

Application of Multiple-Part Method Length of Line to Improve the Simulation of Chlorine Decay in Big Isfahan Water Conveyance Line

Y. Frouzandeh¹, A. Dehnavi², A. Shanehsazzadeh³

1. MSc Student, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran
2. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran
3. Assist. Prof, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran
(Corresponding Author) a.shanehsazzadeh@eng.ui.ac.ir

(Received March 13, 2019 Accepted May 19, 2019)

To cite this article:

Frouzandeh, Y., Dehnavi, A., Shanehsazzadeh, A., 2020, "Application of multiple-part method length of line to improve the simulation of chlorine decay in big Isfahan water conveyance line" Journal of Water and Wastewater, 31(1), 1-11. Doi: 10.22093/wwj.2019.176018.2842 (In Persian)

Abstract

Chlorine is used as the most common disinfectant to prevent microbial growth in water networks. The concentration of chlorine in distribution systems or water conveyance lines is reduced due to two different types of bulk and wall decay. In this study EPANET software is applied to numerically simulate chlorine decay in the Isfahan water supply line from the Baba Sheikhalı water treatment plant to Naevin. Two methods are applied for simulation and the results are compared to the measurement. In the first method, chlorine simulation was performed taking into account the whole Isfahan water conveyance line as one section (integrated) and determining a bulk decay and wall decay coefficient for the entire conveyance line. In the second method, the line was divided into two sections (bisection) and decay coefficients of chlorine for each section were separately considered. To determine the bulk reaction rate, the bottle tests were performed at 6° and 18° Celsius corresponding to winter and summer. The results indicated that separating the line to two and applying independent coefficients and decay parameters to each part improves the results and the RMSE values are reduced from 0.09 to 0.03 in summer and from 0.064 to 0.025 in winter. Therefore, dividing the line in two or more sections substantially improves the accuracy of the simulation of chlorine decay.

Keywords: Drinking Water Quality, Coefficients of Chlorine Decay, Chlorine Residual, Isfahan Water Conveying Line, EPANET.

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۱، شماره ۱، صفحه: ۱۱-۱

کاربرد روش چند بخشی نمودن طول خط به منظور بهبود شبیه‌سازی زوال کلر در خطوط انتقال آب اصفهان بزرگ

یاسمن فروزنده^۱، علی دهنوی^۲، احمد شانه‌ساززاده^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
 ۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
 ۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
 (نویسنده مسئول) a.shanehsazzadeh@eng.ui.ac.ir

پذیرش ۹۸/۲/۲۹

(دریافت ۹۷/۱۲/۲۲)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

فروزنده، ی.، دهنوی، ع.، شانه‌ساززاده، ا.، ۱۳۹۹، " کاربرد روش چند بخشی نمودن طول خط به منظور بهبود شبیه‌سازی زوال کلر در خطوط انتقال آب اصفهان بزرگ " مجله آب و فاضلاب، ۳۱(۱)، ۱۱-۱. Doi: 10.22093/wwj.2019.176018.2842

چکیده

کلر به عنوان متداول‌ترین ماده گندزدا برای جلوگیری از رشد میکروبی در شبکه‌های آبرسانی استفاده می‌شود. غلظت کلر در سیستم‌های توزیع و یا خطوط انتقال آب به علت دو نوع مختلف زوال توده‌ای و زوال جدار کاهش می‌یابد. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار EPANET، زوال کلر در خط انتقال آب اصفهان از تصفیه‌خانه باباشیخعلی تا شهر نایین در فصول تابستان و زمستان با مدل سینتیکی مرتبه اول به دو روش تک‌بخشی و دو بخشی شبیه‌سازی و نتایج با یکدیگر مقایسه شد. در روش اول شبیه‌سازی کلر با در نظر گرفتن کل خط انتقال آب اصفهان به عنوان یک بخش (تک‌بخشی) و تعیین یک ضریب زوال حجمی و یک ضریب زوال جدار برای کل خط انتقال انجام شد. در روش دوم خط انتقال به دو بخش تقسیم شد (دو بخشی) و ضرایب زوال کلر برای هر بخش جداگانه اختصاص داده شد. برای تعیین ضریب زوال توده‌ای کلر، آزمایش‌های بطری در دماهای ۶ و ۱۸ درجه سلسیوس انجام شد. نتایج نشان داد با جداسازی خط انتقال به دو قسمت و استفاده از ضرایب و پارامترهای زوال متناسب با همان قسمت، مقدار خطای جذر میانگین مربعات برای غلظت‌های کلر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در فصل تابستان از مقدار ۰/۰۹ به ۰/۰۳ و در فصل زمستان از ۰/۰۶۴ به ۰/۰۲۵ کاهش پیدا کرده است. بنابراین کاربرد روش چند بخشی به صورت قابل ملاحظه‌ای باعث بهبود نتایج شبیه‌سازی غلظت کلر در خطوط انتقال طولانی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کیفیت آب آشامیدنی، ضرایب زوال کلر، کلر باقیمانده، خط لوله انتقال آب اصفهان، EPANET

۱- مقدمه

یافته است. گندزادی با کلر برای اولین بار در سال ۱۹۰۸ در شیکاگو، آمریکای شمالی مورد استفاده قرار گرفت (Mostafa et al., 2013). کلر زنی شایع‌ترین روش برای گندزادی آب آشامیدنی

در سال‌های اخیر، آگاهی جهانی در مورد خطرات ناشی از کاهش کیفیت آب در هنگام انتقال از طریق شبکه‌های آبرسانی و خطوط انتقال به علت شیوع بیماری‌های مربوط به آب آشامیدنی افزایش

مدل‌های زوال در سیستم‌های توزیع آب ساخته شده در محیط آزمایشگاه و یا در مطالعات میدانی انجام شده است (Mostafa et al., 2013). در ابتدا، زوال کلر با یک معادله سینتیکی مرتبه اول شبیه‌سازی شده و به‌طور گسترده‌ای در شبیه‌سازی کیفیت آب سیستم‌های تأمین آب مورد استفاده قرار گرفته است (Mostafa et al., 2013, Monteiro et al., 2014).

پس از آن مدل‌هایی برای ارتقای سادگی مدل مرتبه اول، توسعه یافتند که می‌توان به مدل سینتیکی مرتبه اول موازی، مدل سینتیکی مرتبه یک حدی، مدل مرتبه دوم تک-واکنش‌گر، مدل مرتبه دوم دو-واکنش‌گر، مدل سینتیکی مرتبه n ام و مدل سینتیک مرتبه n ام حدی اشاره نمود (Haas and Karra, 1984, Fisher et al., 2011, Monteiro et al., 2014).

به‌طور خلاصه در مدل‌های حدی، فرض شده است که مقداری از غلظت کلر اولیه (c^*) بدون تغییر باقی می‌ماند و باقیمانده $c_0 - c^*$ مطابق واکنش مرتبه اول در معرض زوال قرار می‌گیرد. مدل مرتبه اول موازی، ترکیبات واکنش را به دو بخش تند و کند تقسیم می‌کند که هر بخش طبق واکنش مرتبه اول رفتار می‌کند. در این مدل بخشی از غلظت کلر اولیه x_{c0} با ثابت سینتیکی k_{b1} و باقیمانده آن $(1-x)c_0$ با ثابت سینتیکی متفاوت k_{b2} مصرف می‌شود. در مدل‌های مرتبه دوم در رابطه با کلر و سایر واکنش‌دهنده‌ها، فرض شده است که سرعت واکنش متناسب با غلظت هر دو گونه (کلر و واکنش‌دهنده) است. مدل مرتبه دوم دو واکنش‌گر زوال سریع و آهسته کلر را با دو گروه از ترکیبات آب نشان می‌دهد (Mostafa et al., 2013, Kohpaei et al., 2011, Fisher et al., 2011, Vieira et al., 2004).

در جدول ۱ معادلات مدل‌های مختلف زوال حجمی کلر به‌صورت خلاصه ارائه شده است. در این جدول c غلظت کلر بر حسب میلی‌گرم بر لیتر، k_b ضریب زوال واکنش توده‌ای، n مرتبه واکنش، پارامتر x سهم واکنش سریع زوال کلر در ساعات اولیه، c^* غلظت حدی کلر، $c_{[React]}$ غلظت گونه‌هایی که با کلر واکنش می‌دهند بر حسب میلی‌گرم در لیتر، c_f و c_s به ترتیب غلظت ترکیبات واکنش‌دهنده سریع و آهسته با کلر بر حسب میلی‌گرم در لیتر، k_f و k_s ضریب زوال سینتیکی سریع و آهسته مدل مرتبه دوم بر حسب لیتر بر میلی‌گرم بر زمان است. برای زوال جدار کلر، از

است. از کلر به‌علت قدرت میکرب‌کشی بالا، اقتصادی بودن و نیز حفظ باقیمانده آن در آب، استفاده می‌شود (Mostafa et al., 2013, Boulos et al., 1997).

هدف از گندزدایی با کلر، حفاظت از آب آشامیدنی در برابر آلودگی‌های میکروبی و جلوگیری و کنترل رشد مجدد میکروارگانیسم‌ها در طول انتقال یا توزیع است. زوال کلر در شبکه‌های آبرسانی به‌علت واکنش با مواد آلی و غیر آلی موجود در حجم آب (زوال حجمی^۱) و بیوفیلم‌ها و مواد موجود روی دیواره‌ی لوله (زوال جدار^۲)، رخ می‌دهد (Boccelli et al., 2003, Al-Jasser, 2011, Ahn et al., 2012, Monteiro et al., 2014).

واکنش‌های رخ داده در فاز حجمی از مشخصات آب بوده و تنها وابسته به انواع ترکیبات واکنش‌دهنده با کلر، نوع تصفیه و کیفیت شیمیایی و میکروبیولوژیکی آب توزیع شده و مستقل از مشخصه‌های لوله و بیوفیلم است. واکنش‌های زوال جدار تابع جنس، قطر، بیوفیلم شکل گرفته بر جدار لوله و سایر مشخصات سیستم توزیع است (Hallam et al., 2001, Abokifa et al., 2016, Ahn et al., 2012, Mostafa et al., 2013, Vieira et al., 2004).

این واکنش‌ها منجر به ناپدید شدن ماده گندزدا و در نتیجه افزایش احتمال آلودگی‌های میکروبیولوژیکی آب آشامیدنی می‌شوند. در عین حال، افزایش غلظت کلر در طی فرایند تصفیه باعث خوردگی لوله‌های آب و تشکیل محصولات جانبی خطرناکی مانند تری‌هالومتان‌ها و هالواسیتیک اسیدها با خاصیت سرطان‌زایی می‌شود و سلامت آب آشامیدنی را به خطر می‌اندازد (Vieira et al., 2004, Ahn et al., 2012).

بنابراین، یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی که سیستم‌های انتقال آب آشامیدنی با آن مواجه است، حفظ غلظت کلر باقیمانده در سرتاسر شبکه‌های توزیع و خطوط انتقال در محدوده حداقل و حداکثر تعیین شده توسط استانداردها است (Ahn et al., 2012, Mostafa et al., 2013).

در چند دهه گذشته، پژوهش‌های زیادی در زمینه ایجاد تکنیک‌های جدید شبیه‌سازی زوال کلر، اصلاح مدل‌های ریاضی موجود، مطالعه شناخت عوامل مؤثر بر زوال کلر و استفاده از

¹ Bulk decay
² Wall decay

باقیمانده در شبکه توزیع آب شهر لوزادا^۲ پرتغال پرداختند. ضریب زوال حجمی کلر برای واکنش درجه اول از طریق آزمایش‌های بطری برابر ۰/۳۴۳ بر روز تعیین شد (Castro and Neves, 2010).

در پژوهشی در سال ۲۰۱۲ با استفاده از نرم‌افزار EPANET به مدل‌سازی زوال کلر باقیمانده در شبکه توزیع شهری، با جمعیت پنجاه هزار نفری پرداخته شد. در این پژوهش واکنش‌های رخ داده در حجم جریان و دیواره از درجه اول مدل شد و ضریب واکنش حجمی ۰/۸۵ بر روز و دامنه ضریب واکنش جداره از ۰/۱۳ تا ۰/۵۷ متر بر روز اختصاص داده شد (Georgescu and Georgescu, 2012).

جایچان و همکاران در سال ۲۰۱۲ به مدل‌سازی کلر باقیمانده و تشکیل تری‌هالومتان‌ها با استفاده از نرم‌افزار EPANET پرداختند. در این پژوهش برای تعیین ضریب زوال حجمی، آزمایش‌های بطری انجام گرفت. به دست آوردن یک معادله ساده بر اساس آزمایش‌های ضریب زوال حجمی با استفاده از آنالیز رگرسیون چند متغیره بر اساس غلظت اولیه کلر، دما و کل کربن آلی از نتایج پژوهش است (Ahn et al., 2012).

مونتریا و همکاران در سال ۲۰۱۴ با به‌کارگیری EPANET-MSX به شبیه‌سازی پرداختند (Monteiro et al., 2014).

فیشر و همکاران در سال ۲۰۱۷ یک مدل جامع تکمیل شده دو واکنش‌دهنده^۳ را برای شبیه‌سازی زوال کلر در شبکه‌های توزیع معرفی کردند. این مدل در EPANET-MSX قابل شبیه‌سازی است (Fisher et al., 2017).

تیرونه و همکاران در سال ۲۰۱۹ از مدل ضریب نرخ واکنش متغیر برای شبکه توزیع شهر ماستافا استفاده کردند. این مدل باعث صرفه‌جویی در کلر و کاهش غلظت کلر اضافی در برخی از نقاط سیستم توزیع می‌شود (Tiruneh et al., 2019). گویال و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از نرم‌افزار EPANET به شبیه‌سازی هیدرولیکی و کیفی شبکه توزیع آب شهر منجلپور^۴ پرداختند و محل بهینه استقرار پمپ‌های تزریق مجدد کلر را نشان دادند (Goyal and Patelb, 2017).

جدول ۱- مدل‌های سینتیکی زوال حجمی کلر

Table 1. Chlorine bulk decay kinetic models

Model		Parameter
Order	$\frac{dc}{dt} = k_b c^n$	k_b, n
First order	$\frac{dc}{dt} = k_b c$	k_b
Parallel first order	$\frac{dc}{dt} = -k_{b1} x c_1 - k_{b2} (1-x) c_2$	k_{b1}, k_{b2}, x
Limited first order	$\frac{dc}{dt} = -k_b (c - c^*)$	k_b, c^*
Single-reactant	$\frac{dc}{dt} = -k_b c c_{[Re act]}$	k_b
Two-reactant (2R)	$\frac{dc}{dt} = -k_f c c_f - k_s c c_s$	k_f, k_s

یک مدل سینتیکی مرتبه اول به صورت معادله ۱ استفاده می‌شود (Boulos et al., 1997). همچنین در برخی از مطالعات انجام شده، نرخ واکنش جدار با سینتیک مرتبه صفر با معادله ۲ نشان داده شده است (Monteiro et al., 2014, Boulos et al., 1997, Powell et al., 2000).

$$\frac{dc}{dt} = \frac{4k_w k_f C}{D(k_w + k_f)} \quad (1)$$

$$\frac{dc}{dt} = \min\left(\frac{k_w}{r_h}, \frac{k_f C}{r_h}\right) \quad (2)$$

که در این معادلات

k_f ضریب انتقال جرمی بر حسب طول بر زمان، k_w ضریب واکنش جدار بر حسب طول بر زمان، D قطر لوله، r_h شعاع هیدرولیکی لوله و k_w بر حسب جرم بر سطح بر زمان است.

نرم‌افزار EPANET ضمن شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان، واکنش‌های رخ دهنده در جریان حجمی را با سینتیک از مرتبه n مدل می‌کند که در آن فرض می‌شود نرخ واکنش آنی تابعی از غلظت کلر است. پژوهش‌های متعددی برای بررسی زوال کلر بر اساس مدل‌های فوق انجام شده است. پدروکاسترو^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۰ با استفاده از نرم‌افزار EPANET به شبیه‌سازی کلر

² Lousada

³ Augmented two-reactant (2RA) mode

⁴ Manjalpur

¹ Pedro Castro

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ خط انتقال آب اصفهان بزرگ

خط انتقال آب اصفهان بزرگ از تصفیه‌خانه بابا شیخعلی شروع و تا شهر نایین امتداد می‌یابد. ظرفیت اسمی خط ۱۱/۷ متر مکعب در ثانیه است که آب شرب جمعیت حدود چهار میلیون را تأمین می‌کند.

در شکل ۱ خط انتقال آب اصفهان به صورت شماتیک مشاهده می‌شود. این خط انتقال با طول ۲۸۸ کیلومتر در اکثر مسیر به صورت ثقلی و در دو ایستگاه ارغوانیه و نایین پمپاژ می‌شود. جنس لوله‌ها از تصفیه‌خانه تا مخازن گورت، بتنی و بتن پیش‌تنیده و از مخازن گورت تا نایین لوله‌های فولادی و جی آرپی است. میانگین سن لوله‌ها بین ۱۰ تا ۳۰ سال است. در شکل ۱ اعداد نشان داده شده بر روی خطوط، قطر لوله‌ها را نشان می‌دهد.

۲-۲ روش شبیه‌سازی هیدرولیکی

در این پژوهش خط انتقال آب اصفهان بزرگ از تصفیه‌خانه بابا شیخعلی تا شهر نایین مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی هیدرولیکی خط انتقال آب اصفهان در محیط نرم‌افزار EPANET انجام شد. این خط انتقال، توسط ۳۸ گره، دو ایستگاه پمپاژ و مخازن واقع در هزارجریب و گورت مدل شد. در این شبیه‌سازی از رابطه هیزن- ویلیامز استفاده شد.

بنسلمان و همکاران در سال ۲۰۱۸ پس از شبیه‌سازی زوال کلر در یک شبکه توزیع آب با نرم‌افزار EPANET، برای افزایش غلظت کلر باقیمانده، به لزوم ترزیک کلر در نقاط انتهایی شبکه تأکید کردند (Bensoltane et al., 2018). مقایسه شبیه‌سازی‌های زوال کلر باقیمانده با مدل‌های سینتیکی مختلف نشان می‌دهد مدل سینتیکی مرتبه اول از دقت قابل قبولی برخوردار است (Mostafa et al., 2013, Monteiro et al., 2014, Powell et al., 2000).

با این وجود با توجه به اینکه خط انتقال آب اصفهان نسبتاً طولانی است به نظر می‌رسد جداسازی خط انتقال یا شبکه توزیع به بخش‌های کوچک‌تر در فرایند شبیه‌سازی دقت نتایج را بهبود خواهد بخشید. در پژوهش حاضر، ضمن شبیه‌سازی زوال کلر در خط انتقال آب اصفهان در دو فصل تابستان و زمستان با استفاده از مدل سینتیکی مرتبه اول با نرم‌افزار EPANET، تأثیر جداسازی خط انتقال مورد نظر بر بهبود شبیه‌سازی، بررسی شد.

به این منظور شبیه‌سازی خط انتقال آب اصفهان با دو روش انجام شد و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. در روش اول، شبیه‌سازی کلر با در نظر گرفتن کل خط انتقال آب اصفهان به عنوان یک بخش (رویکرد تک‌بخشی) و تعیین یک ضریب زوال حجمی و یک ضریب زوال جدار برای کل خط انتقال انجام شد. در رویکرد دوم، خط انتقال به دو بخش تقسیم شد (دوبخشی) و ضرایب زوال کلر جداگانه به هر بخش اختصاص داده شد.

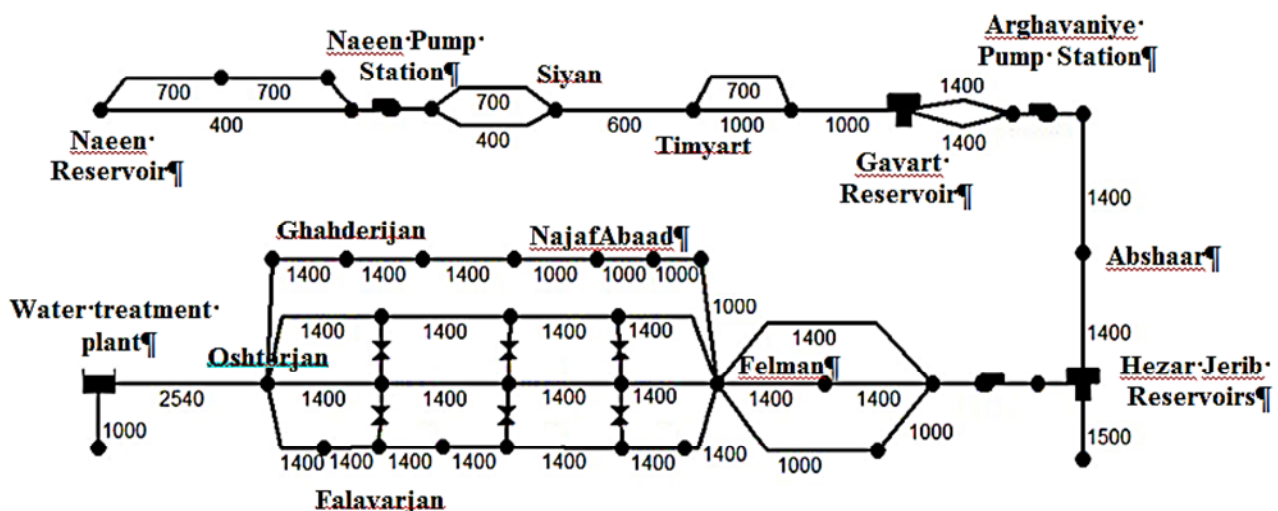


Fig. 1. Overview of Isfahan water conveyance line

شکل ۱- شمای کلی از خط انتقال شهر اصفهان

۲-۳- تعیین ضرایب زوال توده‌ای کلر

ثابت زوال توده‌ای کلر در آزمایشگاه و با استفاده از آزمون‌های بطری تعیین می‌شود (Vieira et al., 2004, Mostafa et al., 2013).

برای به دست آوردن ضریب زوال توده‌ای کلر، از نمونه‌های آب خروجی تصفیه‌خانه بابا شیخ علی در ابتدای خط استفاده شد. نمونه‌ها در انکیباتور در دمای ۱۸ درجه سلسیوس (متوسط دمای خروجی آب تصفیه‌خانه در فصل تابستان) و ۶ درجه سلسیوس (متوسط دمای خروجی آب تصفیه‌خانه در فصل زمستان) نگهداری شدند. سپس نرخ زوال کلر در این نمونه‌ها در یک بازه زمانی ۸۲ ساعته (مدت ماند آب در خط انتقال) در گام‌های زمانی مختلف مورد آزمایش قرار گرفت.

اندازه‌گیری‌های کلر آزاد باقیمانده نمونه‌ها به روش رنگ‌سنجی با استفاده از دستگاه کلرسنج مدل ۵۸۷۰۰۱۲ شرکت هچ آمریکا با دقت ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر و شناساگر دی اتیل پی فنیلن دی آمین^۲ اندازه‌گیری شد.

ضرایب واکنش توده‌ای کلر را می‌توان با محاسبه شیب خط حاصل از رسم تغییرات غلظت کلر در مقابل زمان برای واکنش مرتبه صفر و رسم تغییرات لگاریتمی میزان غلظت کلر باقیمانده در برابر زمان برای واکنش مرتبه یک و عکس تغییرات غلظت کلر در برابر زمان برای واکنش مرتبه دوم تعیین کرد. بر اساس بیشترین مقدار ضریب همبستگی درجه واکنش تعیین می‌شود.

۲-۴- شبیه‌سازی غلظت کلر باقیمانده

شبیه‌سازی غلظت کلر خط انتقال آب اصفهان به دو روش، یکی یکپارچه (تک‌بخشی) با استفاده از یک ضریب زوال توده‌ای و دیگری تفکیک به دو قسمت (دوبخشی) با استفاده از دو ضریب زوال توده‌ای در نرم‌افزار EPANET انجام شد. ضرایب زوال توده‌ای کلر از آزمایش‌های بطری به دست می‌آید. سپس برای تعیین ضریب زوال جدار از روش سعی و خطا در محیط نرم‌افزار استفاده می‌شود به طوری که اختلاف نتایج به دست آمده و مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت کلر در ایستگاه‌های مختلف به حداقل برسد.

¹ Hach

² Diethyl-P-phenylen diamine (DPD)

در رویکرد تک‌بخشی، کل خط انتقال آب اصفهان با یک ضریب زوال جدار کالیبره شد. در رویکرد دوبخشی با توجه به مشخصات فیزیکی (جنس و سن لوله) و هیدرولیکی (سرعت) هر بخش، دو مقدار ضریب زوال جدار در نظر گرفته شد. واکنش جدار با مدل سینتیکی مرتبه صفر و یک (معادلات ۱ و ۲) شبیه‌سازی شد و با تغییر مقدار ضریب جدار و مرتبه واکنش، بهترین ضریب جدار با حداقل مقدار خطای جذر میانگین مربعات، انتخاب شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج شبیه‌سازی هیدرولیکی خط انتقال آب اصفهان

مدل هیدرولیکی خط انتقال با استفاده از اطلاعات فشار و دبی فصول زمستان و تابستان دریافت شده از شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان صحت‌سنجی شد. ضریب زبری لوله‌ها با توجه به سن و جنس آن‌ها از ۱۰۰ تا ۱۴۵ انتخاب شده است. موارد نمونه از اطلاعات دبی و فشار در برخی گره‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. ضریب همبستگی ۰/۹۷۸ و ۰/۹۵۸ به ترتیب در فصول زمستان و تابستان بین نتایج مدل و داده‌های فشار در ایستگاه‌ها نشان می‌دهد شبیه‌سازی هیدرولیکی از دقت کافی برخوردار است.

۳-۲- ضرایب زوال توده‌ای و جداره کلر

آزمایش‌های زوال توده‌ای کلر در گام‌های زمانی مختلف انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها برای فصل‌های تابستان و زمستان در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲- دبی مصرفی و مقدار فشار اندازه‌گیری شده در گره‌های نمونه

Table 2. Discharge and measured value of pressure in sample nodes

Sampling points	Flow (L/s)		Pressure (m)	
	Winter	Summer	Winter	Summer
Oshtorjan	0	0	3	2
Felavarjan	130	365	55	34
Felman	4000	4600	65	50
Abshar	290	430	67	65
Timyart	119	119	76	70
Naeen	100	110	-	-

دوم، واکنش از مرتبه اول در نظر گرفته شد (Danesh and Gheybi, 2017).
 نرخ تغییرات غلظت کلر در دمای ۱۸ درجه سلسیوس در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل خط پیوسته به تمام داده‌های

در پژوهش حاضر، تعیین ضریب زوال توده‌ای کلر با دو رویکرد تک‌بخشی و دوبخشی بررسی شد. در رویکرد تک‌بخشی برای کل خط انتقال یک ضریب زوال توده‌ای در نظر گرفته شد. با توجه به اختلاف اندک ضریب R^2 در واکنش درجه اول و درجه

جدول ۳ - میانگین نتایج آزمایش‌های زوال توده‌ای کلر در فصل تابستان و زمستان

Table 3. The average results of tests of bulk decay chlorine in summer and winter

Winter				Summer			
Time (h)	Cl (mg/L)	Ln(Boulos et al.)	1/Cl	Time (h)	Cl (mg/L)	Ln(Boulos et al.)	1/Cl
0	0.87	-0.14	1.14	0	0.87	-0.14	1.14
2	0.8	-0.22	1.25	3	0.83	0.18	1.20
4	0.77	-0.26	1.29	5	0.8	-0.22	1.25
6	0.7	-0.36	1.43	9	0.77	-0.26	1.29
9	0.67	-0.4	1.49	12	0.77	-0.26	1.29
12	0.63	-0.46	1.58	16	0.7	-0.36	1.43
15	0.6	-0.51	1.67	24	0.7	-0.36	1.43
24	0.5	-0.69	2.00	39	0.67	-0.40	1.49
40	0.47	-0.75	3.13	51	0.65	-0.43	1.53
64	0.37	-0.99	2.7	63	0.63	-0.46	1.58
82	0.3	-1.2	3.33	82	0.6	-0.51	1.67
	0.87	0.95	0.98		0.86	0.92	0.91

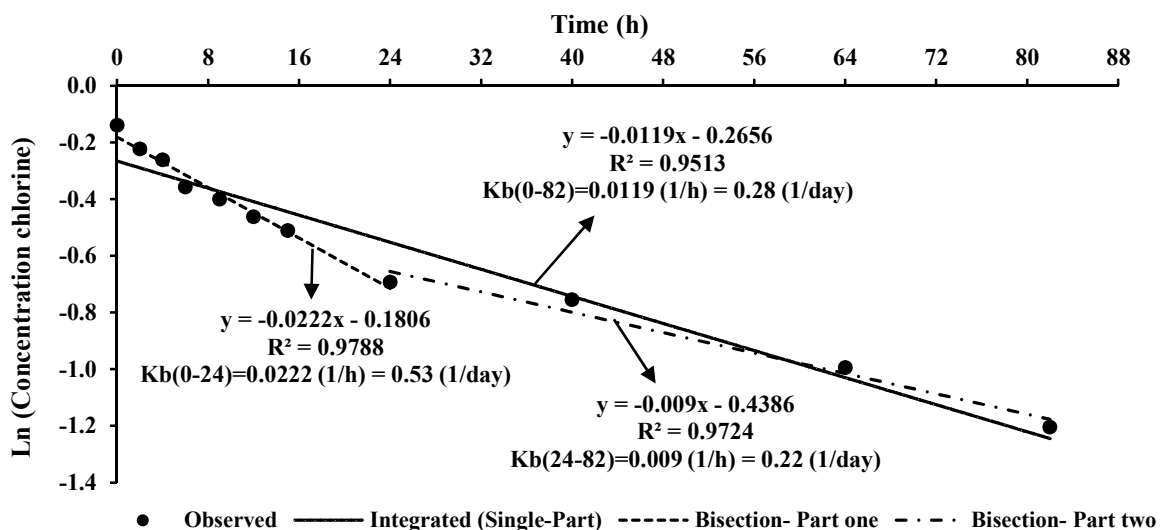


Fig. 2. Bulk decay coefficient at 18 °C with integrated and bisection approach by the bottle test

شکل ۲- ضریب زوال حجمی در دمای ۱۸ درجه سلسیوس با رویکرد تک‌بخشی و دوبخشی از آزمایش بطری

۳-۳- ضرایب زوال در رویکرد تک‌بخشی و دوبخشی

مقادیر ضریب زوال توده‌ای از آزمایش‌ها کلر و ضریب زوال جدار از شبیه‌سازی‌های انجام شده در شکل ۴ آورده شده است. با مقایسه مقادیر ضرایب زوال مشاهده می‌شود، ضرایب زوال توده‌ای و زوال جدار در رویکرد تک‌بخشی در مقایسه با دوبخشی، تفاوت قابل ملاحظه‌ای داشته است. به طوری که در بخش اول خط انتقال آب اصفهان، مقدار ضرایب زوال کلر از مقدار آن‌ها در رویکرد تک‌بخشی و بخش دوم بیشتر است. لازم به ذکر است در رویکرد تک‌بخشی و دو بخش ضریب زوال جدار برای تابستان و زمستان به طور مجزا از طریق کالیبراسیون مدل به دست آمد و در رویکرد تک‌بخشی ضریب زوال جدار به صورت اتفاقی در هر دو فصل برابر ۰/۰۸ شد.

از مهم‌ترین علت‌های این اتفاق میزان غلظت کلر موجود در هر بخش است. با توجه به این که در این خط انتقال تنها یکبار کلر زنی انجام می‌شود (فقط در تصفیه‌خانه باباشیخعلی)، غلظت کلر موجود در آب در بخش اول به مراتب بیشتر از غلظت کلر در بخش دوم است. بالا بودن غلظت کلر در آب به دو صورت تأثیرگذار است. بالا بودن غلظت کلر به عنوان مواد اولیه واکنش، میل به انجام واکنش‌های زوال کلر هم در جدار و هم در حجم را افزایش می‌دهد. در عین حال هنگامی که غلظت کلر به مقدار قابل توجه بالا باشد، فرصت تشکیل میکروارگانیسم‌ها بر روی جدار فراهم نمی‌شود. بنابراین غلظت بالای کلر در عین حال که ضریب k_B و k_W را افزایش می‌دهد، مقدار افزایش k_B بیشتری را نسبت به k_W در پی دارد. از عوامل دیگر برای بیشتر بودن مقدار در k_B بخش اول نسبت به بخش دوم، بالا بودن سرعت واکنش‌های حجمی در ساعات ابتدایی کلر زنی است. علاوه بر آن در بخش اول خط انتقال، سرعت آب در لوله‌ها با توجه به دبی مصرفی و قطر لوله‌های موجود بیشتر از سرعت آب در بخش دوم است. بالا بودن سرعت آب موجب کنده شدن میکروارگانیسم‌های احتمالی از جدار لوله و انتقال آن به واکنش‌های فاز حجمی آب می‌شود. از طرفی جنس و سن لوله و نیز دمای آب از عوامل مؤثر بر ضریب زوال جدار است و طبق مشخصات خطوط آبرسانی اصفهان بزرگ، در بخش دوم، میانگین سن لوله‌ها از سن لوله‌ها در بخش اول کمتر است، بنابراین ضریب جدار کوچک‌تری برای بخش دوم بدست آمد.

آزمایشگاهی، برآزش شده و بر اساس آن ضریب زوال توده‌ای تک‌بخشی محاسبه شده است. سرعت واکنش‌های کلر به دلیل واکنش‌های تند در ساعات ابتدایی و واکنش‌های آهسته متغیر است. علاوه بر این تغییر دما در طول مسیر باعث ثابت نبودن ضریب زوال توده‌ای می‌شود (Vieira et al., 2004). بنابراین در رویکرد دوبخشی، خط انتقال به دو بخش تقسیم و دو ضریب زوال توده‌ای با توجه به سن آب در آن بخش محاسبه می‌شود. به این ترتیب بخش اول از تصفیه‌خانه تا مخزن گورت با سن آب کمتر از ۲۴ ساعت (خط نقطه‌چین) و بخش دوم از مخزن گورت تا شهر نایین با سن آب بیش از ۲۴ ساعت (خط چین) در نظر گرفته شد. ضریب زوال توده‌ای با ترسیم مقادیر غلظت کلر بر حسب زمان و استخراج ضریب زواویه خطوط گذرنده از این نقاط، برای کل خط انتقال برابر ۰/۲۸ بر روز، در رویکرد دوبخشی در بخش اول برابر ۰/۵۳ بر روز و در بخش دوم برابر ۰/۲۲ بر روز محاسبه شد. به همین ترتیب ضریب زوال توده‌ای برای زمستان در رویکرد تک‌بخشی برابر ۰/۱ و در رویکرد دوبخشی برای بخش اول و دوم به ترتیب برابر ۰/۲ و ۰/۰۶ بر روز محاسبه شد. مقدار ضریب جدار در رویکرد تک‌بخشی از واکنش مرتبه اول برابر ۰/۰۸ متر بر روز با خطای جذر میانگین مربعات برابر ۰/۰۹ در نظر گرفته شد (شکل ۳). مقدار این ضریب در رویکرد دو بخش، در بخش اول خط انتقال برابر ۰/۲ و در بخش دوم خط انتقال برابر ۰/۱۳ متر بر روز در فصل تابستان به دست آمد.

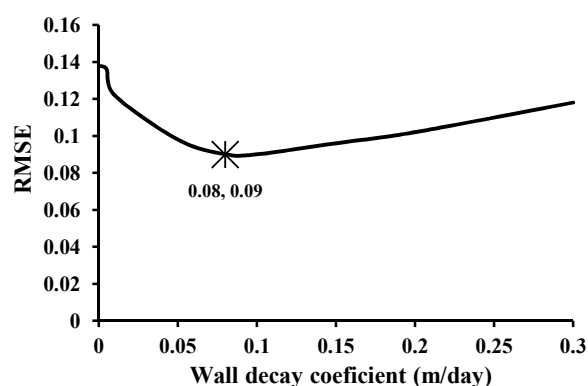


Fig. 3. Simulation error rate wall reaction first order in the integrated approach in the summer
 شکل ۳- میزان خطای شبیه‌سازی واکنش جدار از مرتبه اول در رویکرد تک‌بخشی برای فصل تابستان

طولانی بودن مسافت (۲۸۸ کیلومتر) و تغییرات سرعت آب و تغییر مشخصات لوله‌ها در طول مسیر، تأثیر قابل توجهی در دقیق‌تر شدن نتایج حاصل از شبیه‌سازی داشته است. درصد خطا بین غلظت کلر اندازه‌گیری شده و غلظت پیش‌بینی شده توسط مدل، برای دمای ۱۸ و ۶ درجه‌ی سلسیوس (متناظر با تابستان و زمستان) برای گره‌های اصلی در جدول ۴ مشاهده می‌شود. خطای جذر میانگین مربعات و میانگین درصد خطای شبیه‌سازی‌ها در جدول ۵ خلاصه شده است که نشان دهنده بهبود قابل ملاحظه نتایج است. لازم به ذکر است خطای ۱۰۰ درصدی در گره مخزن نایین

۳-۴- نتایج شبیه‌سازی غلظت کلر باقیمانده در رویکرد تک‌بخشی و دوبخشی

مقایسه مقادیر غلظت کلر شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار و اندازه‌گیری شده در دو رویکرد تک‌بخشی و دوبخشی در شکل ۵ مشاهده می‌شود. در این شکل خط ۴۵ درجه نشان‌دهنده انطباق کامل غلظت‌های کلر مشاهده شده و پیش‌بینی شده در گره‌های مختلف است. چنانچه ملاحظه می‌شود، مقدار غلظت کلر شبیه‌سازی شده در رویکرد دوبخشی به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر از رویکرد تک‌بخشی است. لذا تفکیک خط انتقال آب اصفهان به علت

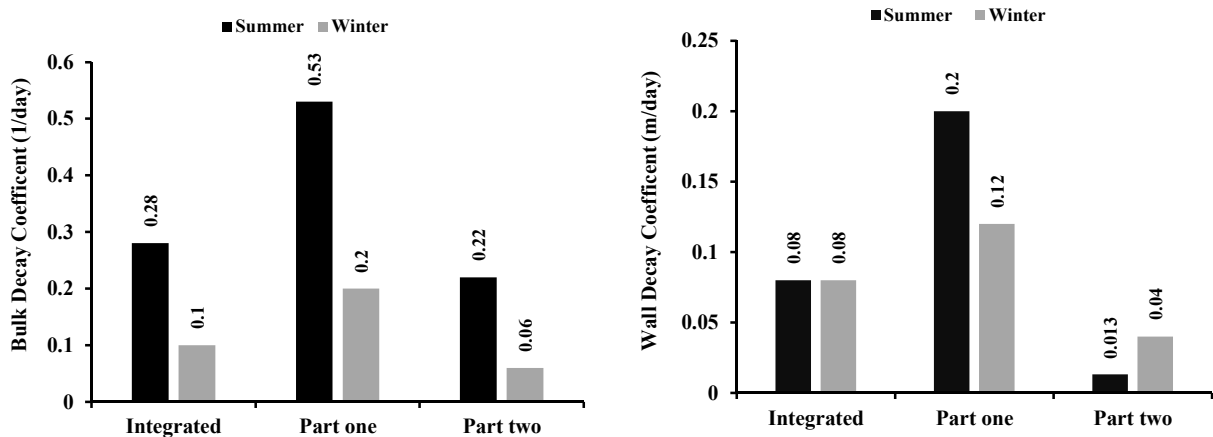


Fig. 4. Decay coefficients of integrated and bisection in summer and winter

شکل ۴- ضرایب زوال تک‌بخشی و دوبخشی در تابستان و زمستان

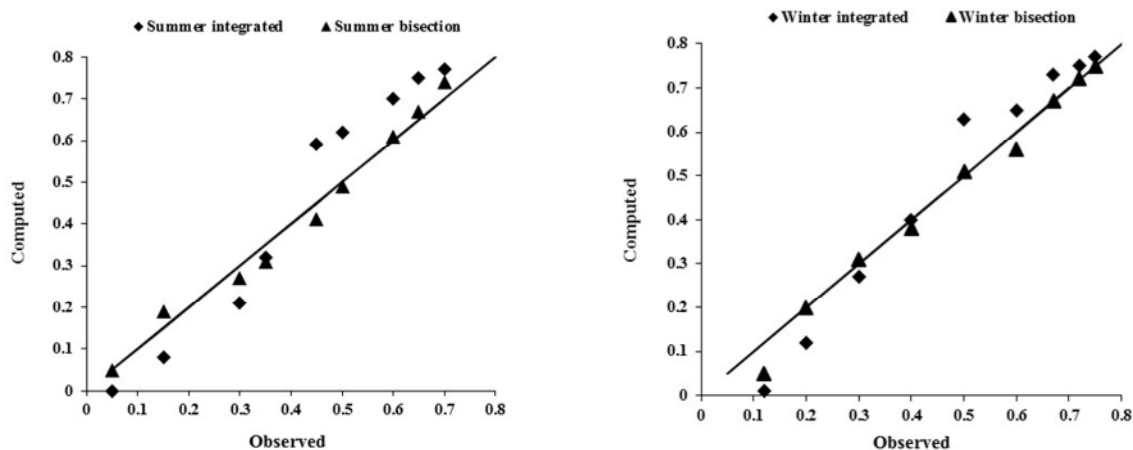


Fig. 5. Correlation plot for measured and predicted chlorine concentration values. The 45° line represents the perfect match (chlorine concentration in milligrams per liter)

شکل ۵- نمودار همبستگی بین مقادیر غلظت کلر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده. خط ۴۵ درجه نشان‌دهنده انطباق کامل است (غلظت کلر بر حسب میلی‌گرم بر لیتر)

P-Value در دمای ۱۸ درجه سلسیوس (فصل تابستان) ۰/۰۰۱ و در دمای ۶ درجه سلسیوس (فصل زمستان) ۰/۰۲۳ به دست آمد. این مقادیر کوچک تر از ۰/۰۵ است که بیانگر وجود اختلاف معنی دار بین خطاها در حالت تک بخشی و دو بخشی است.

۴- نتیجه گیری

شبیه سازی زوال کلر در خط انتقال آب اصفهان با مدل مرتبه اول در نرم افزار EPANET با دو رویکرد تک بخشی (یکپارچه) و دو بخشی (تفکیک خط انتقال) برای فصول تابستان و زمستان انجام شد. به این منظور ابتدا ضریب زوال توده ای از طریق آزمایش و ضریب زوال جدار با روش سعی و خطا به طوری که مقدار خطای حداقل مربعات کمتر بشود، به دست آمد.

در شبیه سازی با رویکرد تک بخشی، برای کل خط انتقال آب ضریب زوال دیوار برابر ۰/۰۸ و ضریب زوال توده ای برابر ۰/۲۸ به دست آمد. در رویکرد دو بخشی ضریب زوال توده ای برای بخش اول و دوم تغییر نموده و به ترتیب برابر ۰/۵۳ و ۰/۲۲ و ضریب زوال جدار به ترتیب ۰/۲ و ۰/۱۳ در فصل تابستان تعیین شد. نتایج به دست آمده نشان می دهد که شبیه سازی های حالت دو بخشی نسبت به حالت تک بخشی تخمین بهتری را نشان می دهد و مقدار خطای RMSE به اندازه ۵۰ درصد کاهش می یابد. اختلاف در واکنش های اولیه و ثانویه کلر، طول زیاد خط انتقال آب اصفهان، تغییرات سرعت آب در لوله ها و متنوع بودن جنس و سن لوله ها در طول مسیر از عواملی هستند که نشان می دهند در نظر گرفتن ضرایب زوال ثابت در کل خط انتقال آب اصفهان مناسب نیست. مزیت جداسازی خط انتقال به دو یا چند بخش این است که امکان اختصاص ضرایب زوال مناسب هر بخش با در نظر گرفتن سن و جنس لوله ها و شرایط هیدرولیکی در آن محدوده فراهم می شود.

References

- Abokifa, A. A., Yang, Y. J., Lo, C. S. & Biswas, P. 2016. Investigating the role of biofilms in trihalomethane formation in water distribution systems with a multicomponent model. *Water Research*, 104, 208-219.
- Ahn, J., Lee, S., Choi, K. & Koo, J. 2012. Application of epanet for the determination of chlorine dose and prediction of thms in a water distribution system. *Sustainable Environment Research*, 22, 31-38.
- Al-Jasser, A. O. 2011. Pipe service age effect on chlorine decay in drinking-water transmission and distribution systems. *Clean - Soil, Air, Water*, 39, 827-832.
- Beddo, V. C. & Kreuter, F. 2015. *A handbook of statistical analyses using spss*, Chapman & Hall/CRC Press Llc., USA.

جدول ۴- درصد اختلاف بین نتایج شبیه سازی و مقادیر اندازه گیری زوال کلر در برخی گره ها

Table 4. The difference percentage between simulation results and measurement values of decay chlorine in some nodes

Sampling points	Error (%)			
	Summer		Winter	
	Integrated	Bisection	Integrated	Bisection
Oshtorjan	10	5.71	2.67	0
Falavarjan	15.38	3.1	4.17	0
Felman	16.67	1.67	8.96	0
Abshar	24	-2	8.33	-6.67
Timyart	-8.57	-11.42	0	-5.00
Nacen	-100	0	-91.67	-58.33

جدول ۵- خطای جذر میانگین مربعات و درصد خطا بین غلظت های

کلر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده

Table 5. Root mean square error (RMSE) and error percentage rate between measured and simulated chlorine concentrations

Temperature (° C)	RMSE		Average error (%)	
	Bisection	Integrated	Bisection	Integrated
18	0.03	0.09	6.87	28.5
6	0.025	0.064	6.84	18.19

با رویکرد تک بخشی در فصل تابستان، به علت اختلاف مقدار غلظت کلر پیش بینی شده توسط مدل (صفر) و مقدار اندازه گیری شده در این نقطه (۰/۰۵ میلی گرم در لیتر) است. برای بررسی معنی داری این کاهش خطاها در حالت دو بخشی نسبت به حالت تک بخشی، از آزمون ناپارامتریک معادل آزمون T یعنی Mann-Whitney Test در نرم افزار SPSS استفاده شد (Beddo and Kreuter, 2015) با انجام این آزمون برای داده های مذکور مقدار

- Bensoltane, M. A., Zeghadnia, L., Djemili, L., Gheid, A. & Djebbar, Y. 2018. Enhancement of the free residual chlorine concentration at the ends of the water supply network: case study of Souk Ahras city – Algeria. *Journal of Water and Land Development*, 38, 3-9.
- Boccelli, D. L., Tryby, M. E., Uber, J. G. & Summers, R. S. 2003. A reactive species model for chlorine decay and thm formation under rechlorination conditions. *Water Research*, 37, 2654-2666.
- Boulos, P. F., Vasconcelos, J. J., Rossman, L. A., Clark, R. M. & Grayman, W. M. 1997. Kinetics of chlorine decay. *Journal of American Water Works Association*, 89, 54-65.
- Castro, P. & Neves, M. 2010. Chlorine decay in water distribution systems case study. Lousada network. Electronic. *Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, 2, 261-266.
- Gheybi, M. & Danesh, S. 2007. Indicating the bulk decay reaction order using the non-linear multi-variable regression methods and calculating the reaction constant through an integration of simulink simulation environment and the genetic algorithm (GA). *4th International Conf. of Environmental Planning and Management*, Fersowski Unveristy of Mashhad, Iran. (In Persian)
- Fisher, I., Kastl, G. & Sathasivan, A. 2017. A comprehensive bulk chlorine decay model for simulating residuals in water distribution systems. *Urban Water Journal*, 14, 361-368.
- Fisher, I., Kastl, G., Sathasivan, A., Cook, D. & Seneverathne, L. 2015. General model of chlorine decay in blends of surface waters, desalinated water, and groundwaters. *Journal of Environmental Engineering*, 141, 1-10.
- Fisher, I., Kastl, G. & Sathasivan, A. 2011. Evaluation of suitable chlorine bulk-decay models for water distribution systems. *Water Research*, 45, 4896-4908.
- Georgescu, A. M. & Georgescu, S. C. 2012. Chlorine concentration decay in the water distribution system of a town with 50000 inhabitants. *Upb Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 74, 103-114.
- Goyal, R. V. & Patelb, H. M. 2017. Optimal location and scheduling of booster chlorination stations for drinking water distribution system. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 5, 51-60.
- Haas, C. N. & Karra, S. B. 1984. Kinetics of wastewater chlorine demand exertion. *Journal of The Water Pollution Control Federation*, 56, 170-173.
- Hallam, N. B., West, J. R., Forster, C. F. & Simms, J. 2001. The potential for biofilm growth in water distribution systems. *Water Research*, 35, 4063-4071.
- Kohpaei, A. J., Sathasivan, A. & Aboutalebi, H. 2011. Evaluation of second order and parallel second order approaches to model temperature variation in chlorine decay modelling. *Desalination and Water Treatment*, 32, 100-106.
- Monteiro, L., Figueiredo, D., Dias, S., Freitas, R., Covas, D. Menaia, J. et al. 2014. Modeling of chlorine decay in drinking water supply systems using Epanet MSX. *Procedia Engineering*, 70, 1192-1200.
- Mostafa, N. G., Matta, M. E., Halim, H. A. & Monteiro, L. 2013. Simulation of chlorine decay in water distribution networks using EPANET – case study. *Civil and Environmental Research*, 3, 100-116.
- Powell, J. C., Hallam, N. B., West, J. R., Forster, C. F. & Simms, J. 2000. Factors which control bulk chlorine decay rates. *Water Research*, 34, 117-126.
- Tiruneh, A. T., Debessai, T. Y., Bwembya, G. C., Nkambule, S. J. & Zwane, L. 2019. Variable chlorine decay rate modeling of the matsapha town water network using EPANET program. *Journal of Water Resource and Protection*, 11, 37-52.
- Vieira, P., Coelho, S. T. & Loureiro, D. 2004. Accounting for the influence of initial chlorine concentration, TOC, iron and temperature when modelling chlorine decay in water supply. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, 53, 453-467.