

## شبیه‌سازی تغییرات غلظت کلر باقیمانده و بهینه‌سازی مصرف کلر در خط انتقال آب اصفهان بزرگ

یاسمن فروزنده<sup>۱</sup>، احمد شانه‌ساززاده<sup>۲\*</sup> و علی دهنوی<sup>۳</sup>

### چکیده

از کلر به دلیل کارایی بالا و اقتصادی بودن، به‌عنوان معمول‌ترین گندزدا، در شبکه‌های آبرسانی استفاده می‌شود. در این پژوهش، مقدار کلر باقیمانده در خط انتقال آب اصفهان بزرگ، از تصفیه‌خانه باباشیخعلی تا شهر نایین با مدل‌های سینتیکی مرتبه اول، موازی و مرتبه دوم تک واکنش‌گر با استفاده از افزونه MSX در نرم‌افزار EPANET در فصل‌های مختلف سال شبیه‌سازی شد. بدین‌منظور ابتدا برای تعیین ضریب زوال حجمی کلر، آزمایش‌های بطری در دماهای ۶، ۱۳ و ۱۸ درجه سلسیوس انجام گرفت. مقایسه مقدار خطای جذر میانگین مربعات نتایج مدل‌های مختلف شبیه‌سازی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داد در صورتی که در فرآیند شبیه‌سازی، خط انتقال به دو یا چند قسمت تقسیم و برای هر قسمت ضریب زوال جداگانه در نظر گرفته شود، نتایج بهبود می‌یابد و در این صورت، مدل‌های مختلف مزیتی بر یکدیگر ندارند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در رویکرد فعلی، یعنی تزریق در مبداء، غلظت کلر در ابتدای خط انتقال زیاد و در انتهای خط از حداقل مقدار مجاز کمتر است. برای رعایت حدود استاندارد، تزریق مجدد کلر با دو رویکرد در مسیر خط انتقال آب بررسی شد. در رویکرد اول، برای افزایش غلظت کلر تا رسیدن به حداقل غلظت مورد نیاز در انتهای خط انتقال، در یک گره میانی تزریق مجدد کلر انجام و در رویکرد دوم از میزان تزریق در ابتدای خط کاسته و سه گره برای تزریق مجدد کلر انتخاب شد. مقایسه نتایج نشان داد که تزریق کلر در طول خط، علاوه بر حفظ استاندارد حداقل کلر در کل طول خط و کاهش غلظت کلر در نواحی ابتدایی خط انتقال، باعث کاهش حدود ۵۰ درصدی میزان کلر مصرفی در کل خط انتقال می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** زوال کلر، کلر باقیمانده، کیفیت آب آشامیدنی، کلر زنی مجدد، EPANET MSX.

**ارجاع:** فروزنده ی. شانه‌ساززاده ا. و دهنوی ع. ۱۳۹۹. شبیه‌سازی تغییرات غلظت کلر باقیمانده و بهینه‌سازی مصرف کلر در خط انتقال آب اصفهان بزرگ. مجله پژوهش آب ایران. ۳۷: ۱۸۷-۱۹۵.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان.

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان.

\* نویسنده مسئول: [a.shanehsazzadeh@eng.ui.ac.ir](mailto:a.shanehsazzadeh@eng.ui.ac.ir)

تاریخ پذیرش: 1398/10/07

تاریخ دریافت: 1398/06/23

## مقدمه

تأمین کیفیت مطلوب آب آشامیدنی، از اهداف مهم طراحی شبکه و مدیریت بهره‌برداری شبکه‌های آبرسانی است. در برای حفظ کیفیت آب در شبکه‌های آبرسانی و کاهش آلودگی‌های میکروبی آب توزیع شده و به‌عنوان مرحله نهایی در تصفیه آب، آب آشامیدنی قبل از انتقال به مصرف‌کنندگان گندزایی می‌شود. دلایل اصولی و پایه‌ای در گندزایی آب آشامیدنی، حصول اطمینان از نابودی میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا و محافظت از ورود و رشد آن‌ها در سیستم توزیع است (نگوان و همکاران، ۲۰۱۳). باقی ماندن ماده گندزدا به‌عنوان مقادیر باقیمانده در طی ذخیره و توزیع آب شرب، مهم‌ترین عاملی است که در انتخاب مواد گندزدا باید بدان توجه کرد. از کلر به دلیل حفظ باقیمانده، کارایی مؤثر و همچنین جنبه‌های اقتصادی به‌عنوان معمول‌ترین گندزدا در شبکه‌های آبرسانی استفاده می‌شود (نگوان و همکاران، ۲۰۱۳؛ جایجان و همکاران، ۲۰۱۲). کلر در هنگام حرکت در امتداد یک لوله یا استقرار در مخازن ذخیره، دستخوش زوال حجمی (واکنش با ترکیبات موجود در آب) و زوال جدار (واکنش در جداره لوله) قرار می‌گیرد که این امر باعث کاهش غلظت آن می‌شود (بوسلی و همکاران، ۲۰۰۳؛ جاسر، ۲۰۰۷؛ نگوان و همکاران، ۲۰۱۳). نگهداری غلظت کلر باقیمانده در حد استاندارد در شبکه‌های آبرسانی برای حفظ کیفیت آب آشامیدنی حائز اهمیت است. در اثر کمبود غلظت کلر خطر آلودگی میکروبی و در اثر تجاوز غلظت کلر از حدود مجاز، محصولات جانبی حاصل از گندزایی افزایش می‌یابد و خطر سرطان‌زایی در شبکه وجود دارد (آبوکیفا و همکاران، ۲۰۱۶؛ نگوان و همکاران، ۲۰۱۳)؛ بنابراین لازم است با شناخت واکنش‌های حجمی و واکنش‌های جدار کلر در سیستم‌های توزیع یا خطوط انتقال آب، زوال کلر و مقدار باقیمانده آن در محل مصرف بررسی و سپس با تدبیر و مدیریت در تزریق غلظت مناسبی از کلر در گره‌های کلر زنی، کیفیت آب آشامیدنی در نقاط مصرف بهینه شود. عواملی همچون غلظت اولیه کلر، غلظت مواد آلی، دما، ساختار شبکه، عمر و جنس اجزای شبکه و شرایط بهره‌برداری در تغییرات غلظت کلر باقیمانده در شبکه تأثیرگذار است (وی‌آرا و همکاران، ۲۰۰۴). لزوم آگاهی از میزان تأثیر این مؤلفه‌ها و شناخت دقیق تغییرات غلظت

کلر در شبکه و همچنین کنترل شرایط و پیشگیری از کاهش یا افزایش غلظت مجاز کلر، منجر به گسترش مدل‌های متعددی برای شبیه‌سازی کلر باقیمانده شده است. برای شبیه‌سازی واکنش‌های فاز حجمی کلر، مدل مرتبه اول تک‌گونه‌ای به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (پاول و همکاران، ۲۰۰۰؛ مونتیرا و همکاران، ۲۰۱۴؛ جایجان و همکاران، ۲۰۱۴). برای ارتقای سادگی این مدل، مدل مرتبه اول حدی و موازی با رویکرد تک‌گونه‌ای و مدل‌های مرتبه دوم تک‌واکنشگر و دو واکنشگر با رویکرد چندگونه‌ای گسترش یافتند (فیشر و همکاران، ۲۰۱۵؛ فیشر و همکاران، ۲۰۱۱؛ هس و کارا، ۱۹۸۴). برای واکنش زوال جدار کلر، به طور کلی از مدل سینتیکی مرتبه صفر و مرتبه اول استفاده می‌شود (بولوس و همکاران، ۱۹۹۷). برای شبیه‌سازی واکنش‌های زوال کلر، لازم است ضرایب زوال شامل ضریب زوال حجمی ( $k_b$ ) و ضریب زوال جدار ( $k_w$ ) مشخص باشند.  $k_b$  با آزمایش بطری و  $k_w$  از طریق کالیبراسیون تعیین می‌شوند (نگوان و همکاران، ۲۰۱۳؛ وی‌آرا و همکاران، ۲۰۰۴). نرم‌افزار EPANET یک نرم‌افزار قابل اطمینان برای شبیه‌سازی کمی و کیفی خطوط انتقال آب و شبکه است. نرم‌افزار EPANET ابتدا در سال ۱۹۹۳ به‌عنوان یک سیستم هیدرولیکی-کیفی آب توسط سازمان محیط‌زیست آمریکا توسعه یافت. مؤلفه کیفیت آب در EPANET به ردیابی انتقال و مقدار فقط یک گونه شیمیایی محدود می‌شود و واکنش‌ها در فاز حجمی و جدار را از سینتیک مرتبه اول مدل می‌کند (رویگرد تک‌گونه‌ای) (راسمن، ۲۰۰۰). افزونه MSX نرم‌افزار EPANET که در سال ۲۰۰۸ میلادی گسترش یافت، امکان شبیه‌سازی با رویکرد چندگونه‌ای را نیز برای کاربر فراهم می‌کند. در این نرم‌افزار سینتیک واکنش‌های شیمیایی، از طریق مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل معمولی به مدل معرفی می‌شوند (شانگ و همکاران، ۲۰۰۸). نگوان و همکاران (۲۰۱۳) با مدل‌سازی مصرف کلر در دو شبکه توزیع آب به بررسی توانایی نرم‌افزار EPANET و مدل مرتبه اول پرداختند. ایشان برای تخمین ضریب واکنش حجمی سیال در معادله مرتبه اول آزمایش بطری را انجام دادند (نگوان و همکاران، ۲۰۱۳). فیشر و همکاران (۲۰۱۱) به مقایسه سه مدل زوال حجمی کلر، مدل تک-واکنشگر، دو-واکنشگر و مدل ضریب

هیدرولیکی-کیفی EPANET و یک مدل بهینه‌ساز چند هدفه پرداختند.

در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی کیفی وضعیت فعلی خط انتقال آب اصفهان بزرگ انجام و نتایج ناشی از تزریق مجدد کلر بررسی می‌شود. بدین منظور ابتدا خط انتقال آب اصفهان در محیط نرم‌افزار EPANET شبیه‌سازی هیدرولیکی و سپس شبیه‌سازی کیفی کلر با مدل مرتبه اول، مدل موازی و مدل مرتبه دوم تک‌واکنشگر برای فصل‌های مختلف سال شد. با استفاده از رویکرد چندبخشی نمودن خط انتقال و استفاده از ضرایب و پارامترهای زوال متناسب با همان قسمت، نتایج شبیه‌سازی به میزان قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد (فروزنده، ۱۳۹۷). پس از صحت‌سنجی و اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های خط انتقال، میزان غلظت موجود کلر باقیمانده در گره‌های خط انتقال با مقادیر استاندارد مقایسه شده است. در ادامه با تزریق کلر در گره‌های انتخابی خط انتقال، مقادیر مصرف و غلظت کلر باقیمانده در تمام گره‌ها بهینه شده است.

## مواد و روش‌ها

### شبیه‌سازی خط انتقال آب اصفهان بزرگ

خط انتقال آب آشامیدنی اصفهان با طول ۲۵۸ کیلومتر از تصفیه‌خانه بابا شیخ علی در غرب اصفهان تا شهر ناین در شرق اصفهان امتداد دارد و در طول مسیر خود جمعیت حدود ۴ میلیون نفر را در شهرهای مختلف استان پوشش می‌دهد. ظرفیت اسمی خط ۱۱/۷ مترمکعب در ثانیه است. مشخصات کلی خط انتقال اصفهان بزرگ در جدول ۱ درج شده است. در این پژوهش ابتدا خط انتقال آب اصفهان با ۳۸ گره، دو ایستگاه پمپاژ و مخازن واقع در هزارگریب و گورت برای دبی خروجی ۱۱/۳۷، ۱۰/۲۰۰ و ۸/۵۰۰ مترمکعب در ثانیه (دبی در فصل تابستان، زمستان و بهار) در نرم‌افزار EPANET شبیه‌سازی هیدرولیکی شده و نتایج با استفاده از داده‌های فشار در گره‌های مختلف (که از شرکت آبفا اصفهان اخذ شده است) و اسنجی و صحت‌سنجی شده است (فروزنده، ۱۳۹۷). شمای خط انتقال و نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل رنگ‌های نشان داده شده روی گره‌ها، سن آب و اعداد روی خطوط دبی حداکثر جریان را در فصل تابستان نشان می‌دهد. سن آب،

میزان واکنش متغیر در محیط EPANET MSX پرداختند. طبق نتایج آن‌ها مدل‌های مرتبه دوم دو واکنش‌گر و مدل ضریب میزان واکنش متغیر، مدل‌هایی هستند که زوال حجمی کلر را دقیق‌تر شبیه‌سازی می‌کنند (فیشر و همکاران، ۲۰۱۱). مونتریا و همکاران (۲۰۱۴) با به‌کارگیری MSX به ارزیابی عملکرد مدل مرتبه دوم دو واکنشگر، مدل سینتیکی مرتبه اول و مدل سینتیکی مرتبه n در یک سیستم انتقال پرداختند. نتایج کار آنان نشان داد که مدل مرتبه دوم فرآیندهای مصرف کلر در فاز حجمی سیستم توزیع را بهتر توصیف می‌کند و وابستگی ناچیزی به کالیبراسیون زوال جدار دارد (مونتریا و همکاران، ۲۰۱۴). فیشر و همکاران (۲۰۱۶) مدل جامع دو واکنش‌دهنده<sup>۱</sup> را برای شبیه‌سازی زوال حجمی کلر در شبکه‌های توزیع معرفی کردند. این مدل در EPANET-MSX قابل شبیه‌سازی است (فیشر و همکاران، ۲۰۱۶).

امروزه علاوه بر شبیه‌سازی غلظت کلر، بهینه کردن مصرف کلر در خطوط انتقال برای نگهداری غلظت کلر باقیمانده در حد استاندارد مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در شبکه‌های گسترده و خطوط انتقال آب طولانی تزریق مجدد کلر روش موثری برای کنترل مقدار کافی کلر باقیمانده است. اوهار و استفلد (۲۰۱۴) برای شبیه‌سازی زوال کلر از مدل مرتبه دوم با رویکرد چندگونه‌ای در افزونه MSX استفاده کردند. سپس با بهینه‌سازی مقدار تزریق کلر برای دستیابی به آب آشامیدنی با مقدار کلر باقیمانده در محدوده استاندارد، یک روش جدید برای طراحی، نصب و راه‌اندازی تقویت‌کننده‌های گندزدایی در سیستم‌های توزیع آب را ارائه کردند (اوهار و استفلد، ۲۰۱۴). لی و همکاران (۲۰۱۵) با هدف بررسی زوال کلر و تشکیل ترکیبات جانبی حاصل از کلر زنی و بهینه‌سازی هزینه‌های تزریق کلر، یک مدل بهینه‌سازی چند منظوره از کیفیت آب و هزینه‌های تزریق مجدد کلر را به دست آوردند (لی و همکاران، ۲۰۱۵). یو و همکاران (۲۰۱۸) با به‌کارگیری الگوریتم هارمونی<sup>۲</sup> و الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی غلظت کلر در دو سیستم آبرسانی در کره جنوبی پرداختند (یو و همکاران، ۲۰۱۸). بابایی و همکاران (۱۳۹۱) به بهینه‌سازی میزان تزریق کلر با استفاده از مدل

1- Augmented two-reactant (2RA) model

2- Harmony

سن آب غلظت گندزداها کاهش و میکروارگانیزم‌ها افزایش می‌یابد.

زمان صرف شده توسط یک ذره آب در شبکه تا رسیدن به گره مورد نظر تعریف می‌شود (راسمن، ۲۰۰۰). اهمیت سن آب در این تحلیل از این لحاظ است که با افزایش

جدول ۱- مشخصات خط انتقال آب اصفهان بزرگ

گره	فاصله از تصفیه‌خانه (کیلومتر)	جنس لوله	سن لوله (سال)
اشترجان	۱۷/۷	بتن	۳۰
فلاورجان	۲۸/۷	بتن پیش‌تنیده	۳۰
فلمن	۳۹/۷	بتن پیش‌تنیده	۳۰
هزارجریب	۵۲/۵۲.۷۷	بتن پیش‌تنیده-فولاد	۲۲-۳۹
شیرخانه آبشار	۵۶/۷	بتن پیش‌تنیده	۳۳
مخازن گورت	۶۶/۷	بتن پیش‌تنیده	۱۴
سره راه تیمیارت	۱۰۱/۷	بتن پیش‌تنیده-فولاد	۲۸
مخزن نایین	۲۵۸	چدن-چی‌آرپی-فولاد	۷-۲۸



شکل ۱- شمای کلی از خط انتقال شهر اصفهان و نتایج شبیه‌سازی در فصل تابستان

سن و جنس لوله‌ها تعیین‌کننده زوال جدار است (وی‌آرا و همکاران، ۲۰۰۴؛ نگوان و همکاران، ۲۰۱۳). به دلیل طولانی بودن مسیر انتقال آب تا شهر نایین (۲۵۸ کیلومتر)، متفاوت بودن سن و جنس لوله‌ها و زمان‌ماند زیاد آب در خطوط، ضرایب زوال ثابت 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 لوله‌ها و شرایط هیدرولیکی در آن محدوده فراهم می‌شود؛ لذا متناسب با سن آب، خط انتقال آب اصفهان به دو بخش (تصفیه‌خانه تا گورت با سن ۲۴ ساعت و گورت تا نایین با سن ۸۲ ساعت) تقسیم و ضرایب زوال حجمی ( $k_B$ ) برای هر بخش از آزمایش‌های بطری محاسبه شد (فروزنده، ۱۳۹۷). نتایج به‌دست آمده توسط فروزنده و همکاران نشان داده است که شبیه‌سازی‌های حالت دوبخشی نسبت به حالت تک‌بخشی

برای شبیه‌سازی کیفی جریان، ضریب زوال حجمی ( $k_B$ ) بر اساس سن آب در دو بخش اندازه‌گیری و اعمال شده است. برای تعیین ضرایب زوال حجمی کلر ( $k_B$ )، از آزمایش‌های بطری روی نمونه آب برداشت شده از خروجی تصفیه‌خانه باباشیخعلی استفاده شد. آزمایش‌های بطری در سه دمای ۶، ۱۳ و ۱۸ درجه‌ی سلسیوس (متوسط دمای آب در فصول زمستان، بهار و تابستان در سال ۱۳۹۷) در بازه زمانی ۸۲ ساعته (مدت ماند آب در خط انتقال) با روش رنگ‌سنجی انجام و ضرایب زوال حجمی با آنالیز رگرسیون خطی به‌دست آمدند (فروزنده و همکاران، ۱۳۹۸). ضرایب زوال کلر در جدار، با سعی و خطا در محیط نرم‌افزار به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که نتایج کیفی خروجی از نرم‌افزار به برداشت‌های اندازه‌گیری شده از خط انتقال نزدیک باشد. زوال حجمی تابعی از غلظت اولیه کلر، دما و ماتریکس ترکیبات موجود در آب و

مدل مرتبه اول در EPANET، مدل موازی و مرتبه دوم تک‌واکنشگر در محیط EPANET MSX که تحت سیستم داس اجرا می‌شود، انجام گرفت. واکنش مرتبه اول و معادلات دیفرانسیلی معرفی شده به EPANET-MSX و پارامترهای مدل در جدول ۲ آورده شده است.

(شبه‌سازی با در نظر گرفتن یک ضریب زوال حجمی ثابت و یک ضریب زوال جدار برای کل خط) با مدل سینتیکی مرتبه اول تخمین بهتری را داشته و مقادیر خطای RMSE به اندازه ۵۰ درصد کاهش یافته است (فروزنده و همکاران، ۱۳۹۸). شبه‌سازی کلر باقی‌مانده با

جدول ۲- مدل‌های سینتیکی زوال کلر به کار رفته برای شبه‌سازی کلر در خط انتقال آب اصفهان بر اساس مدل‌های پیشنهادی سایر پژوهشگران (وی آرا و همکاران، ۲۰۰۴؛ فیشر و همکاران، ۲۰۱۱)

نام مدل	معادله دیفرانسیلی	پارامتر	مدل شده در
مرتبه اول	$\frac{dC}{dt} = -k_b C$	$k_b$	EPANET
مرتبه یک موازی	$\frac{dC}{dt} = -k_{b1} X Cl - k_{b2} (1 - X) Cl$	$k_{b1}, k_{b2}, X$	EPANET MSX
مرتبه دوم تک-واکنشگر	$\frac{dC}{dt} = -k_B * Cl * [React]$	$k_B$	EPANET MSX
مرتبه یک جدار	$\frac{dC}{dt} = \frac{4k_w k_f C}{D(k_w + k_f)}$	$k_w, k_f$	MSX EPANET,

### روش تعیین ضریب دمایی ( $\theta$ )

در این پژوهش ضریب دمایی از محاسبه ضرایب زوال حجمی در سه دما در بازه‌های زمانی مختلف آزمایش‌های بطری تخمین زده می‌شود؛ با وجود این با توجه به محدودیت انجام آزمایش بطری در سه دما، به منظور امکان محاسبه ضریب زوال حجمی کلر در سایر دماهایی که ممکن است در فصل‌های مختلف ایجاد شوند، ضریب دمایی برای خط انتقال آب اصفهان تعیین می‌شود. بین ضریب زوال حجمی در دماهای مختلف، قانون آرنیوس<sup>۱</sup>، معادله (۱) برقرار که در این معادله،  $K_1$  ضریب زوال حجمی در دمای  $T_1$  و  $K_2$  ضریب زوال حجمی در دمای  $T_2$  و  $\theta$  ضریب دمایی و یک مقدار ثابت است (راسمن، ۲۰۰۰).

$$\frac{k_2}{k_1} = \theta(T_2 - T_1) \quad (1)$$

### توزیع کلر در چند نقطه از خط انتقال

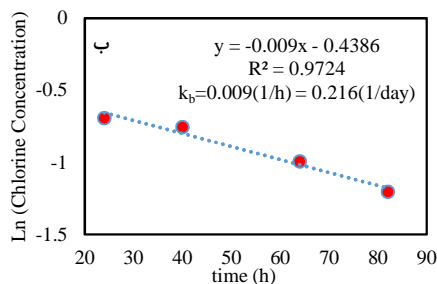
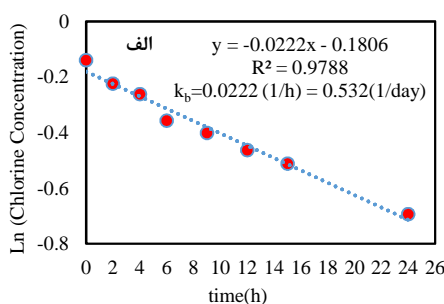
بر اساس استاندارد ۱۰۵۳ برای حفظ کیفیت میکروبی آب باید همواره غلظت کلر در خط انتقال بالای ۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر باشد. از طرفی مقدار زیاد کلر (بیش از ۱ میلی‌گرم بر لیتر) در آب مجاز نیست و باعث سمی شدن و ایجاد مسمومیت می‌شود. بررسی غلظت کلر در نقطه به نقطه خط انتقال اصفهان نشان می‌دهد که غلظت کلر در بخش

در مدل مرتبه اول  $C$  غلظت کلر بر حسب میلی‌گرم بر لیتر و  $k_b$  ضریب زوال حجمی از واکنش درجه یک با واحد یک بر ساعت است. در مدل موازی  $k_{b1}$  ضریب زوال حجمی سریع واکنش و  $k_{b2}$  ضریب زوال حجمی مربوط به واکنش آهسته است. در این پژوهش با توجه به مطالعات انجام شده، زمان لازم برای واکنش‌های زوال سریع کلر ۳ تا ۴ ساعت در نظر گرفته شد (جاسر، ۲۰۰۷؛ وی آرا و همکاران، ۲۰۰۴). پارامتر  $X$  تعیین می‌کند چه مقدار از غلظت اولیه کلر در واکنش سریع و چه مقدار از آن در واکنش کند شرکت می‌کند و مقدار آن بین صفر تا یک است (نگوان و همکاران، ۲۰۱۳). در مدل مرتبه دوم  $Cl$  و  $[React]$  به ترتیب غلظت کلر و غلظت ترکیبات اکسید شونده با کلر و  $k_B$  ضریب زوال حجمی کلر از مرتبه دو بر حسب لیتر بر میلی‌گرم بر ساعت هستند. در واکنش جدار  $k_f$  ضریب انتقال جرمی بر حسب طول بر زمان،  $k_w$  ضریب واکنش جدار بر حسب طول بر زمان و  $D$  قطر لوله است. با اضافه کردن ضرایب و پارامترهای زوال به‌دست آمده به مدل و کالیبراسیون آن با مقادیر اندازه‌گیری شده، امکان بررسی کیفی خط انتقال و شبه‌سازی تغییرات مدنظر فراهم می‌شود. جزئیات انجام آزمایش‌ها، تعیین پارامترها و ضرایب، کالیبراسیون و اعتبارسنجی نرم‌افزار در مرجع (فروزنده، ۱۳۹۷) به تفصیل و در بخش ۳ خلاصه‌ای از نتایج ارائه شده است.

حجمی در مدل موازی ( $k_{b2}, k_{b1}$ ) و  $k_B$  در واکنش مرتبه دوم تک‌واکنشگر از آزمایش‌های بطری به همین ترتیب به‌دست آمدند. گفتنی است ضرایب واکنش توده‌ای کلر برای واکنش از مرتبه دوم با محاسبه شیب خط حاصل از رسم عکس تغییرات غلظت کلر در برابر زمان تعیین می‌شود.

### جدول ۳- نتایج کالیبراسیون هیدرولیکی در برخی گره‌ها برای

نقاط نمونه‌برداری	فصل تابستان		درصد خطا
	اندازه‌گیری	میانگین فشار (متر)	
شیرخانه فلاورجان	۳۴	۳۹/۵۵	۱۶/۳
شیرخانه فلمن	۵۰	۴۴/۹۹	-۱۰/۰
شیرخانه نجف‌آباد	۳۱	۳۶/۴۸	۱۷/۷
شیرخانه آبشار	۶۵	۶۵/۸۹	۱/۴
تیمپارت	۷۰	۶۷/۵۸	-۳/۵



شکل ۲- ضرایب زوال حجمی از مرتبه یک در دمای ۱۸ درجه سلسیوس در دو بخش خط انتقال، الف) بخش اول ب) بخش دوم

همان‌گونه که در بخش ۲ تشریح شد، ضریب زوال جدار با انجام کالیبراسیون، بر اساس جنس و عمر لوله‌ها از واکنش درجه اول به‌دست می‌آید که در این پژوهش در محدوده ۰/۱۳ تا ۰/۲ متر بر روز قرار دارد. نتایج کالیبراسیون کیفی زوال کلر با مدل سینتیکی مرتبه اول، موازی و مرتبه دوم تک‌واکنشگر توسط محاسبه خطای جذر میانگین مربعات، درصد خطا و ضریب همبستگی بین

اول خط انتقال بالا و در بخش دوم مقدار کلر بسیار کم است. از آنجایی که خط انتقال آب اصفهان تا نایین طولانی است و تنها در تصفیه‌خانه کلر زنی انجام می‌شود، این تغییرات زیاد غلظت کلر ابتدا و انتهای خط انتقال دیده می‌شود. برای رساندن غلظت کلر به بازه استاندارد و بهینه کردن آن، همچنین کم کردن هزینه‌های مصرف کلر، ایده تزریق کلر در طول مسیر در دو حالت مطرح و بررسی شد. در حالت اول مقدار کلر اضافه شده در تصفیه‌خانه برابر با مقداری است که هم اکنون اضافه می‌شود (۰/۸ میلی‌گرم بر لیتر). برای انتخاب گره تزریق مجدد کلر، اولین گره در مسیر خط انتقال که غلظت کلر در آن کمتر از ۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر، انتخاب می‌شود. در حالت دوم تزریق مجدد کلر در سه گره شیرخانه فلمن، مخازن گورت و پمپاژ نایین انجام می‌شود. این نقاط در خط انتقال نسبت به سایر گره‌ها شرایط بهتری برای تزریق مجدد کلر یا نصب تجهیزات مورد نیاز را دارند. در حالت دوم، تزریق کلر اولیه در تصفیه‌خانه و کلر اضافه شده در هر گره، به مقداری است که در اولین گره تزریق مجدد کلر، حداقل غلظت کلر معادل ۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر شود.

### نتایج و بحث

#### نتایج شبیه‌سازی هیدرولیکی و کیفی

شبیه‌سازی هیدرولیکی خط انتقال آب اصفهان در نرم‌افزار EPANET با اطلاعات دریافت شده از شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان انجام شد. کالیبراسیون مدل هیدرولیکی با بررسی فشار در گره‌های مختلف و اصلاح ضریب زبری لوله‌ها انجام شد. در جدول ۳ مقادیر فشار محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در برخی از نقاط نشان داده شده است. در نهایت مدل با خطای جذر میانگین مربعات ۴/۰۹ و ۴/۲۴ بر حسب متر و ضریب همبستگی ۰/۹۵۸ و ۰/۹۷۸ بین مقادیر فشار اندازه‌گیری و محاسبه می‌شود، به ترتیب در تابستان و زمستان کالیبره شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با استفاده از آزمایش بطری ضریب زوال حجمی ( $k_b$ ) برای واکنش مرتبه اول در تابستان، مطابق شکل ۲- الف در بخش اول خط انتقال (تصفیه‌خانه تا گورت) ۰/۵۳ بر روز و در بخش دوم خط انتقال مطابق شکل ۲- ب (گورت تا نایین) ۰/۲۲ بر روز استخراج شد. استخراج ضرایب زوال

دارد؛ ولی بهبود نتایج نسبت به مدل مرتبه اول قابل ملاحظه نیست. نتایج ارائه شده در جدول همچنین نشان می‌دهد که غلظت کلر از گره پمپاژ نایین به بعد از حد استاندارد ۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر کمتر شده است.

غلظت‌های کلر اندازه‌گیری شده و غلظت‌های پیش‌بینی شده توسط مدل برای فصل تابستان در جدول ۴ ارائه شده است. مقادیر حاصل شده نشان می‌دهد شبیه‌سازی انجام شده تطابق مناسبی با واقعیت دارد. در بین مدل‌های مورد بررسی مدل مرتبه دوم تک واکنشگر نتایج بهتری

جدول ۴- نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری زوال کلر باقیمانده در برخی گره‌ها در فصل تابستان

نقاط نمونه برداری	مشاهدات	مرتبه اول		مرتبه اول موازی		مرتبه دوم تک‌واکنشگر	
		غلظت کلر	درصدخطا	غلظت کلر	درصدخطا	غلظت کلر	درصدخطا
فلاورجان	۰/۶۵	۰/۶۷	۳/۱	۰/۶۴	۱/۵	۰/۶۴	۱/۵
فلمن	۰/۶	۰/۶۱	۱/۶۷	۰/۵۹	۱/۷	۰/۶	۰/۰
آبشار	۰/۵	۰/۴۹	۲	۰/۴۶	۸/۰	۰/۴۷	۶/۰
سه راه تیمیارت	۰/۳۵	۰/۳۱	۱۱/۴۲	۰/۲۹	۱۷/۱	۰/۳۰	۱۴/۳
پمپاژ نایین	۰/۱۵	۰/۱۹	۲۶/۶۷	۰/۱۷	۱۳/۳	۰/۱۷	۱۳/۳
مخزن نایین	۰/۰۵	۰/۰۵	۰	۰/۰۵	۰/۰	۰/۰۵	۰/۰
خطای جذر میانگین مربعات		۰/۰۳		۰/۰۳۳		۰/۰۲۸	
میانگین قدرمطلق درصد خطا		۶/۸۷		۶/۸۰		۶/۱۰	
ضریب همبستگی		۰/۹۳۳		۰/۹۹۲		۰/۹۹۳	

در نظر گرفتن دو یا چند ضریب زوال حجمی متناسب با سن آب در رویکرد چند بخشی کردن خط و تعیین ضرایب زوال جدار بر اساس جنس و سن لوله‌ها باعث شده تغییر در انواع مدل‌های سینتیکی تأثیری بر بهبود نتایج شبیه‌سازی نداشته باشد.

عملکرد مدل‌ها برای سایر فصل‌ها نیز به همین ترتیب بررسی شد که نتایج آن در جدول ۵ خلاصه شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد که با سه مدل سینتیکی مذکور می‌توان به سطح دقت یکسان و قابل قبولی دست یافت.

جدول ۵- خطای جذر میانگین مربعات بین غلظت‌های کلر اندازه‌گیری شده و غلظت‌های پیش‌بینی شده در مدل‌های مختلف

مرتبه اول	مرتبه اول موازی	مرتبه دوم تک-واکنشگر
۰/۰۳	۰/۰۳۳	۰/۰۲۸
۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۰۳۶
۰/۰۲۹	۰/۰۳۳	۰/۰۴۱

### مقدار ضریب دمایی

مدت ۹ ساعت برابر ۱/۰۶۴، در مدت ۲۴ ساعت برابر ۱/۰۷۲ و در مدت ۸۲ ساعت برابر ۱/۰۹۲ به دست می‌آید. مقدار این ضریب در مطالعات قبلی برابر ۱/۱ تخمین زده شده است (راسمن، ۲۰۰۰). مقدار ضریب دمایی امکان محاسبه ضریب زوال حجمی در سایر دماهایی را که ممکن است در فصل‌های مختلف در خط انتقال ایجاد شود، فراهم می‌کند.

$$\ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = \ln(\theta) \times (T_2 - T_1) \quad (2)$$

مجموع کلر مصرف شده در تصفیه‌خانه و گره پمپاژ نایین در فصل تابستان (بحرانی‌ترین وضعیت مصرف کلر) با توجه به دبی خط انتقال، بر اساس معادله (۳) محاسبه می‌شود.

$$\text{دبی} * \text{کلر تزریق شده} = \text{مقدار کلر} \quad (3)$$

مقدار ضریب دمایی ( $\theta$ ) از محاسبه ضرایب زوال حجمی در دماهای ۱۳، ۶ و ۱۸ درجه و در بازه‌های زمانی ۹، ۲۴ و ۸۲ ساعته محاسبه شد. در مدت زمان ۹ ساعته، ضرایب زوال حجمی در دماهای ۶، ۱۳ و ۱۸ درجه به ترتیب برابر ۰/۳۳، ۰/۴۸ و ۰/۷، در مدت زمان ۲۴ ساعته ۰/۲۳، ۰/۳۹ و ۰/۵۳، و در مدت زمان ۸۲ ساعت ۰/۱۰، ۰/۲۳ و ۰/۲۸ بر روز بر اساس آزمایش بطری به دست آمده است. با بازنویسی معادله (۱) به صورت معادله (۲) و برازش خط از داده‌های رسم شده و محاسبه شیب خط، مقادیر ضریب  $\theta$  برای این سه بازه زمانی به دست می‌آید. در شکل ۳ نمودار خط برازش شده و مقدار ضریب دمایی برای بازه ۲۴ ساعته ارائه شده است. بر این اساس، ضریب دما در

بر اساس این معادله، مجموع کلر مصرف شده در تصفیه‌خانه و گره پمپاژ نایین با توجه به دبی خط انتقال (۱۱۱۳۷ لیتر در ثانیه در تصفیه‌خانه و ۱۱۰ لیتر در ثانیه در پمپاژ نایین) در حالت اول ۸۹۹۲ میلی‌گرم بر ثانیه  $((0.75 \times 11137) + (0.8 \times 11137))$  معادل با ۷۷۷ کیلوگرم بر شبانه‌روز به‌دست می‌آید. در حالت دوم مقدار مصرف کلر مجموعاً برابر ۴۰۴۲ میلی‌گرم بر ثانیه  $((0.7 \times 1110) + (0.3 \times 876) + (0.1 \times 3609/9) + (0.3 \times 11137))$  که معادل با ۳۴۹ کیلوگرم بر شبانه‌روز است. مقایسه مقدار کلر مصرف شده در دو حالت نشان داد این مقدار از حدود ۷۷۷ کیلوگرم بر شبانه‌روز در حالت اول به ۳۴۹ کیلوگرم بر شبانه‌روز در حالت دوم رسیده است. کاهش بیش از پنجاه درصدی مقدار کلر مصرفی در حالت دوم نسبت به حالت اول، در حالتی رخ داده که مقدار حداقل غلظت کلر مورد نیاز در کل خط انتقال نیز رعایت شد. علاوه بر این مقدار میانگین و ماکزیمم غلظت کلر موجود در خط انتقال در حالت دوم نسبت به حالت اول کاهش یافت. نتایج حاصل با یافته‌های پژوهش بوسلی و همکاران (۲۰۰۳) که تزریق کلر را با مدل مرتبه دوم انجام داده‌اند و به نتایج مشابهی در خصوص کاهش مصرف کلر دست یافتند، همچنین با نتایج پژوهش لی و همکاران (۲۰۱۵) که به منظور کاهش هزینه‌های مصرف کلر، از کلرزی مجدد استفاده کردند و با بهینه‌سازی مدل خود مقدار کلر مصرفی را کاهش دادند، مطابقت دارد.

باید توجه داشت که تزریق غلظت اولیه کلر بر مقادیر ضرایب زوال حجمی تأثیرگذار است. بنابراین برای سناریوی دوم نتایج به دست آمده تخمینی نزدیکی به واقعیت از میزان کلر مصرف شده است.

### نتیجه‌گیری

سامانه‌های آبرسانی کنونی، طولانی و متصل هستند و در نتیجه زمان ماند هیدرولیکی زیاد می‌تواند منجر به کاهش غلظت کلر باقی مانده در انتهای خط شود. تزریق غلظت‌های بالای کلر در ابتدای خط برای رفع این مشکل، ضمن اینکه غیر اقتصادی است، باعث ایجاد غلظت بالای کلر در گره‌های ابتدایی خط می‌شود. راهکار مناسب برای حفظ کیفیت آب در این سامانه‌ها تزریق مجدد کلر در طول مسیر است. در این پژوهش شبیه‌سازی کلر در خط انتقال آب اصفهان با استفاده از مدل سینتیکی مرتبه اول

در EPANET، مدل موازی و مرتبه دوم تک‌واکنشگر در محیط EPANET MSX برای فصل‌های مختلف انجام شد. برای کالیبراسیون و اعتبار سنجی مدل و تعیین ضرایب زوال از اطلاعات دریافت شده از اداره آب و فاضلاب اصفهان و انجام آزمایش‌های بطری استفاده شد. آزمایش بطری در دمای ۶، ۱۳ و ۱۸ درجه سانتی‌گراد (فصل تابستان، زمستان و بهار) انجام شده و از نتایج آن، ضریب زوال حجمی کلر برای بخش اول و دوم خط انتقال و مقدار ضریب دمایی ( $\theta$ ) برابر ۱/۰۷۲ به‌دست آمد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی تأثیر تغییر در رویکرد حل (استفاده از مدل‌های سینتیکی مختلف) نسبت به جداسازی خط انتقال به دو یا چند قسمت و اختصاص ضرایب زوال حجمی بر اساس سن آب و اختصاص ضرایب زوال جدار با در نظر گرفتن جنس لوله‌ها و شرایط هیدرولیکی در آن محدوده کمتر است؛ بنابراین با جداسازی‌های مناسب (رویکرد چندبخشی) در خطوط انتقال می‌توان به نتایج قابل قبولی حتی با مدل مرتبه اول در نرم‌افزار EPANET رسید. نتایج شبیه‌سازی وضعیت موجود خط انتقال، کمبود غلظت کلر در گره‌های انتهایی خط انتقال را نشان داد. برای اصلاح این وضعیت، در حالت اول تزریق مجدد کلر در ایستگاه پمپاژ نایین به میزان ۰/۷۵ میلی‌گرم در لیتر با حفظ کلرزی با میزان فعلی در مخزن تصفیه‌خانه بابا شیخعلی بررسی شد. با اعمال این روش غلظت کلر در تمام نقاط در خط انتقال از حداقل غلظت تعیین شده توسط استاندارد (۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر) بیشتر است. در حالت دوم، با کاهش کلرزی در ابتدای خط، سه گره در طول خط انتقال برای تزریق مجدد کلر مکان‌یابی و انتخاب شد. مقایسه نتایج حاصل از این شبیه‌سازی نسبت به حالت اول نشان داد علاوه بر حفظ استاندارد حداقل کلر در کل طول خط و کاهش غلظت کلر در نواحی ابتدایی خط انتقال، حدود ۵۰ درصد میزان کلر مصرفی در کل خط انتقال کاهش یافته است. این میزان برای خط انتقال اصفهان حدود ۴۲۸ کیلوگرم در شبانه روز است که با قیمت روز کلر، می‌تواند تا ۶۴۰ میلیون ریال ماهانه در فصل تابستان صرفه‌جویی شود.

### سیاس‌گذاری

نویسندگان مقاله از جناب آقای مهندس ناصر اکبری معاون بهره‌برداری آب و فاضلاب استان اصفهان و خانم



- Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 41(20): 1843-1882.
11. Fisher I. Kastl G. Sathasivan A. Cook D. and Seneverathne L. 2015. General Model of Chlorine Decay in Blends of Surface Waters, Desalinated Water, and Groundwaters. *Environmental Engineering*. 141(12): 2-10
  12. Haas C. N. and Karra S. B. 1984. Kinetics of wastewater chlorine demand exertion. *Water Pollution Control Federation*. 56(2): 170-1730.
  13. Jae Chan Ahn. Lee S. Choi K. and 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(1): 31-38.
  14. Li C. Yu J. Z. Zhang T. Q. Mao X. W. and Hu Y. J. 2015. Multiobjective optimization of water quality and rechlorination cost in water distribution systems. *Urban Water Journal*. 12(8): 646-652.
  15. Monteiro L. Figueiredo D. Dias S. Freitas R. Covas D. Menaia J. and Coelho S. T. 2014. Modeling of chlorine decay in drinking water supply systems using EPANET MSX. *Procedia Engineering*. 70: 1192-1200.
  16. Nagwan G. M. Matta M. E. Halim H. A. and Monteiro L. 2013. Simulation of Chlorine Decay in Water Distribution Networks Using EPANET- Case Study. *Civil and Environmental Research*. 3(13): 100-116.
  17. Ohar Z. and Ostfeld A. 2014. Optimal design and operation of booster chlorination stations layout in water distribution systems. *Water Research*. 58: 209-220.
  18. Powell J. C. Hallam N. B. West J. R. Forster C. F. and Simms J. 2000. Factors which control bulk chlorine decay rates. *Water Research*. 34(1): 117-126.
  19. Rossman L. A. 2000. *Epanet2 user's manual*. Environmental protection Agency.
  20. Shang F. Uber J. G. Rossman L. A. and K. 2008. *EPANET Multi-Species Extension User's Manual*. Environmental protection Agency. 1-115.
  21. Vieira P. Coelho S. T. and Loureiro D. 2004. Accounting for the influence of initial chlorine concentration, TOC, iron and temperature when modelling chlorine decay in water supply. *Water Supply Research and Technology- AQUA*. 53(7): 453-467.
  22. Yoo D. G. Lee S. M. Lee H. M. Choi Y. H. and Kim J. H. 2018. Optimizing re-chlorination injection points for water supply networks using harmony search algorithm. *Water*. 10(5): 1-19.
- مهندس نسیم جهان فرد که داده‌های لازم برای انجام این پژوهش را در اختیار قرار دادند، تشکر می‌کنند.
- ### منابع
۱. بابایی ن. م. تابش م. نظیف س. فتوحی م. و خواجه‌پور ن. ۱۳۹۱. تعیین میزان بهینه دز کلر در شبکه‌های توزیع آب با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان کیف. سومین همایش ملی مدیریت جامع منابع آب، شهریور ماه، ساری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی.
  ۲. فروزنده ی. ۱۳۹۷. شبیه‌سازی تغییرات غلظت کلر باقیمانده در بخشی از خط انتقال آب اصفهان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه اصفهان. ۱۵۱ ص.
  ۳. فروزنده ی. دهنوی ع. و شانه‌ساززاده ا. ۱۳۹۹. کاربرد روش چندبخشی نمودن طول خط جهت بهبود شبیه‌سازی زوال کلر در خطوط انتقال آب اصفهان بزرگ. مجله آب و فاضلاب. ۱۳(۱): ۱-۱۱.
  4. Abokifa A. A. Yang Y. J. Lo C. S. and Biswas P. 2016. Investigating the role of biofilms in trihalomethane formation in water distribution systems with a multicomponent model. *Water Research*. 104(1): 208-219.
  5. Al-Jasser A. O. 2007. Pipe Service Age Effect on Chlorine Decay in Drinking-Water Transmission and Distribution Systems. *Water Research*. 41(9): 387-396.
  6. Boccelli D. L. Tryby M. E. Uber J. G. and Summers R. S. 2003. A reactive species model for chlorine decay and THM formation under re-chlorination conditions. *Water Research*. 37(11): 2654-2666.
  7. Boulos P. F. Vasconcelos J. J. Rossman L. A. Clark R. M. and Grayman W. M. 1997. Kinetics of chlorine decay. *American Water Works Association*. 89(7): 54-65.
  8. Fisher I. Kastl G. and Sathasivan A. 2011. Evaluation of suitable chlorine bulk-decay models for water distribution systems. *Water Research*. 45(16): 4896-4908.
  9. Fisher I. Kastl G. and Sathasivan A. 2016. A comprehensive bulk chlorine decay model for simulating residuals in water distribution systems. *Urban Water Journal*. 14(4): 361-368.
  10. Fisher I. Kastl G. Sathasivan A. and Jegatheesan V. 2011. Suitability of chlorine bulk decay models for planning and management of water distribution systems.

