



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، تهران

² دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران

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

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 به دور از واقعیت ارائه می‌دهند. از سوی دیگر، برای شبیه‌سازی کیفی آب، رویکرد تک‌گونه‌ای، ناکارآمد و تا حدودی غیر واقعی 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 شبیه‌سازی کیفی چندگونه‌ای EPANET-MSX توسعه داده شده است. این برنامه توسعه‌یافته 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. چنان که 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

قابل قبولی تنظیم شود (Goodarzi و همکاران، 2020؛ Wang و zhu، 2022). با کلرزی آب حاوی مواد آلی طبیعی² (NOM)، محصولات جانبی گندزدایی³ (DBPs) از قبیل تری‌هالومتانها⁴ (THMs) و هالوآستیک اسیدها⁵ (HAAs) تشکیل می‌شوند که به‌عنوان موادی سرطان‌زا شناخته شده‌اند و مشکلاتی در طعم و بو نیز ایجاد می‌کنند (Goodarzi و همکاران، 2020؛ Gopal و همکاران، 2007)، بنابراین علاوه بر غلظت کلر، غلظت تری‌هالومتانها نیز باید کنترل شود و در محدوده‌ی استاندارد

در دهه‌های اخیر، صنعتی شدن و رشد اقتصادی-اجتماعی منجر به افزایش روزافزون آلودگی محیط‌زیست 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 به شمار بیاید. به همین دلیل مواد ضدعفونی کننده باقیمانده در سیستم توزیع آب¹ (WDS) (Zilin و همکاران، 2024) برای کنترل آلودگی میکروبیولوژیکی باید در سطح



ناشر: معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز شاپا الکترونیکی: 2717-4077

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: 021-66498981

<https://doi.org/10.22034/CEEJ.0000.00000.0000>

* Orcid Cod Corresponding Author: 0000-0002-8982-8941

آدرس ایمیل: mtabesh@ut.ac.ir (م. تابش)، sajjadi.fatemeh@alumni.ut.ac.ir (ف. سجادی)، niloufarkarimi@ut.ac.ir (ن. کریمی).

1Water Distribution System
2 Natural Organic Matter
3Disinfection By-products
4Trihalomethanes
5Haloacetic Acids

(Mohseni و همکاران، 2022؛ Abdy Sayyed و همکاران، 2014) این مدل، شبیه‌سازی اضمحلال کلر، رشد DBPs و سن آب را ممکن می‌سازد (Rossman، 2000). در واقع این مدل، یک مدل تک‌گونه ای و محدود به ردیابی دینامیکی یک جزء شیمیایی تک مانند کلر، یا سن آب است و قابلیت شبیه‌سازی گونه‌های چندگانه (چند گونه-ی در تقابل با هم) را ندارد (Shang و همکاران، 2008). EPANET-MSX توسعه‌ای بر نرم‌افزار EPANET است که بر مبنای تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا، شبیه‌سازی گونه‌های کیفی در تعامل با یکدیگر را به‌طور همزمان ممکن می‌سازد (Sayed Abdy و همکاران، 2014).

مدل‌سازی کیفیت آب چند گونه‌ای برای شبیه‌سازی واکنش‌های شیمیایی پیچیده در سیستم‌های توزیع آب آشامیدنی حیاتی است و محققان مختلف از این نرم‌افزار به منظور شبیه‌سازی کیفی چندگونه‌ای استفاده کرده‌اند. مدل‌های یکپارچه فرآیند EPANET-MSX کلر و محصولات جانبی آن در سیستم‌های 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) مدل‌سازی پروفیل‌های کلر باقی‌مانده و تری‌هالومتان را در سیستم‌های توزیع آب پس از تصفیه (پیش کلرزی) با استفاده از ابزار EPANET-MSX ارائه نمودند. در تحقیقات دیگری مدل‌سازی رشد مجدد باکتری‌ها و تشکیل تری‌هالومتان در سیستم‌های توزیع آب (Abhijith و همکاران، 2021) و بررسی بهینه‌سازی 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 شبکه‌های توزیع آب توسط مدل کیفی EPANET-MSX اجرا شده است (Maheshwari و همکاران، 2020).

Chang و همکاران (2010) یک مدل چندگونه‌ای کیفیت آب شبکه توزیع آب برای محاسبه ی کلر باقی‌مانده بر اساس گندزدایی هم‌زمان به‌وسیله کلر و دی‌اکسیدکلر با استفاده از ابزار EPANET-MSX را 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. زنجانی (1394) آلودگی گسترده شبکه‌های توزیع آب شهری را بررسی کرد. در این تحقیق، به‌منظور شبیه‌سازی وقایع آلودگی شیمیایی و بیولوژیکی از برنامه EPANET-MSX استفاده شد.

NOM باشد. اثر تجزیه‌ی بیولوژیکی مواد آلی مانند اسیدهای آمینه، اسیدهای چرب، فنل، استروئیدها، هیدروکربن‌ها، پلیمرها و غیره تشکیل می‌شود (Gopal و همکاران، 2007) و کلر نیز که یک اکسیدکننده‌ی قوی است بسیاری از مواد آلی طبیعی را که پس از تصفیه در آب باقی‌مانده است اکسید می‌کند. واکنش کلر با مواد آلی طبیعی، موجب شکل‌گیری محصولات جانبی ضد عفونی می‌شود که برای سلامتی انسان مضر هستند. برخی از این واکنش‌ها نیز طعم یا بوی بدی را تولید می‌کنند که موجب رنجش مصرف کنندگان می‌شود (Zhu و Wang، 2022؛ Fisher و همکاران، 2011). تری‌هالومتان‌ها شامل کلروفرم، دی‌کلروبرومومتان، دی‌برموکلرومتان و برموفرم هستند. مجموع این چهار ماده به‌عنوان تری‌هالومتان کل¹ (TTHMs) شناخته می‌شود (Rodriguez و همکاران، 2007).

امروزه نرم‌افزارهای گوناگونی برای تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب وجود دارد. تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب را می‌توان به دو صورت مبتنی بر تقاضا² (DDSM) یا مبتنی بر فشار³ (HDSM) انجام داد. (Lee و همکاران، 2016؛ Sarisen و همکاران، 2022؛ Chang و همکاران، 2021). مدل‌های شبیه‌سازی مبتنی بر تقاضا، با ثابت در نظر گرفتن دبی برداشتی از گره‌ها بدون در نظر گرفتن میزان فشار موجود با واقعیت در تطابق نیستند و ممکن است باعث نتایج غیرواقعی مانند فشار منفی شوند. در واقعیت، مقدار قابل برداشت در هر گره وابسته به فشار موجود در آن گره است. بنابراین مدل‌های 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 نمی‌دهد (تابش، 1998؛ Reddy و Elango، 1989؛ Choi، 2021). برای شبیه‌سازی عملکرد واقعی شبکه، لازم است رابطه‌ی بین فشار و دبی در گره‌ها در نظر گرفته شود. این نوع از تحلیل، تحلیل مبتنی بر فشار نامیده می‌شود. این روش می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مناسب برای نشان دادن عملکرد واقعی یک شبکه مورد استفاده قرار گیرد (Chang و همکاران، 2021). EPANET2 یک مدل هیدرولیکی و کیفی آب متداول است که بر مبنای تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا، برای شبیه‌سازی فرایندهای کیفیت آب در سیستم‌های توزیع آب مورد استفاده قرار می‌گیرد و این امکان را می‌دهند تا ویژگی‌های فیزیکی شبکه، تقاضای آب و سایر عوامل را برای شبیه‌سازی رفتار شبکه و شناسایی مشکلات بالقوه برای بهبود را مدل‌سازی کنند.

¹Total Trihalomethanes

²Demand Driven Simulation Method

³ Head Driven Simulation Method

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 تامین دبی در گره‌ها بستگی دارد. مطالعه Zuthi و همکاران (2023) در شهر چاتگرام 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 گره‌ها غلظت‌های THMs بالای 150 میکروگرم در لیتر را نشان دادند، در حالی که این میزان برای اکثر (99٪) گره‌ها 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 شبیه سازی و به‌دست 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 کرده اند. (Mays، 2002) قابلیت اطمینان کیفی آب را به‌صورت احتمال این‌که غلظت آلاینده از حداکثر سطح آلاینده $^{2}(MCL)$ تجاوز نکند یا این‌که سطح مواد ضدعفونی‌کننده باقی‌مانده 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 باقی‌مانده 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

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 به‌عنوان 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 به‌عنوان شاخصی از آلودگی میکروبی مورد استفاده قرار گیرد (Hall و همکاران، 2007). Cardoso و همکاران (2018) از نرم‌افزار EPANET-MSX برای شبیه سازی 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 چند هدفه استفاده شده است (Cardoso و همکاران، 2021). مدل‌های تحلیل پارامترهای کیفیت آب براساس EPANET به دلیل تحلیل تک گونه 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 Tiku و Alemtsehay (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

²Maximum Contaminant Level

¹Escherichia coli

یک ماده فرضی، یک واکنش فرضی یک طرفه به صورت رابطه (1) را در نظر می گیرند:



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 به صورت 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 به ترتیب C و k با اندیس A غلظت و ضریب نرخ زوال مربوط به گندزدا و با اندیس B مربوط به ترکیبات اکسید شونده هستند. Clark (1998) براساس رابطه (1)، تشکیل محصولات جانبی ناشی از کلر زنی مثل TTHM را به صورت تابعی خطی نسبت به کلر مصرف شده و به صورت رابطه (3) نشان داد:

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

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 به هم تبدیل می کند 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، می تواند تا حدود زیادی منطقه به منطقه متغیر باشد. انتقال مواد در EPANET-MSX طبق معادله انتقال، با فرض اختلاط کامل و لحظه ای در گره ها و با استفاده از به کارگیری روش لاگرانژی وابسته به زمان¹ (TDM) صورت می گیرد و سینتیک واکنش های شیمیایی توسط مجموعه ای از معادلات دیفرانسیلی معمولی² (ODES) به مدل معرفی می شوند. با انتگرال گیری از آن ها در زمان، تغییرات غلظت گونه های موجود، شبیه سازی شده و توسط روش های انتگرال گیری عددی حل می شوند.

3-2- ارتباط تحلیل هیدرولیکی HDSM و تحلیل کیفی چندگونه ای

برای انجام تحلیل هیدرولیکی HDSM در این مطالعه، ابتدا شبکه در نرم افزار EPANET شبیه سازی شد. سپس در محیط برنامه نویسی MATLAB با استفاده از جعبه ابزار نرم افزار EPANET (Rossman, 2000; Maheshwari و همکاران، 2018) و کد توسعه داده شده

تلفیقی تحلیل کیفی چندگونه ای 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، منحنی های جریمه برای پارامترهای کیفی کلر باقی مانده و تری هالومتان ارائه و براساس آن، قابلیت اطمینان کیفی شبکه از نظر این دو پارامتر مهم به صورت جداگانه و تلفیقی بررسی می شود.

2- روش شناسی

2-1- تحلیل هیدرولیکی HDSM

در تحلیل هیدرولیکی به روش HDSM، جریان خروجی گره ای تحت تأثیر و مرتبط با فشار موجود در آن گره است. برای بیان رابطه بین فشار و دبی خروجی در گره ها، با توجه به مطالعات (تابش، 1395) از فرمول Wagner و همکاران (1988) استفاده شده است. در این مطالعه، روش HDSM توسعه داده شده توسط (ظفری، 1394) با بهره گیری از قابلیت Emitter و با استفاده از جعبه ابزار نرم افزار EPANET2 در محیط برنامه نویسی MATLAB به کار گرفته شده است.

2-2- تحلیل کیفی چندگونه ای

مدل EPANET-MSX مدلی است بر پایه موتور هیدرولیکی نرم افزار EPANET، برای شبیه سازی واکنش های پیچیده بین دو یا چند گونه شیمیایی یا بیولوژیکی. تشکیل محصولات جانبی گندزدایی ناشی از واکنش بین کلر آزاد و مواد آلی طبیعی (NOM)، 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 شبکه های توزیع آب به شمار می رود که مدل EPANET-MSX قادر به مدل سازی 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 گره های منبع، برابر صفر است. در مدل EPANET-MSX، سن آب را می توان به عنوان یک جزء واکنشی که رشد آن از سینتیک مرتبه صفر با نرخ ثابت 1 است، (هر لحظه آب یک ثانیه مسن تر می شود) معرفی نمود. در مطالعات گذشته، اضمحلال کلر توسط مدل های گوناگونی مدل سازی شده است. در این مطالعه، از مدل مرتبه دو ارائه شده توسط (Clark, 1998) با توجه به دقت بالای آن استفاده می شود. این مدل، با در نظر گرفتن همه مواد واکنش دهنده به عنوان

²Ordinary Differential Equations

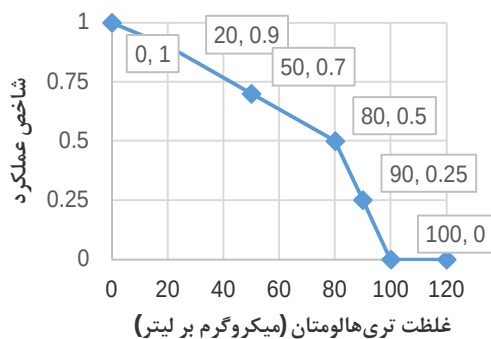
¹ Lagrangian Time Driven Method

توسط (ظفری، 1394) 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 برنامه نویسی MATLAB با استفاده از جعبه ابزار برنامه EPANET-MSX برنامه‌ای نوشته شد که نتایج هیدرولیکی به‌دست 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. فلوچارت 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.

2-1-4-1-1- منحنی جریمه برای کلر باقی مانده در گره ها

2-4-1- منحنی‌های جریمه کیفی

معمولاً برای غلظت مجاز مواد موجود در آب حدهای بیشینه یا کمینه تعیین می‌شود. به‌منظور 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 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؛ تابش، 1395 و Coelho، 1996) در گره‌ها 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 به‌عنوان ماده‌ای که به‌صورت 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 موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (ویرایش 1403)،



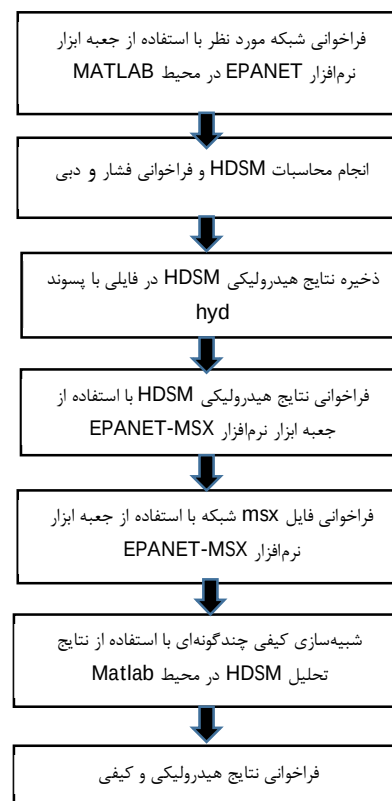
شکل 3- منحنی جریمه پیشنهادی برای تری هالومتان

با توجه به مخاطرات بهداشتی تری هالومتان ها، U.S.EPA در سال 1979 ضوابطی را برای کنترل تری هالومتان ها در آب آشامیدنی منتشر کرد که طبق آن حداکثر مقدار مجاز (MCL) برای کل تری هالومتان ها 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 به عنوان حداکثر غلظت مجاز تعریف کرده است. استانداردهای 1053 و WHO، مقدار حداکثر مجاز ترکیبات تری هالومتان ها در آب آشامیدنی را به صورت زیر آورده اند: کلروفرم: 0/3 میلی گرم بر لیتر، برمودی کلرومتان: 0/06 میلی گرم بر لیتر، دی برموکلرومتان: 0/1 میلی گرم بر لیتر و برموفرم: 0/1 میلی گرم بر لیتر. مجموع این ترکیبات که تری هالومتان کل را تشکیل می دهد، طبق این دو استاندارد 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 مشاهده می شود در غلظت صفر میلی گرم بر لیتر THM، قابلیت عملکرد 1 به مفهوم بهترین حالت سرویس دهی است. با افزایش غلظت از 0 تا 100 میلی گرم بر لیتر قابلیت عملکرد کاهش می یابد، به طوری که در نقطه 100 میلی گرم بر لیتر و غلظت های بیشتر از این مقدار حالت عدم سرویس دهی با قابلیت عملکرد 0 اختصاص داده می شود.

2-4-2- قابلیت اطمینان کیفی

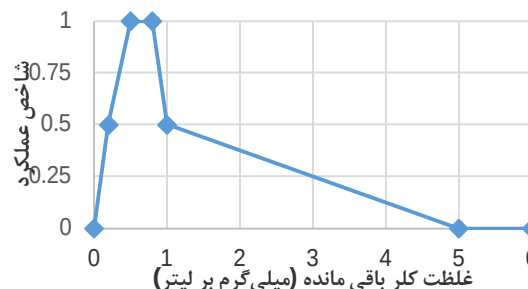
برای ارزیابی عملکرد کیفی شبکه های توزیع آب، محققان مختلف شاخص های مختلفی از جمله قابلیت اطمینان کیفی را ارائه داده اند. شکست کیفی مربوط به زمانی است که آب فراهم شده توسط شبکه، کیفیت لازم را برای مصرف توسط مصرف کنندگان ندارد. در این مطالعه، از رابطه (4) برای محاسبه



شکل 1- نحوه ارتباط شبیه ساز هیدرولیکی HDSM و شبیه ساز کیفی چندگونه ای

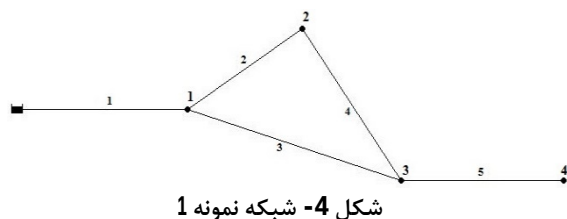
2-4-2-1-2- منحنی جریمه برای تری هالومتان در گر ها

منحنی جریمه ای که برای ترهالومتان پیشنهاد شده، با توجه به حداکثر غلظت مجاز تری هالومتان تعیین شده و در شکل 3 قابل مشاهده است. این منحنی براساس استانداردهای 1053، EPA و WHO و استاندارد اتحادیه اروپا که ضوابطی به شرح زیر دارند ارائه شده است.



شکل 2- منحنی جریمه پیشنهادی برای کلر آزاد باقی مانده

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 شبیه سازی است.



شکل 4- شبکه نمونه 1



شکل 5- نوسانات ساعتی مصرف در شبکه نمونه 1

3-1-1- نتایج حاصل از مدل سازی کیفی با استفاده از نرم افزارهای EPANET-MSX و EPANET-MSX-HDSM و مقایسه آن‌ها

ابتدا شبکه با استفاده از نرم افزار EPANET-MSX و سپس توسط نرم افزار EPANET-MSX-HDSM تحلیل شد. برای مقایسه نتایج حاصل از تحلیل کیفی با استفاده از نرم افزارهای 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 باقی مانده و غلظت تری هالومتان حاصل از این دو نرم افزار مقایسه شده است. برای مقایسه رفتار شبکه از لحاظ تغییرات سن آب، غلظت کلر باقی مانده و تری هالومتان تشکیل یافته، در حالت تحلیل شبکه با استفاده از نرم افزارهای 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 است، به نمایندگی از گره‌های شبکه انتخاب شده‌اند.

قابلیت اطمینان کیفی استفاده شده است (Gupta و همکاران، 2012).

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

که Q_{js}^{avl} : دبی موجود در گره j در مرحله s ، Q_{js}^{req} : میزان تقاضای گره j در مرحله s ، P_{js} : ضریب عملکردی است که با توجه به میزان کلر باقی مانده و تری هالومتان در گره‌ها و از ضریب عملکرد شکل-های 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.

3-4-2- شاخص قابلیت اطمینان کیفی تلفیقی کلر

باقی مانده و تری هالومتان تشکیل یافته

افزایش کلر آزاد باقی مانده 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 باقی مانده مطلوب باشد اما در شاخص تری هالومتان 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 باقی مانده و تری هالومتان تشکیل شده را هم زمان مد نظر قرار دهد. برای در نظر گرفتن هم زمان کلر باقی مانده و تری هالومتان 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 باقی مانده و R_{WQTHM} : شاخص قابلیت اطمینان کیفی از نظر تری هالومتان هستند. دلیل ارائه این رابطه به صورت میانگین هندسی شاخص کلر باقی مانده و شاخص تری هالومتان 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.

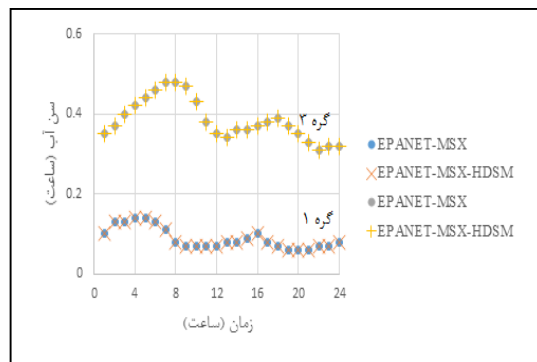
3- مطالعه موردی

3-1- شبکه نمونه 1

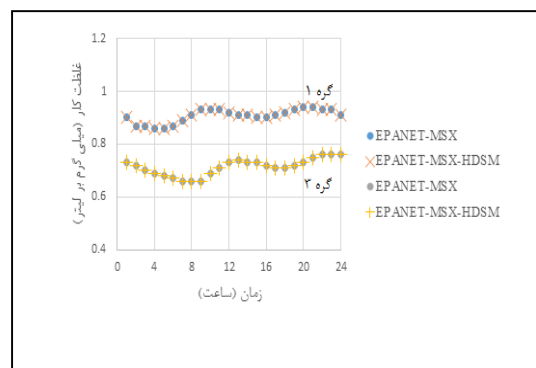
در این مطالعه، شبکه شکل 4 به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. این شبکه، یک شبکه کوچک متشکل از یک مخزن، 4 گره مصرف و 5 لوله است. نمایش هندسی ضرایب مصرف آب در ساعات مختلف شبانه روز در شکل 5 نشان داده

3-1-1-1- شرایط نرمال فشار

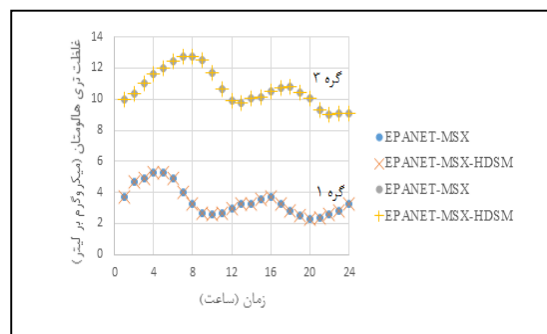
در این سناریو، شرایطی در نظر گرفته شده است که فشار نرمال در شبکه وجود دارد و تمام تقاضای آب شبکه تأمین می‌شود. در شکل‌های 6، 7 و 8، نتایج سن آب، غلظت کلر و غلظت تری‌هالومتان برای دو گره 1 و 3 در دو حالت استفاده از نرم‌افزارهای EPANET-MSX و EPANET-MSX-HDSM مقایسه شده است.



(الف) سن آب



(ب) غلظت کلر



(پ) 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

با توجه به شکل 6، هر دو نرم‌افزار EPANET-MSX و EPANET-MSX-HDSM، خروجی یکسانی برای پارامترهای سن آب، غلظت کلر باقی‌مانده و غلظت تری‌هالومتان، تحت شرایطی که در شبکه، فشار نرمال وجود دارد داشته است. در گره 1 که گره‌ای نزدیک به مخزن است، پارامترهای سن آب و غلظت تری‌هالومتان در مقایسه با گره 3 مقدار کمتری را نشان داده است، درحالی‌که غلظت کلر باقی‌مانده در این گره، بیشتر از گره 3 است.

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، هد هایی در نظر گرفته شده است که در این هد ها نسبت تأمین تقاضا به ترتیب 100، 86 و 64 درصد است. در 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. 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

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 می‌شود که غلظت کلر باقی‌مانده کاهش یابد.

نمودار تغییرات غلظت تری‌هالومتان در طول 24 ساعت آخر شبیه‌سازی برای گره‌های 1 و 3 در شکل 10 برای 3 سناریوی نسبت تأمین تقاضای مختلف نیز نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، با کاهش یافتن نسبت تأمین تقاضا، غلظت تری‌هالومتان، افزایش یافته است. در گره 1، با کاهش نسبت تأمین تقاضا از 100 درصد به 86 و 64 درصد، غلظت تری‌هالومتان 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 تری‌هالومتان، به ترتیب 11 و 34 درصد افزایش یافته است. علت افزایش غلظت تری‌هالومتان را می‌توان 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 می‌یابد. در نتیجه‌ی این امر، تشکیل تری‌هالومتان، به‌عنوان محصول جانبی افزایش می‌یابد.

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

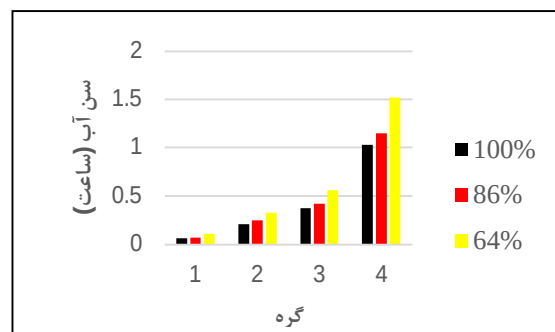
شبکه براساس کلر باقی‌مانده و تری‌هالومتان تشکیل یافته نتایج محاسبات این شاخص از نظر کلر باقی‌مانده و تری‌هالومتان تشکیل شده در حالت استفاده از نتایج خروجی نرم‌افزارهای EPANET-MSX و EPANET-HDSM، به ترتیب در جدول‌های 1 و 2 قابل مشاهده است.

جدول 1- نتایج محاسبات شاخص قابلیت اطمینان کیفی از نظر

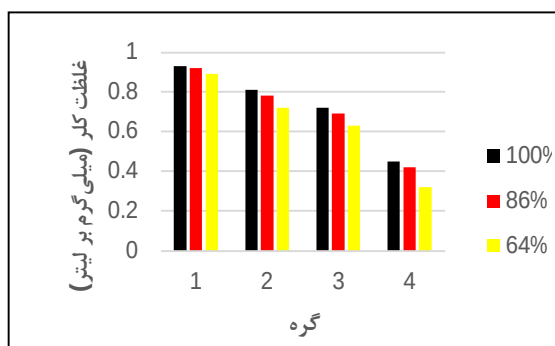
کلر و تری‌هالومتان با استفاده از نرم‌افزار EPANET-MSX

شماره سناریو	نسبت تأمین تقاضا	قابلیت اطمینان از نظر کلر	قابلیت اطمینان از نظر
سناریوی اول	100	0/908	0/949
سناریوی دوم	86	0/908	0/949
سناریوی	64	0/908	0/949

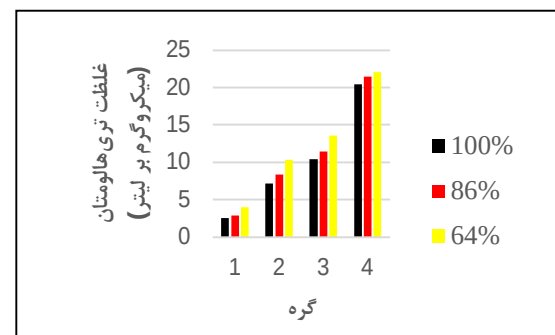
در جدول 1 مشاهده می‌شود، شاخص قابلیت اطمینان شبکه از نظر هر دو پارامتر کلر باقی‌مانده و تری‌هالومتان، در هر سه سناریو با هم یکسان است.



(الف) سن آب



(ب) غلظت کلر



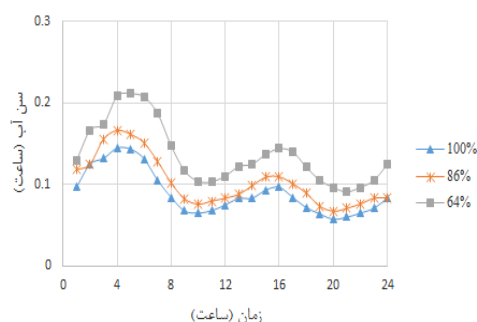
(پ) غلظت تری‌هالومتان

شکل 7- مقایسه نتایج سن آب، غلظت کلر و غلظت تری‌هالومتان

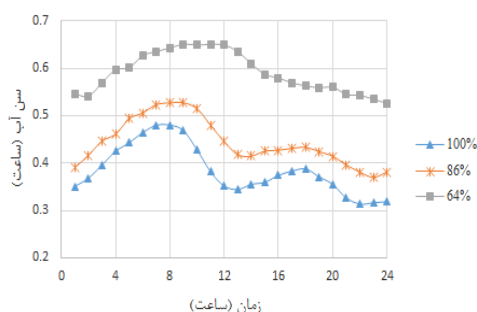
غلظت کلر در طول 24 ساعت آخر شبیه‌سازی برای گره‌های 1 و 3 در شکل 9 برای 3 سناریوی نسبت تأمین تقاضای مختلف نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌شود، با کاهش یافتن نسبت تأمین تقاضا، غلظت کلر باقی‌مانده کاهش یافته است. در گره 1، با کاهش نسبت تأمین تقاضا از 100 درصد به 86 و 64 درصد، غلظت کلر، 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. علت کاهش غلظت کلر را می‌توان افزایش سن آب با

سناریوی سوم	64	0/928
جدول 4- نتایج محاسبات شاخص قابلیت اطمینان کیفی تلفیقی با استفاده از نرم افزار 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 باقی مانده و تری هالومتان، در سناریوی دوم نسبت به سناریوی اول، 14 درصد کاهش و در سناریوی سوم، 36 درصد کاهش داشته است. در این جا به دلیل 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 می شود. از سوی دیگر، کم شدن غلظت کلر و زیاد شدن غلظت تری هالومتان در سناریوهای دوم و سوم، با توجه به تأثیری که در عدد PI قرائت شده از منحنی های جریمه دارند نیز باعث کاهش قابلیت اطمینان می شود.



(الف گره 1)



(ب) گره 3

شکل 8- مقایسه نتایج سن آب در گره های 1 و 3 با نسبت تأمین تقاضا 100%، 86% و 64% حاصل از نرم افزار EPANET-MSX

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 از نتایج خروجی نرم افزارهای EPANET-MSX و EPANET-MSX-HDSM، به ترتیب در جدول های 3 و 4 آمده است.

با توجه به جدول 3، قابلیت اطمینان در همه ی سناریوها با هم برابر است. این موضوع طبق جدول 1 و یکسان بودن مقادیر قابلیت اطمینان کلر و تری هالومتان در هر 3 سناریو، قابل انتظار است. در این جا نیز مشاهده می شود که در حالت استفاده از نرم افزار EPANET-MSX، خروجی این نرم افزار، برای شاخص قابلیت اطمینان کیفی شبکه از نظر پارامترهای کلر و تری هالومتان تحت سناریوهای ذکر شده، هیچ تفاوتی قائل نیست.

جدول 2- نتایج محاسبات شاخص قابلیت اطمینان کیفی از نظر کلر و تری هالومتان با استفاده از نرم افزار EPANET-MSX-HDSM

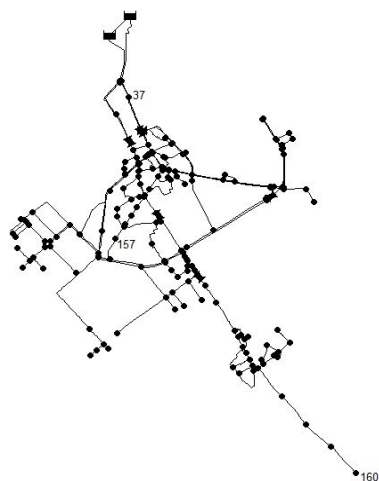
شماره سناریو	نسبت تأمین تقاضا	قابلیت اطمینان از نظر کلر باقی مانده	قابلیت اطمینان از نظر تری هالومتان
سناریوی اول	100	0/907	0/949
سناریوی دوم	86	0/784	0/812
سناریوی سوم	64	0/585	0/602

جدول 3- نتایج محاسبات شاخص قابلیت اطمینان کیفی تلفیقی با استفاده از نرم افزار EPANET-MSX

شماره سناریو	نسبت تأمین تقاضا	قابلیت اطمینان کیفی تلفیقی
سناریوی اول	100	0/928
سناریوی دوم	86	0/928

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

شبکه توزیع آب شهر محلات با 237 لوله و 194 گره به عنوان مطالعه موردی دوم مورد بررسی قرار می گیرد. جانمایی شبکه توزیع آب محلات در شکل 11 نشان داده شده و تراز ارتفاعی مخازن 1 و 2 به ترتیب 1864/6 و 1840 متر است. ضرایب مصرف آب در ساعات مختلف شبانه روز 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 می افتد. در این شبکه، غلظت ثابت کلر به میزان 1 میلی گرم بر لیتر در گره های مخزن اعمال شد. تحلیل شبکه به صورت دوره گسترده زمانی و به مدت 24 ساعت صورت گرفت تا اطمینان حاصل شود که غلظت ها به حالت پایدار خود رسیده اند.



شکل 11- شبکه توزیع آب شهر محلات (صدرا نگار، 1384)

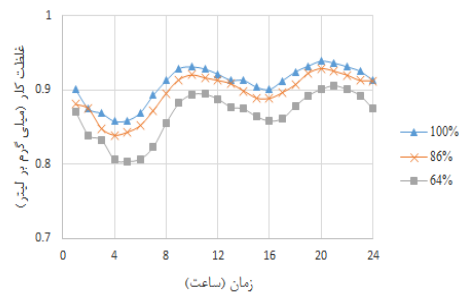
جدول 5- ضرایب مصرف ساعتی برای شبکه نمونه 2

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

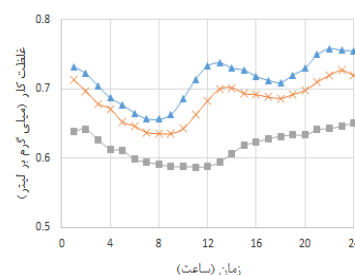
3-2-1- شرایط کمبود فشار شبکه ناشی از افت هد مخازن

در این بخش، برای کاهش فشار در شبکه، هد مخازن کاهش داده شد و سه سناریو با نسبت تأمین تقاضای آبی شبکه به میزان 90، 40 و 30 درصد در نظر گرفته شد که در آن ها شبکه، دارای کمبود فشار است. برای بررسی روند تغییرات پارامترهای کیفی سن آب، غلظت کلر و غلظت تری هالومتان در شرایط کمبود فشار، سه گره 37، 157 و 160 از قسمت های مختلف شبکه توزیع آب محلات انتخاب شدند که در شکل 11، موقعیت آن ها قابل مشاهده

HDSM

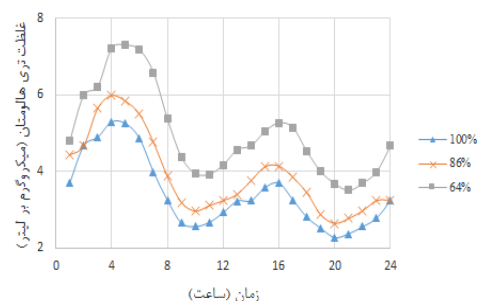


(الف گره 1)

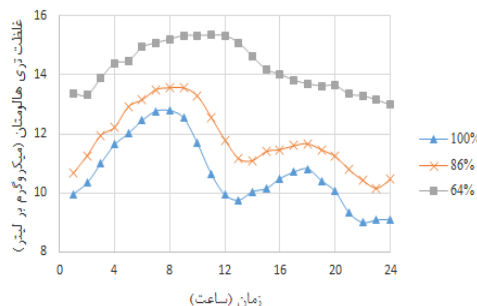


(ب) گره 3

شکل 9- مقایسه نتایج غلظت کلر در گره های 1 و 3 با نسبت تأمین تقاضا 100%. 86% و 64% حاصل از نرم افزار EPANET-MSX-HDSM



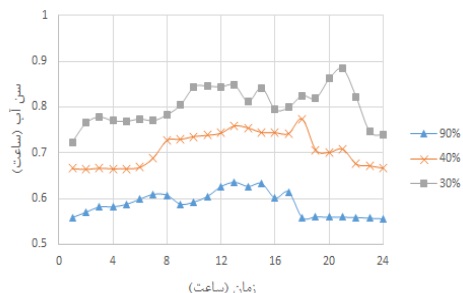
(الف گره 1)



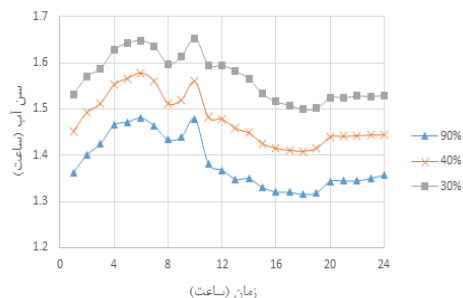
(ب) گره 3

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



(ب) گره 157

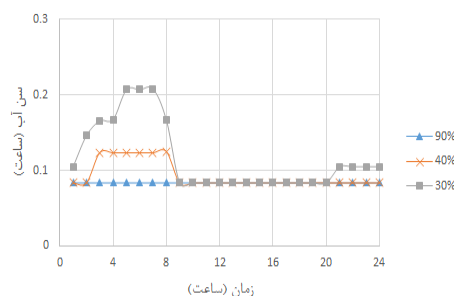


(پ) گره 160

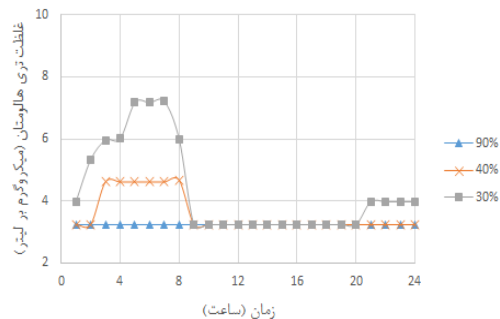
شکل 12- نمودار سن آب در گره‌های 37، 157 و 160 با نسبت تأمین تقاضای 90%، 40% و 30% حاصل از EPANET-MSX-HDSM با توجه به شکل 13، مشاهده می‌شود که غلظت کلر روندی کاهشی دارد. در این سناریوها با افزایش سن آب، کلر باقی‌مانده موجود در آب فرصت خوبی برای واکنش با مواد موجود در آب پیدا کرده و زوال می‌یابد. به همین 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.

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.

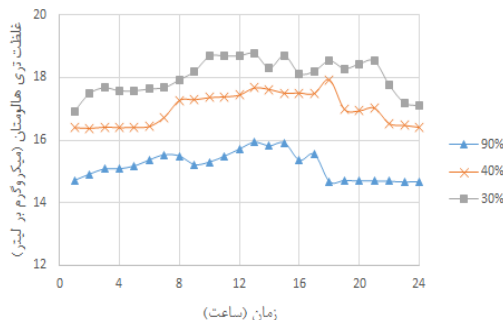
در شکل 12، نمودار تغییرات سن آب، برای 24 ساعت آخر شبیه‌سازی در سه سناریوی تعریف شده برای گره‌های 37، 157 و 160 نشان داده شده است که با بهره‌گیری از نتایج تحلیل توسط نرم‌افزار EPANET-MSX-HDSM حاصل شده است. با توجه به شکل 12، نمودار تغییرات سن آب در تمامی سناریوها افزایشی است. علت را می‌توان این‌طور توضیح 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. 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.



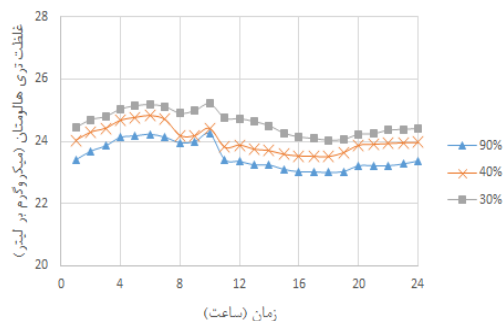
(الف) گره 37



37 (الف) گره



157 (ب) گره

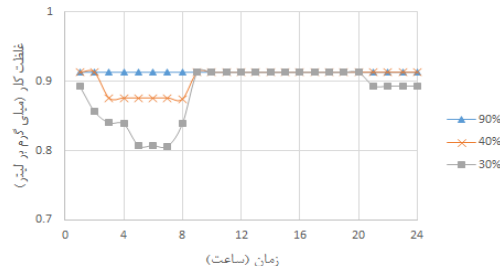


160 (پ) گره

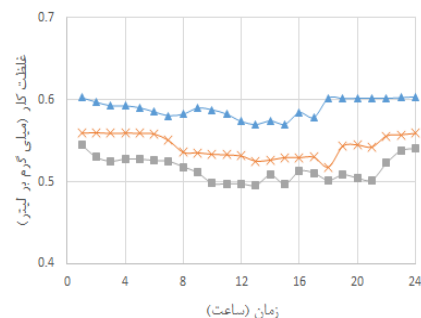
شکل 14- نمودار غلظت تری‌هالومتان در گره‌های 37، 157 و 160 با نسبت تأمین تقاضا 90%، 40% و 30% حاصل از EPANET-MSX-HDSM

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

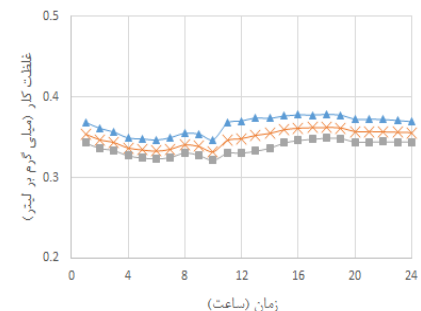
در این بخش، شاخص قابلیت اطمینان کیفی برای سه سناریو مربوط به نسبت تأمین تقاضای آب به میزان 90، 40 و 30 درصد در شبکه بررسی می‌شود. برای محاسبه‌ی شاخص‌ها از نتایج تحلیل توسط نرم‌افزار EPANET-MSX-HDSM استفاده شده است. نتایج محاسبات این شاخص در جدول 6 قابل مشاهده است.



37 (الف) گره



157 (ب) گره



160 (پ) گره

شکل 13- نمودار غلظت کلر در گره‌های 37، 157 و 160 با نسبت تأمین تقاضای 90%، 40% و 30% حاصل از EPANET-MSX-HDSM
نمودار تغییرات غلظت تری‌هالومتان، برای 24 ساعت آخر شبیه‌سازی به‌ترتیب 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. با توجه به شکل 11، سن آب نیز برای این گره‌ها روندی افزایشی دارد. این افزایش در سن آب، افزایش در غلظت تری‌هالومتان را به خوبی توجیه می‌کند؛ زیرا با افزایش سن آب، مصرف کلر در طول مسیر بیشتر شده و مقدار تری‌هالومتان تولید شده نیز بیشتر می‌شود.

باید به درستی انجام شود. از طرفی تحلیل کیفی شبکه به صورت دقیق، مستلزم انجام تحلیل هیدرولیکی به صورت دقیق و نزدیک به واقعیت است. از آنجا که مدل های هیدرولیکی مرسوم مبتنی بر تقاضا برای سیستم های توزیع آب، فرض می کنند که تقاضای آب در شبکه به طور کامل برآورده می شود، این مدل ها در شرایط فشار نرمال شبکه به درستی عمل می کنند، 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 گونه های مورد نظر که در تعامل با یکدیگر هستند را به طور همزمان مورد بررسی قرار دهد. بدین منظور از نرم افزار EPANET-MSX استفاده شد که در واقع، توسعه ای از نرم افزار EPANET است و قابلیت شبیه سازی چند گونه شیمیایی و بیولوژیکی در تعامل با یکدیگر را دارد. EPANET-MSX تحلیل کیفی را بر مبنای تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا انجام می دهد. برای رفع این مشکل و امکان استفاده از بسته نرم افزاری EPANET-MSX که بتواند تحلیل کیفی چندگونه ای را توأم با تحلیل هیدرولیکی HDSM انجام دهد، در محیط برنامه نویسی متلب، برنامه ای تهیه شد که مدل تحلیل هیدرولیکی HDSM را با مدل چندگونه ای EPANET-MSX ادغام می کند.

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

(1) در نتایج حاصل از مقایسه نرم افزار EPANET-MSX-HDSM (توسعه چندگونه ای مبتنی بر فشار) و نرم افزار EPANET-MSX مشاهده شد که در شرایط وجود فشار نرمال در شبکه، نتایج تحلیل کیفی برای پارامترهای سن آب، غلظت کلر و غلظت تری هالومتان، در هر دو حالت نرم افزاری با هم یکسان هستند.

(2) نرم افزار EPANET-MSX-HDSM، قابلیت استفاده در تمام شرایط عملیاتی فشار اعم از افت فشار به دلایل متعدد را دارد.

(3) با توجه به نتایج به دست آمده از نرم افزار EPANET-MSX-HDSM برای پارامترهای کیفی سن آب، غلظت کلر و غلظت تری هالومتان، مشاهده شد که غلظت های کلر و تری هالومتان 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 نرم افزار EPANET-MSX برای شبیه سازی کیفی شبکه استفاده می شود، تضمینی برای ارزیابی درست عملکرد کیفی شبکه وجود ندارد. علت این امر، یکسان شدن نتایج

جدول 6- 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	قابلیت اطمینان از نظر تری هالومتان
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 باقی مانده و تری هالومتان کاهش یافته است. قابلیت اطمینان از نظر کلر باقی مانده و تری هالومتان در سناریوی دوم نسبت به سناریوی اول، 57 درصد کاهش یافته است. در سناریوی سوم، 70 درصد کاهش قابلیت اطمینان از نظر کلر باقی مانده و 69 درصد کاهش قابلیت اطمینان از نظر تری هالومتان نسبت به سناریوی اول مشاهده می شود. 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 باقی مانده و تری هالومتان تشکیل شده، شاخص قابلیت اطمینان تلفیقی محاسبه شد و نتایج در جدول 7 آمده است. با توجه به جدول 7 مشاهده می شود که قابلیت اطمینان تلفیقی کلر باقی مانده و تری هالومتان، در این سناریوها که شبکه با افزایش افت فشار مواجه است روندی کاهشی دارد. قابلیت اطمینان تلفیقی کلر باقی مانده و تری هالومتان، در سناریوی دوم نسبت به سناریوی اول، 57 درصد کاهش و در 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 نرم افزار 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- نتیجه گیری

بررسی عملکرد شبکه های توزیع آب شهری بر اساس پارامترهای کیفی آب از جمله کلر باقی مانده و تری هالومتان از جمله مسائل مورد توجه در سال های اخیر است. بدین منظور تحلیل کیفی شبکه

- 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 (pp. 678-686).
[http://dx.doi.org/10.1061/41203\(425\)64](http://dx.doi.org/10.1061/41203(425)64)
- Choi Y H, "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, Edinburg, 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.
- 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 سناریوی تأمین 30 درصد تقاضا نسبت به سناریوی تأمین 90 درصد تقاضا، کاهش تقریبی 70 درصدی شاخص قابلیت اطمینان کیفی تلفیقی مشاهده می‌شود.
- ### 5- مراجع
- تابش، م، مدل‌سازی پیشرفته شبکه‌های توزیع آب، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ دوم، تهران، ایران، 1395.
- زنجانی، س، "بررسی آلودگی گسترده شبکه‌های توزیع آب شهری"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، 1394.
- صدرا نگار، مهندسی مشاور، "مطالعات بهینه‌سازی سیستم توزیع آب شهر محلات"، شرکت آب و فاضلاب استان مرکزی، ایران، 1384.
- ظفری، م، "حداقل‌سازی اثرات ناشی از انتشار آلودگی در شبکه‌های آب شهری با استفاده از تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، 1394.
- 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-

- (10),
[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, 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?Dockkey=P1007WWW.TXT>
- 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.
[DOI 10.1007/s11269-017-1760-0](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?Dockkey=P100XGNO.TXT>
- 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.
- Tabesh M, Dolatkhahi A, "Effects of pressure dependent analysis on quality performance assessment of
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105686>.
- Fisher I, Kastl G, Sathasivan A, Jegatheesan V, "Suitability 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-Aguíñaga 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, Haught 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

- water distribution networks", Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering, 2006, 30 (B1), 9–13.
https://www.sid.ir/EN/VEWSSID/J_pdf/8542006/B110.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/\(ASCE\)0733-9496\(1988\)114:3\(276\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1988)114:3(276))
- World Health Organization (WHO), Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, Incorporating the 1st addendum, Malta, 2011.
- 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>