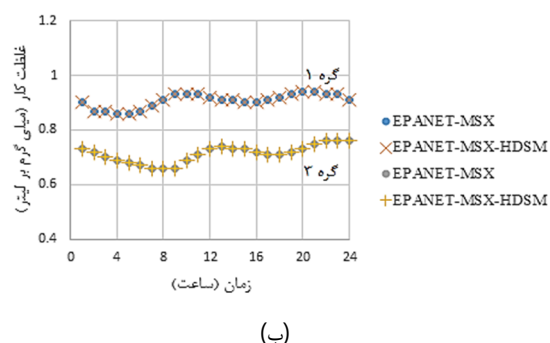
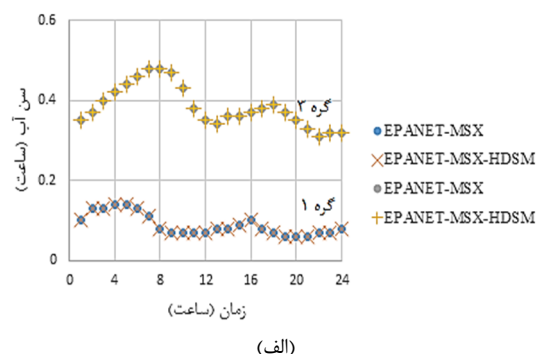
است، به نمایندگی از گره‌های شبکه انتخاب شده‌اند.

3-1-1-1- شرایط نرمال فشار

در این سناریو، شرایطی در نظر گرفته شده است که فشار نرمال در شبکه وجود دارد و تمام تقاضای آب شبکه تأمین می‌شود. در شکل‌های (6)، (7) و (8)، نتایج سن آب، غلظت کلر و غلظت تری‌هالومتان برای دو گره 1 و 3 در دو حالت استفاده از نرم‌افزارهای EPANET-MSX و EPANET-MSX-HDSM مقایسه شده است.



شکل 7- مقایسه نتایج سن آب، غلظت کلر و غلظت تری‌هالومتان: (الف) سن آب، (ب) غلظت کلر، (ج) غلظت تری‌هالومتان



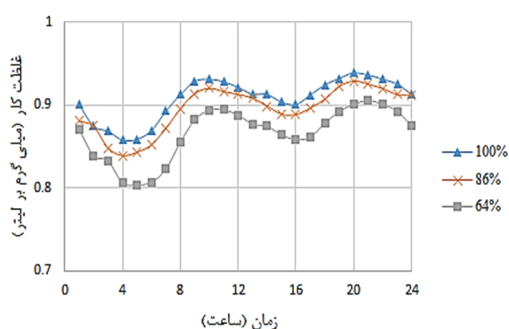
شکل 6- مقایسه نتایج سن آب، غلظت کلر و غلظت تری‌هالومتان در گره‌های 1 و 3 حاصل از EPANET-MSX و EPANET-MSX-HDSM تحت شرایط فشار نرمال: (الف) سن آب، (ب) غلظت کلر، (ج) غلظت تری‌هالومتان

3-1-1-2- شرایط کمبود فشار شبکه ناشی از افت هد مخزن

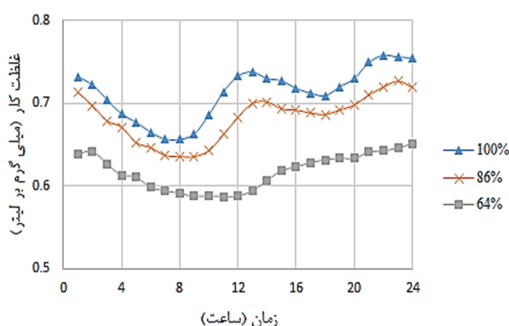
برای ایجاد شرایط کمبود فشار در شبکه، هد مخزن کاهش داده شده است. برای مخزن، هدایی در نظر گرفته شده است که در این هد‌ها نسبت تأمین تقاضا به ترتیب 100، 86 و 64 درصد است. در

مشاهده می‌شود که با کاهش یافتن نسبت تأمین تقاضا، سن آب افزایش یافته است. در گره 1، با کاهش نسبت تأمین تقاضا از 100 درصد به 86 و 64 درصد، سن آب، به ترتیب 16 و 56 درصد افزایش داشته است. در گره 3، با کاهش نسبت تأمین تقاضا از 100 درصد به 86 و 64 درصد، سن آب، به ترتیب 16 و 55 درصد افزایش یافته است. این امر می‌تواند به این دلیل باشد که با کاهش نسبت تقاضا و کاهش فشار، نرخ جریان گرهی کاهش می‌یابد که منجر به کاهش در نرخ جریان لوله‌ای و افزایش سن آب می‌شود.

نمودار تغییرات غلظت کلر در طول 24 ساعت آخر شبیه‌سازی برای گره‌های 1 و 3 در شکل (9) برای 3 سناریوی نسبت تأمین تقاضای مختلف نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل (9) مشاهده می‌شود، با کاهش یافتن نسبت تأمین تقاضا، غلظت کلر باقی‌مانده کاهش یافته است. در گره 1، با کاهش نسبت تأمین تقاضا از 100 درصد به 86 و 64 درصد، غلظت کلر، به ترتیب 1/5 و 5 درصد کاهش داشته است. در گره 3، با کاهش نسبت تأمین تقاضا از 100 درصد به 86 و 64 درصد، غلظت کلر، به ترتیب 4 و 14 درصد کاهش یافته است.



(الف)

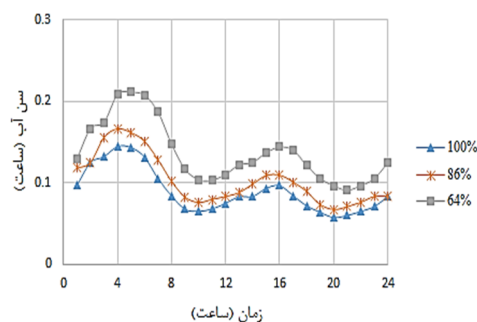


(ب)

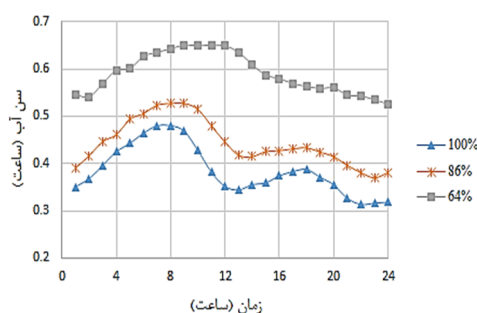
شکل 9- مقایسه نتایج غلظت کلر در گره‌های 1 و 3 با نسبت تأمین تقاضا 100%، 86% و 64% حاصل از نرم‌افزار EPANET-MSX-HDSM: (الف) گره 1، (ب) گره 3

این بخش نتایج تحلیل کیفی حاصل از نرم‌افزار EPANET-MSX-HDSM در قالب سه سناریوی نسبت تأمین تقاضای 100، 86 و 64 درصد ارائه شده است. نسبت تأمین تقاضا، از تقسیم دبی موجود بر تقاضا به دست آمده است. نتایج سن آب، غلظت کلر و غلظت تری‌هالومتان برای گره‌های شبکه برای این نسبت‌های تأمین تقاضا حاصل از نرم‌افزار EPANET-MSX-HDSM در شکل (7) نشان داده شده است.

طبق شکل (7)، هر چقدر که افت فشار اعمالی به شبکه بیشتر می‌شود غلظت کلر کاهش یافته و غلظت تری‌هالومتان و سن آب افزایش می‌یابد. گره 4 که دورترین گره از مخزن است، دارای بالاترین سن آب و غلظت تری‌هالومتان و کمترین غلظت کلر است. به‌طور عکس، در گره 1 که گره‌ای نزدیک مخزن است، کمترین سن آب و غلظت تری‌هالومتان مشاهده می‌شود. این امر با توجه به مسیر اندک و زمان ماند کم آب تا این گره، توجیه‌پذیر است. نمودار تغییرات سن آب در طول 24 ساعت آخر شبیه‌سازی برای گره‌های 1 و 3 در شکل (8) برای 3 سناریوی نسبت تأمین تقاضای مختلف نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل 8- مقایسه نتایج سن آب در گره‌های 1 و 3 با نسبت تأمین تقاضا 100%، 86% و 64% حاصل از نرم‌افزار EPANET-MSX-HDSM: (الف) گره 1، (ب) گره 3

3-1-2- شاخص قابلیت اطمینان کیفی برای ارزیابی عملکرد

شبکه براساس کلر باقی مانده و تری هالومتان تشکیل یافته نتایج محاسبات این شاخص از نظر کلر باقی مانده و تری هالومتان تشکیل شده در حالت استفاده از نتایج خروجی نرم افزارهای EPANET-MSX و EPANET-MSX-HDSM، به ترتیب در جدول های (1) و (2) قابل مشاهده است.

جدول 1- نتایج محاسبات شاخص قابلیت اطمینان کیفی از نظر

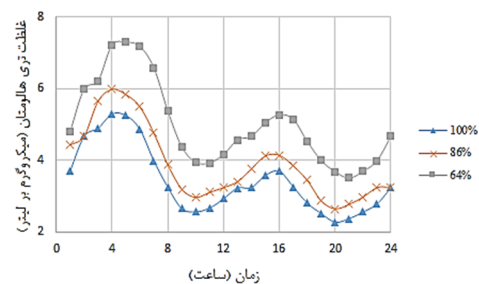
کلر و تری هالومتان با استفاده از نرم افزار EPANET-MSX			
شماره سناریو	نسبت تأمین تقاضا	قابلیت اطمینان از نظر کلر باقی مانده	قابلیت اطمینان از نظر تری هالومتان
سناریوی اول	100	0/908	0/949
سناریوی دوم	86	0/908	0/949
سناریوی سوم	64	0/908	0/949

جدول 2- نتایج محاسبات شاخص قابلیت اطمینان کیفی از نظر

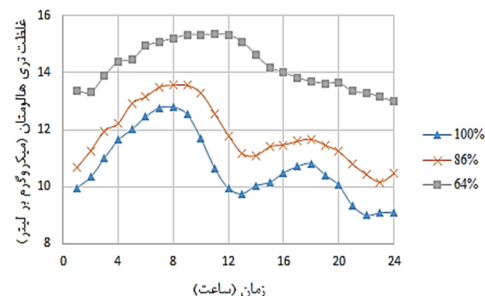
کلر و تری هالومتان با استفاده از نرم افزار EPANET-MSX-HDSM			
شماره سناریو	نسبت تأمین تقاضا	قابلیت اطمینان از نظر کلر باقی مانده	قابلیت اطمینان از نظر تری هالومتان
سناریوی اول	100	0/907	0/949
سناریوی دوم	86	0/784	0/812
سناریوی سوم	64	0/585	0/602

در جدول (1) مشاهده می شود، شاخص قابلیت اطمینان شبکه از نظر هر دو پارامتر کلر باقی مانده و تری هالومتان، در هر سه سناریو با هم یکسان است. با توجه به جدول (2)، در سناریوی دوم، قابلیت اطمینان از نظر کلر، حدود 14 درصد و قابلیت اطمینان از نظر تری هالومتان، حدود 15 درصد کاهش داشته است. در سناریوی سوم، قابلیت اطمینان از نظر کلر، حدود 36 درصد و قابلیت اطمینان از نظر تری هالومتان، حدود 37 درصد کاهش داشته است. علت آن است که با استفاده از نرم افزار EPANET-MSX-HDSM، از آن جا که این نرم افزار از رویکرد مبتنی بر فشار بهره می گیرد، دبی قابل دسترس با دبی مورد نیاز متفاوت خواهد بود. با حرکت به سمت سناریوی سوم و افت بیشتر فشار در شبکه، دبی قابل دسترس نیز کاهش بیشتری می یابد. بنابراین با توجه به فرمول قابلیت اطمینان، صورت کسر نسبت به سناریوی اول کاهش می یابد و عدد قابلیت اطمینان نیز مقدار کمتری به دست می آید. برای در نظر گرفتن هم زمان کلر باقی مانده و تری هالومتان تشکیل شده، شاخص قابلیت اطمینان تلفیقی، با رابطه (5) محاسبه شد و نتایج، در حالت استفاده

علت کاهش غلظت کلر را می توان افزایش سن آب با کاهش مقدار تقاضای فراهم شده در شبکه دانست که در شکل (8) نمایش داده شده است. زیرا افزایش سن و زمان ماند آب، فرصت زوال بیشتری را به کلر داده و این امر موجب می شود که غلظت کلر باقی مانده کاهش یابد. نمودار تغییرات غلظت تری هالومتان در طول 24 ساعت آخر شبیه سازی برای گره های 1 و 3 در شکل (10) برای 3 سناریوی نسبت تأمین تقاضای مختلف نیز نشان داده شده است. مشاهده می شود، با کاهش یافتن نسبت تأمین تقاضا، غلظت تری هالومتان، افزایش یافته است. در گره 1، با کاهش نسبت تأمین تقاضا از 100 درصد به 86 و 64 درصد، غلظت تری هالومتان به ترتیب 14 و 47 درصد افزایش داشته است. در گره 3، با کاهش نسبت تأمین تقاضا از 100 درصد به 86 و 64 درصد، غلظت تری هالومتان، به ترتیب 11 و 34 درصد افزایش یافته است. علت افزایش غلظت تری هالومتان را می توان افزایش سن آب با کاهش مقدار نسبت تأمین تقاضا در شبکه بیان کرد. با افزایش زمان ماند و افزایش سن آب، کلر، فرصت بیشتری برای واکنش با مواد دیگر را پیدا کرده و به این ترتیب دچار زوال شده و غلظت آن کاهش می یابد. در نتیجه این امر، تشکیل تری هالومتان، به عنوان محصول جانبی افزایش می یابد.



(الف)



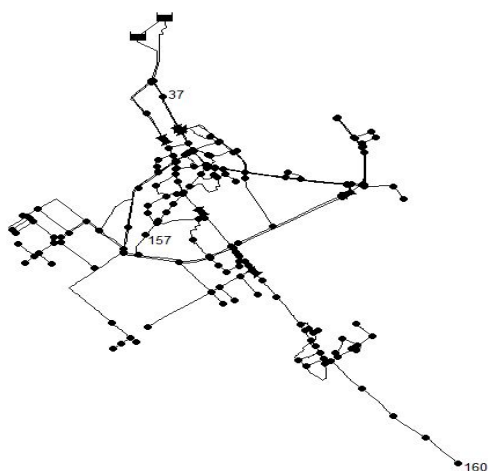
(ب)

شکل 10- مقایسه نتایج غلظت تری هالومتان در گره های 1 و 3

با نسبت تأمین تقاضا 100%، 86% و 64% حاصل از نرم افزار

EPANET-MSX-HDSM: الف) گره 1، ب) گره 3

ساعات مختلف شبانه‌روز در جدول (5) نشان داده شده است. کمترین میزان مصرف برای ساعت 12 بامداد تا 6 صبح بوده و بیش‌ترین مصرف در ساعت 6 صبح تا 12 ظهر اتفاق می‌افتد. در این شبکه، غلظت ثابت کلر به‌میزان 1 میلی‌گرم بر لیتر در گره‌های مخزن اعمال شد. تحلیل شبکه به‌صورت دوره گسترده زمانی و به مدت 24 ساعت صورت گرفت تا اطمینان حاصل شود که غلظت‌ها به حالت پایدار خود رسیده‌اند.



شکل 11- شبکه توزیع آب شهر محلات (Sadra Negar, 2005)

جدول 5- ضرایب مصرف ساعتی برای شبکه نمونه 2

بازه زمانی (ساعت)	6-0	6-12	12-18	18-24
الگوی مصرف	0/4	1/5	1/3	0/8

3-2-1- شرایط کمبود فشار شبکه ناشی از افت هد مخازن
در این بخش، برای کاهش فشار در شبکه، هد مخازن کاهش داده شد و سه سناریو با نسبت تأمین تقاضای آبی شبکه به‌میزان 90، 40 و 30 درصد در نظر گرفته شد که در آن‌ها شبکه، دارای کمبود فشار است. برای بررسی روند تغییرات پارامترهای کیفی سن آب، غلظت کلر و غلظت تری‌هالومتان در شرایط کمبود فشار، سه گره 37، 157 و 160 از قسمت‌های مختلف شبکه توزیع آب محلات انتخاب شدند که در شکل (11)، موقعیت آن‌ها قابل مشاهده است. گره 37 نماینده نقاط نزدیک به مخازن در شبکه است و می‌تواند تغییرات کیفیت آب را در نقاطی با سن آب کمتر نشان دهد. گره 160 یک گره دور از مخازن است و می‌تواند تغییرات کیفیت آب را در نقاط دور شبکه به نمایش بگذارد. گره 157، نماینده نقاطی در شبکه است که سن آب در آن‌ها از گره 160 کمتر و از گره 37 بیشتر است.

از نتایج خروجی نرم‌افزارهای EPANET-MSX و EPANET-MSX-HDSM به‌ترتیب در جدول‌های (3) و (4) آمده است. با توجه به جدول (3)، قابلیت اطمینان در همه سناریوها با هم برابر است. این موضوع طبق جدول (1) و یکسان بودن مقادیر قابلیت اطمینان کلر و تری‌هالومتان در هر 3 سناریو، قابل انتظار است. در این‌جا نیز مشاهده می‌شود که در حالت استفاده از نرم‌افزار EPANET-MSX، خروجی این نرم‌افزار، برای شاخص قابلیت اطمینان کیفی شبکه از نظر پارامترهای کلر و تری‌هالومتان تحت سناریوهای ذکر شده، هیچ تفاوتی قائل نیست.

جدول 3- نتایج محاسبات شاخص قابلیت اطمینان کیفی تلفیقی

با استفاده از نرم‌افزار EPANET-MSX		
شماره سناریو	نسبت تأمین تقاضا	قابلیت اطمینان کیفی تلفیقی
سناریوی اول	100	0/928
سناریوی دوم	86	0/928
سناریوی سوم	64	0/928

جدول 4- نتایج محاسبات شاخص قابلیت اطمینان کیفی تلفیقی

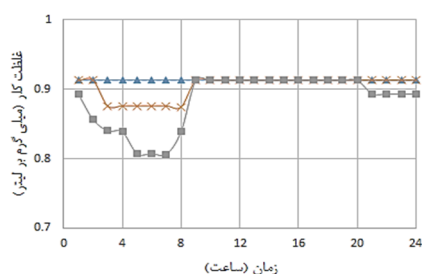
با استفاده از نرم‌افزار EPANET-MSX-HDSM		
شماره سناریو	نسبت تأمین تقاضا	قابلیت اطمینان کیفی تلفیقی
سناریوی اول	100	0/928
سناریوی دوم	86	0/798
سناریوی سوم	64	0/593

طبق جدول (4)، قابلیت اطمینان تلفیقی کلر باقی‌مانده و تری‌هالومتان، در سناریوی دوم نسبت به سناریوی اول، 14 درصد کاهش و در سناریوی سوم، 36 درصد کاهش داشته است. در این‌جا به‌دلیل استفاده از رویکرد HDSM در تحلیل هیدرولیکی در سناریوهای دوم و سوم، دبی قابل دسترس کاهش یافته است که این امر موجب کاهش قابلیت اطمینان می‌شود. از سوی دیگر، کم شدن غلظت کلر و زیاد شدن غلظت تری‌هالومتان در سناریوهای دوم و سوم، با توجه به تأثیری که در عدد PI قرائت شده از منحنی‌های جریمه دارند نیز باعث کاهش قابلیت اطمینان می‌شود.

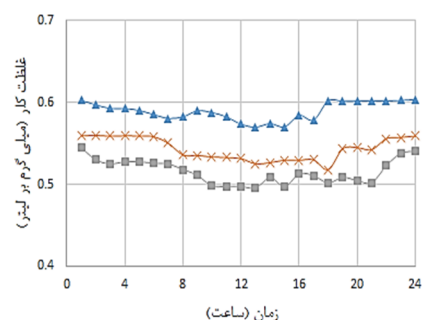
3-2- شبکه نمونه 2 (شبکه توزیع آب محلات)

شبکه توزیع آب شهر محلات با 237 لوله و 194 گره به‌عنوان مطالعه موردی دوم مورد بررسی قرار می‌گیرد. جانمایی شبکه توزیع آب محلات در شکل (11) نشان داده شده و تراز ارتفاعی مخازن 1 و 2 به‌ترتیب 1864/6 و 1840 متر است. ضرایب مصرف آب در

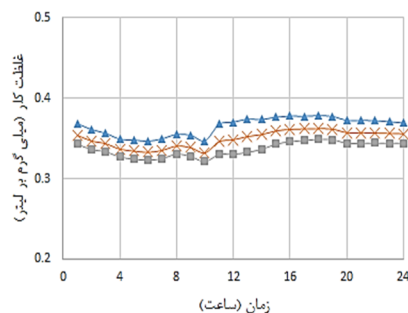
علت آن است که در ساعت‌های 1-7، مصرف آب در گره کم و فشار زیاد است. با توجه به جدول (6) که نوسانات ساعتی مصرف را نشان می‌دهد و همچنین بررسی سرعت مشخص شد که در حدود یک دوم میانی طول نمودار، آب دارای بالاترین سرعت است. در حدود یک چهارم ابتدایی طول نمودار، سرعت، کمترین مقدار را دارد و در مقایسه با ساعات دیگر، اختلاف سرعت قابل ملاحظه‌ای دارد. به همین خاطر، سن آب در این ناحیه، بیشترین مقدار را دارد. در شکل (13) نیز نمودار تغییرات غلظت کلر، برای 24 ساعت آخر شبیه‌سازی به ترتیب برای گره‌های 37، 157 و 160 قابل مشاهده است.



(الف)



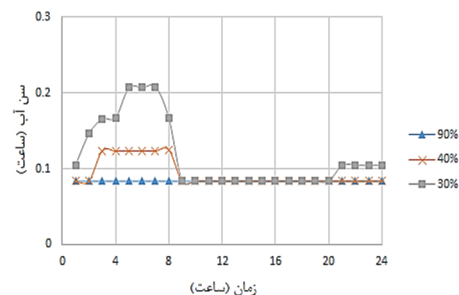
(ب)



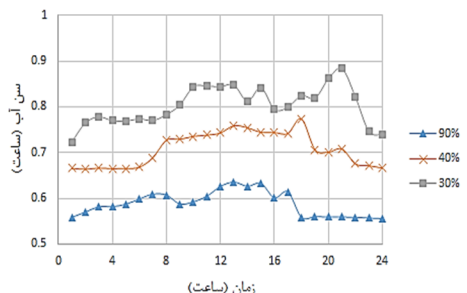
(ج)

شکل 13- نمودار غلظت کلر در گره‌های 37، 157 و 160 با نسبت تأمین تقاضای 90، 40 و 30% حاصل از EPANET-MSX-HDSM: (الف) گره 37، (ب) گره 157، (ج) گره 160

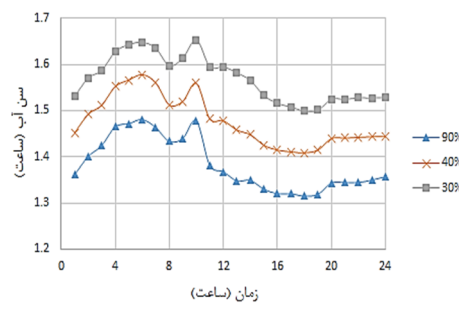
در شکل (12)، نمودار تغییرات سن آب، برای 24 ساعت آخر شبیه‌سازی در سه سناریوی تعریف شده برای گره‌های 37، 157 و 160 نشان داده شده است که با بهره‌گیری از نتایج تحلیل توسط نرم‌افزار EPANET-MSX-HDSM حاصل شده است. با توجه به شکل (12)، نمودار تغییرات سن آب در همه سناریوها افزایشی است. علت را می‌توان این‌طور توضیح داد که با کاهش فشار در شبکه و کاهش سرعت جریان آب، زمان ماند آب در لوله‌ها زیاد شده و سن آب افزایش پیدا می‌کند. در شکل (12-الف)، برای سن آب در گره 37، در قسمت چپ نمودار، تغییرات سن به‌طور محسوس‌تری مشاهده می‌شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل 12- نمودار سن آب در گره‌های 37، 157 و 160 با نسبت تأمین تقاضای 90، 40 و 30% حاصل از EPANET-MSX-HDSM: (الف) گره 37، (ب) گره 157، (ج) گره 160

با توجه به شکل (11)، سن آب نیز برای این گره‌ها روندی افزایشی دارد. این افزایش در سن آب، افزایش در غلظت تری‌هالومتان را به‌خوبی توجیه می‌کند؛ زیرا با افزایش سن آب، مصرف کلر در طول مسیر بیشتر شده و مقدار تری‌هالومتان تولید شده نیز بیشتر می‌شود.

3-2-2- شاخص قابلیت اطمینان کیفی برای ارزیابی عملکرد شبکه براساس کلر باقی‌مانده و تری‌هالومتان تشکیل یافته

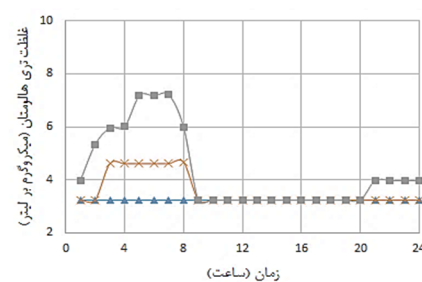
در این بخش، شاخص قابلیت اطمینان کیفی برای سه سناریو مربوط به نسبت تأمین تقاضای آب به میزان 40، 30 و 90 درصد در شبکه بررسی می‌شود. برای محاسبه شاخص‌ها از نتایج تحلیل توسط نرم‌افزار EPANET-MSX-HDSM استفاده شده است. نتایج محاسبات این شاخص در جدول (6) قابل مشاهده است.

جدول 6- نتایج محاسبات شاخص قابلیت اطمینان کیفی از نظر کلر و تری‌هالومتان با استفاده از نرم‌افزار EPANET-MSX-HDSM

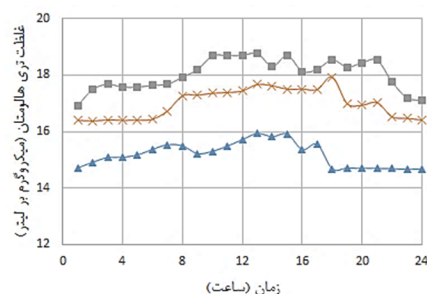
شماره سناریو	نسبت تأمین تقاضا (%)	قابلیت اطمینان از نظر کلر باقی‌مانده	قابلیت اطمینان از نظر تری‌هالومتان
سناریوی اول	90	0/88	0/834
سناریوی دوم	40	0/376	0/359
سناریوی سوم	30	0/268	0/262

با توجه به جدول (7)، قابلیت اطمینان از نظر کلر باقی‌مانده و تری‌هالومتان کاهش یافته است. قابلیت اطمینان از نظر کلر باقی‌مانده و تری‌هالومتان در سناریوی دوم نسبت به سناریوی اول، 57 درصد کاهش یافته است. در سناریوی سوم، 70 درصد کاهش قابلیت اطمینان از نظر کلر باقی‌مانده و 69 درصد کاهش قابلیت اطمینان از نظر تری‌هالومتان نسبت به سناریوی اول مشاهده می‌شود. این کاهش در سناریوی سوم قابل ملاحظه است. علت کاهش در این شاخص در شبکه نمونه 1 نیز مورد بحث قرار گرفت. برای در نظر گرفتن هم‌زمان کلر باقی‌مانده و تری‌هالومتان تشکیل شده، شاخص قابلیت اطمینان تلفیقی محاسبه شد و نتایج در جدول (7) آمده است. با توجه به جدول (7) مشاهده می‌شود که قابلیت اطمینان تلفیقی کلر باقی‌مانده و تری‌هالومتان، در این سناریوها که شبکه با افزایش افت فشار مواجه است روندی کاهشی دارد. قابلیت اطمینان تلفیقی کلر باقی‌مانده و تری‌هالومتان، در سناریوی دوم نسبت به سناریوی اول، 57 درصد کاهش و در

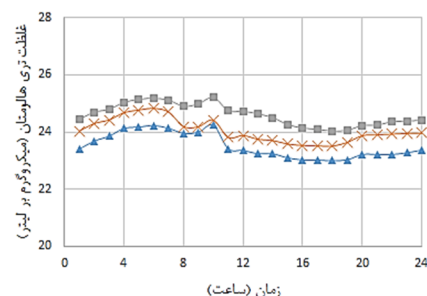
با توجه به شکل (13)، مشاهده می‌شود که غلظت کلر روندی کاهشی دارد. در این سناریوها با افزایش سن آب، کلر باقی‌مانده موجود در آب فرصت خوبی برای واکنش با مواد موجود در آب پیدا کرده و زوال می‌یابد. به همین علت غلظت کلر در گره‌ها کاهش می‌یابد. از مقایسه نمودار غلظت کلر با نمودارهای سن آب برای گره‌های 37، 157 و 160 (شکل (12)) مشاهده می‌شود که در طول 24 ساعت و همچنین در سناریوهای مختلف، در نقاطی که سن آب بیشتر است، غلظت کلر، مقدار کمتری را به خود اختصاص داده است. نمودار تغییرات غلظت تری‌هالومتان، برای 24 ساعت آخر شبیه‌سازی به ترتیب برای گره‌های 37، 157 و 160 در شکل (14) مشاهده می‌شود که در آن غلظت تری‌هالومتان در گره‌های 37، 157 و 160، روندی افزایشی دارد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل 14- نمودار غلظت تری‌هالومتان در گره‌های 37، 157 و 160 با نسبت تأمین تقاضا 90%، 40% و 30% حاصل از EPANET-MSX-HDSM: (الف) گره 37، (ب) گره 157، (ج) گره 160

(توسعه چندگونه‌ای مبتنی بر فشار) و نرم‌افزار EPANET-MSX مشاهده شد که در شرایط وجود فشار نرمال در شبکه، نتایج تحلیل کیفی برای پارامترهای سن آب، غلظت کلر و غلظت تری‌هالومتان، در هر دو حالت نرم‌افزاری با هم یکسان هستند.

(2) نرم‌افزار EPANET-MSX-HDSM، قابلیت استفاده در تمام شرایط عملیاتی فشار اعم از افت فشار به دلایل متعدد را دارد. (3) با توجه به نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار EPANET-MSX-HDSM برای پارامترهای کیفی سن آب، غلظت کلر و غلظت تری‌هالومتان، مشاهده شد که غلظت‌های کلر و تری‌هالومتان به سن آب بستگی دارند. سن آب نیز خود به فشار و سرعت آب درون شبکه، موقعیت گره در شبکه و مشخصات مسیر جریان بستگی دارد.

(4) وقتی از نرم‌افزار EPANET-MSX برای شبیه‌سازی کیفی شبکه استفاده می‌شود، تضمینی برای ارزیابی درست عملکرد کیفی شبکه وجود ندارد. علت این امر، یکسان شدن نتایج شاخص‌های در نظر گرفته شده در تمام شرایط فشاری عملیاتی است.

(5) استفاده از نتایج نرم‌افزار EPANET-MSX-HDSM در تعیین شاخص قابلیت اطمینان تلفیقی (از نظر کلر و تری‌هالومتان)، با کاهش نسبت تأمین تقاضا، کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقدار شاخص را نشان داد. بنابراین، این شاخص در فشارهای متعدد عملیاتی، بسیار متغیر بوده و در برخی شرایط فشاری شبکه، تغییرات بسیار زیاد و چشمگیر است. چنان‌که در شبکه نمونه اول، در سناریویی که در آن 64 درصد تقاضا تأمین می‌شود، کاهش 36 درصدی در قابلیت اطمینان کیفی تلفیقی و در شبکه نمونه دوم، در سناریویی تأمین 30 درصد تقاضا نسبت به سناریویی تأمین 90 درصد تقاضا، کاهش تقریبی 70 درصدی شاخص قابلیت اطمینان کیفی تلفیقی مشاهده می‌شود.

5- مراجع

- Abhijith GR, Salomons E, Ostfeld, A, "Enhancing the reliability of a contamination detection sensors' network in water distribution systems during a cyber-attack", World Environmental and Water Resources Congress, 2023.
<https://doi.org/10.1061/9780784484852>
- Abhijith GR, Kadinski L, Ostfeld A, "Modeling bacterial regrowth and trihalomethane formation in water distribution systems", Water, 2021, 13, 463.
<https://doi.org/10.3390/w13040463>
- Abdy Sayyed MAH, Gupta R, Tanyimboh TT, "Modelling pressure deficient water distribution networks in EPANET", Procedia Engineering, 2014, 89, 626-631.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.487>
- Burkhardt JB, Burkhardt B, Shang F, "Modeling nicotine-

سناریوی سوم، 69 درصد کاهش داشته است. دلایل رخداد این مسئله نیز قبلاً توضیح داده شد.

جدول 7- نتایج محاسبات شاخص قابلیت اطمینان کیفی تلفیقی

با استفاده از نرم‌افزار EPANET-MSX-HDSM

شماره سناریو	نسبت تأمین تقاضا (%)	قابلیت اطمینان کیفی تلفیقی
سناریوی اول	90	0/857
سناریوی دوم	40	0/367
سناریوی سوم	30	0/265

4- نتیجه‌گیری

بررسی عملکرد شبکه‌های توزیع آب شهری بر اساس پارامترهای کیفی آب از جمله کلر باقی‌مانده و تری‌هالومتان از جمله مسائل مورد توجه در سال‌های اخیر است. بدین منظور تحلیل کیفی شبکه باید به‌درستی انجام شود. از طرفی تحلیل کیفی شبکه به‌صورت دقیق، مستلزم انجام تحلیل هیدرولیکی به‌صورت دقیق و نزدیک به واقعیت است. از آن‌جا که مدل‌های هیدرولیکی مرسوم مبتنی بر تقاضا برای سیستم‌های توزیع آب، فرض می‌کنند که تقاضای آب در شبکه به‌طور کامل برآورده می‌شود، این مدل‌ها در شرایط فشار نرمال شبکه به‌درستی عمل می‌کنند. اما تحت شرایط کمبود فشار لازم است که از مدل هیدرولیکی مبتنی بر فشار استفاده شود. برای انجام تحلیل کیفی نیز باید از مدلی استفاده شود که گونه‌های مورد نظر که در تعامل با یکدیگر هستند را به‌طور هم‌زمان مورد بررسی قرار دهد. بدین‌منظور از نرم‌افزار EPANET-MSX استفاده شد که در واقع، توسعه‌ای از نرم‌افزار EPANET است و قابلیت شبیه‌سازی چندگونه شیمیایی و بیولوژیکی در تعامل با یکدیگر را دارد. EPANET-MSX تحلیل کیفی را بر مبنای تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا انجام می‌دهد. برای رفع این مشکل و امکان استفاده از بسته نرم‌افزاری EPANET-MSX که بتواند تحلیل کیفی چندگونه‌ای را توأم با تحلیل هیدرولیکی HDSM انجام دهد، در محیط برنامه‌نویسی متلب، برنامه‌ای تهیه شد که مدل تحلیل هیدرولیکی HDSM را با مدل چندگونه‌ای EPANET-MSX ادغام می‌کند.

شاخص قابلیت اطمینان کیفی برای ارزیابی عملکرد کیفی شبکه از نقطه نظر کلر و THM بررسی شد. روش به‌کار گرفته شده در این مطالعه بر روی دو شبکه توزیع آب پیاده‌سازی شد و نتایج زیر مشاهده شد:

(1) در نتایج حاصل از مقایسه نرم‌افزار EPANET-MSX-HDSM

- of chlorine bulk decay models for planning and management of water distribution systems", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, 41 (20), 1843-1882.
<https://doi.org/10.1080/10643389.2010.495639>
- Gómez-Coronel L, Delgado-Aguinaga JA, Santos-Ruiz I, Navarro-Díaz A, "Estimation of chlorine concentration in water distribution systems based on a Genetic Algorithm", *Processes*, 2023, 11, 676.
<https://doi.org/10.3390/pr11030676>
- Goodarzi D, Abolfathi S, Borzooei S, "Modelling solute transport in water disinfection systems: Effects of temperature gradient on the hydraulic and disinfection efficiency of serpentine chlorine contact tanks", *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 37, 101411.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101411>
- Gopal K, Tripathy SS, Bersillon JL, Dubey SP, "Chlorination byproducts, their toxicodynamics and removal from drinking water", *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 140 (1-2), 1-6.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.10.063>
- Hall J, Zaffiro AD, Marx RB, Kefauver PC, Krishnan ER, Haight RC, Herrmann JG, "On-Line water quality parameters as indicators of distribution system contamination", *Journal of American Water Works Association*, 2007, 99 (1), 66-77.
<http://dx.doi.org/10.1002/j.1551-8833.2007.tb07847.x>
- Helbling DE, VanBriesen JM, "Modeling residual chlorine response to a microbial contamination event in drinking water distribution systems", *Journal of Environmental Engineering*, 2009, 135 (10), 918-927.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000080](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000080)
- Klosterman S, Murray R, Szabo J, Hall J, Uber J, "Modeling and simulation of arsenate fate and transport in a distribution system simulator", In *Water Distribution Systems Analysis*, 2010, 41203, 655-669.
[https://doi.org/10.1061/41203\(425\)62](https://doi.org/10.1061/41203(425)62)
- Lee HM, Yoo DG, Kim JH, Kang D, "Hydraulic simulation techniques for water distribution networks to treat pressure deficient conditions", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2016, 142 (4), 1-6. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000624](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000624)
- Maheshwari A, Abokifa A, Gudi R, Biswas P, "Control of lead contamination in water distribution networks: A dynamic optimization framework", *IFAC-PapersOnLine*, 2020, 53 (1), 277-282.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.06.047>
- Maheshwari A, Abokifa AA, Gudi RD, Biswas P, "Coordinated decentralization-based optimization of disinfectant dosing in large-scale water distribution networks", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2018, 144 (10), 1-14.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000979](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000979)
- Mohseni U, Pathan AI, Agnihotri PG, Patidar N, Zareer SA, induced chlorine loss in drinking water using updated EPANET-MSX", *Journal of Environmental Engineering*, 2023, 149 (12), 1-9.
<https://doi.org/10.1061/joeedu.eeeng-7433>
- Cardoso SM, Barros DB, Oliveira E, Brentan B, Ribeiro L, "Optimal sensor placement for contamination detection: A multi-objective and probabilistic approach", *Environmental Modelling and Software*, 2021, 135, 104896.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104896>
- Cardoso SM, Barros DB, Oliveira E, "Multiobjective optimization and rule extraction for optimum location of quality sensors in water distribution network", In *WDSA/CCWI Joint Conference Proceedings*, 2018.
<https://ojs.library.queensu.ca/index.php/wdsa-ccw/article/view/12144>
- Chang DE, Yoo DG, Kim JH, "A study on the practical pressure-driven hydraulic analysis method considering actual water supply characteristics of water distribution network", *Sustainability (Switzerland)*, 2021, 13 (5), 1-15.
<https://doi.org/10.3390/su13052793>
- Chang K, Gao J, Yuan Y, Wu W, "Water distribution network residual chlorine modeling based on the synergy of chlorine and chlorine dioxide", In *Water Distribution Systems Analysis*, 2010, 678-686.
[http://dx.doi.org/10.1061/41203\(425\)64](http://dx.doi.org/10.1061/41203(425)64)
- Choi YH, "Qualification of hydraulic analysis models for optimal design of water distribution systems", *Applied Sciences (Switzerland)*, 2021, 11 (17).
<https://doi.org/10.3390/app11178152>
- Clark RM, "Chlorine demand and TTHM formation kinetics: A second-order model", *Journal of Environmental Engineering*, 1998, 124 (1), 16-24.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1998\)124:1\(16\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1998)124:1(16))
- Coelho ST, "Performance assessment in water supply and distribution", Ph.D. Thesis, Civil and Offshore Engineering Department, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK, 1996.
- Filion Y, Karney B, Adams B, "Multiobjective design of water networks with random loads", 4th International Symposium on Environmental Hydraulics, International Association of Hydraulic Engineering and Research, Hong Kong, *Environmental Informatics Archive*, 2004, 2 (1), 252-257.
<http://dx.doi.org/10.1201/b16814-216>
- Fisher IH, "Integrated EPANET-MSX process models of chlorine and its by-products in drinking water distribution systems", *Water Environment Research*, 2023, 95 (12), 1-15.
<https://doi.org/10.1002/wer.10949>
- Fisher I, Kastl G, Sathasivan A, Catling R, "Modelling chlorine residual and trihalomethane profiles in water distribution systems after treatment including pre-chlorination", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9 (4), 105686.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105686>
- Fisher I, Kastl G, Sathasivan A, Jegatheesan V, "Suitability

- Tabesh M, Dolatkahi A, "Effects of pressure dependent analysis on quality performance assessment of water distribution networks", Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering, 2006, 30 (B1), 9-13.
https://www.sid.ir/EN/VEWSSID/J_pdf/8542006B110.pdf
- Vijay M, Porwal S, Jain SC, Botre BA, "Chlorine decay modelling in water distribution system case study: CEERI Network", In International Conference on Next Generation Computing Technologies, 2017, 430-443.
https://doi.org/10.1007/978-981-10-8657-1_33
- Wang Y, Zhu G, "Evaluation of water quality reliability based on entropy in water distribution system", Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2021, 584, 126373.
<https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126373>
- Wang Y, Zhu J, Zhu G, "Water quality reliability based on an improved entropy in a water distribution system", Aqua Water Infrastructure, Ecosystems and Society, 2022, 71 (7), 862-877.
<https://doi.org/10.2166/aqua.2022.066>
- Wagner JM, Shamir U, Marks DH, "Water distribution reliability: simulation methods", Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE), 1988, 114 (3), 276-294.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339496\(1988\)114:3\(276\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339496(1988)114:3(276))
- World Health Organization (WHO), Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, Incorporating the 1st addendum, Malta, 2011.
- Zafari M, "Minimizing the effects of pollution spread in urban water networks using pressure-based hydraulic analysis", Master's Thesis, Faculty of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, 2015.
- Zanjani S, "Investigation of widespread contamination in urban water distribution networks", Master's Thesis, Faculty of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, 2015.
- Zilin L, Haixing L, Chi Zh, Guangtao F, "Real-time water quality prediction in water distribution networks using graph neural networks with sparse monitoring data", Water Research, 250, 121018, ISSN0043-1354, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.121018>
- Zuthi MFR, Khan F, Sajol MS, Kabir M, Kaiser NM, Rahman MS, Hasan SM, "Combined application of EPANET and empirical model for possible formation of trihalomethanes in water distribution network of Chattogram city to identify potential carcinogenic health risk zone", Heliyon, 9 (2023), e16615.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16615>
- Kalyan D, Saran V, Patel D, Prieto C, "Design and analysis of water distribution network using Epanet 2.0 and Loop 4.0-A case study of Narangi Village", Lecture Notes in Networks and Systems, 2022, 371, 671-684.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-93247-3_65
- Najafzadeh M, Homaei F, Mohamadi S, "Reliability evaluation of groundwater quality index using data-driven models", Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29 (6), 8174-8190.
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-16158-6>
- Ostfeld A, Kogan D, Shamir U, "Reliability simulation of water distribution systems-single and multiquality", Urban Water, 2002, 4 (1), 53-61.
[https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(01\)00055-3](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00055-3)
- Reddy LS, Elango K, "Analysis of water distribution networks with head-dependent outlets", Civil Engineering Systems, 1989, 6 (3), 102-110.
<http://dx.doi.org/10.1080/02630258908970550>
- Rodriguez MJ, Sérodes J-B, Levallois P, Proulx F, "Chlorinated disinfection by-products in drinking water according to source, treatment, season, and distribution location", Journal of Environmental Engineering and Science, 2007, 6 (4), 355-365.
<https://doi.org/10.1139/s06-055>
- Rossman LA, EPANET 2: Users manual, Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH, 2000.
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1007WWU.TXT>
- Sadra Negar Consulting Engineers, "Optimization studies of water distribution system in mahallat city", Water and Wastewater Company of Markazi Province, Iran, 2005.
- Sarisen D, Koukoravas V, Farmani R, Kapelan Z, Memon FA, "Review of hydraulic modelling approaches for intermittent water supply systems", Aqua Water Infrastructure, Ecosystems and Society, 2022, 71 (12), 1291-1310.
<https://doi.org/10.2166/aqua.2022.028>
- Seyoum AG, Tanyimboh TT, "Integration of hydraulic and water quality modelling in distribution networks: EPANET-PMX", Water Resources Management, 2017, 31, 4485-4503.
<https://doi.org/10.1007/s11269-017-1760-0>
- Shang F, Uber JG, Rossman LA, EPANET multi-species extension user's manual, Risk Reduction Engineering Laboratory, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, February, 2008.
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P100XGNO.TXT>
- Tabesh M, "Advanced modeling of water distribution networks", University of Tehran Press, Second Edition, Tehran, Iran, 2016.
- Tabesh M, "Implications of the pressure dependency of outflows of data management, mathematical modelling and reliability assessment of water distribution systems", PhD Thesis, University of Liverpool, UK, 1998.