



## **UWL REPOSITORY**

**repository.uwl.ac.uk**

Optimal chlorination of water distribution systems considering residual chlorine and formed THM

Ardeshir, A., Behzadian, Kourosh ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1459-8408>,  
Alimohamadnejad, M., Jalilsani, F. and Alizadeghan, H. (2017) Optimal chlorination of water distribution systems considering residual chlorine and formed THM. Sharif Journal of Civil Engineering (SJCE), 33.2 (3.1). pp. 21-29. ISSN 2676-4768

10.24200/J30.2017.20077

This is the Published Version of the final output.

UWL repository link: <https://repository.uwl.ac.uk/id/eprint/8527/>

**Alternative formats:** If you require this document in an alternative format, please contact:  
[open.research@uwl.ac.uk](mailto:open.research@uwl.ac.uk)

**Copyright:** Creative Commons: Attribution 4.0

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

**Take down policy:** If you believe that this document breaches copyright, please contact us at [open.research@uwl.ac.uk](mailto:open.research@uwl.ac.uk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# کلرزنی بهینه‌ی شبکه‌های توزیع آب شهری با درنظر گرفتن کلر باقیمانده و THM تشکیل شده

عبدالله اردشیر (دانشیار)

کوروش پهزادیان\* (استادیار)

محمد علی محمدنژاد (کارشناس ارشد)

فاطمه جلیل تانی (مری)

دانشکده‌ی علوم و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

حسین فروتن علیرادگان (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی

علی رغم پیشنهاد کلرزنی بوستی برای رفع نقاط ضعف کلرزنی در منابع آبی، تعیین دقیق میزان تزریق با توجه به شکل‌گیری  $THM$  همچنان یک معضل است. در نوشتار حاضر، با استفاده از یک مدل الگوریتم زنیک چنددهفه، مکان‌یابی بهینه‌ی ایستگاه‌ها و زمان‌بندی تزریق کلر در هر ایستگاه در یک شبکه‌ی توزیع آب با توجه به میزان کلر باقیمانده و مقدار  $THM$  تشکیل شده انجام شده است. اهداف مدل بهینه‌سازی عبارت اند از: کمینه‌سازی مقدار کل گندزدای مصرفی و بیشینه‌سازی درصد آب آشامیدنی سالم در شبکه. نتایج نشان می‌دهد که افزایش تعداد ایستگاه‌ها نیز باعث کاهش محصولات جانبی کلرزنی می‌شود و غلظت کلر باقیمانده را در بیشتر نقاط شبکه در محدوده‌ی استاندارد حفظ می‌کند. همچنین نقاط دوردست که زمان ماند آب بسیار طولانی است، عدمتاً از هر دو مشکل کلر باقیمانده با غلظت کمتر از حد استاندارد و محصولات جانبی با غلظت بالا رنج می‌برند. به علاوه برای هر تعداد مشخصی از ایستگاه‌های تزریق کلر، بیشینه‌ی میزان تزریق که در آن ریسک سرطان‌زاوی ناشی از محصولات جانبی وجود ندارد، تعیین می‌شود.

ardeshir@aut.ac.ir  
behzadian@aut.ac.ir  
ma\_mn555@aut.ac.ir  
jalilsan@aut.ac.ir  
forootan'h@yahoo.com

وازگان کلیدی: ایستگاه‌های کلرزنی بهینه، شبکه‌ی توزیع آب شهری، محصولات جانبی کلرزنی.

## ۱. مقدمه

گندزدایی آب در تصفیه خانه‌های آب به عنوان یک فرایند ضروری در تصفیه‌ی شیمیایی آب آشامیدنی پیش از ورود آب به شبکه‌ی توزیع به عنوان روش متداول گندزدایی شناخته می‌شود. متداول‌ترین گندزدایی مورد استفاده در بسیاری از تصفیه‌خانه‌ها در حال حاضر ترکیبات مختلف کلر نظری: گاز کلر، کارامین، دی‌اکسید کلر و نظایر آن هستند.<sup>[۱]</sup> معمولاً کلرزنی به عنوان آخرین فرایند تصفیه در تصفیه‌خانه استفاده می‌شود، تا اولاً غالب باکتری‌های بیماری‌زا موجود در آب را از بین برد و ثانیاً با ایجاد یک میزان مشخص از کلر باقیمانده در آب از رشد مجدد آن‌ها در طول زمان در شبکه‌ی توزیع جلوگیری کند.<sup>[۲]</sup> از آنجایی که کلر با مواد آلی موجود در آب واکنش نشان می‌دهد، نسبت به زمان اضمحلال پیدا می‌کند. بنابراین برای دست‌یابی به استانداردهای کیفی آب در محل مصرف توسط مصرف‌کنندگان، سه مشکل بالقوه در روش متداول کلرزنی با کلر در شبکه‌های توزیع آب عبارت‌اند: ۱. میزان بالای مقدار کلر مصرفی در نقاط نزدیک به منابع که معمولاً منجر به غلظت بالای کلر باقیمانده و در نتیجه تغییر بو و مزه‌ی آب در این مناطق می‌شود؛ ۲. اضطرالحال کلر باقیمانده در شبکه، منجر به کاهش کلر باقیمانده در نقاط دوردست شبکه (نسبت به تصفیه‌خانه‌ها) خواهد شد؛ ۳. افزایش امکان شکل‌گیری محصولات جانبی (DBP)<sup>(۱)</sup> با پتانسیل سرطان‌زاوی در شبکه با غلظتی بیشتر از

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۸/۱۲/۱۳۹۳، اصلاحیه ۷/۱۰/۱۳۹۴، پذیرش ۲۱/۱۰/۱۳۹۴.

تعیین تعداد ایستگاه‌ها، میزان کار مصرفی در حالات مختلف جواب‌های بهینه با توجه به تأثیرات منفی  $THM$  تولیدی قابل بررسی نیست. با وجود این، پژوهشگران اندکی اثر کلرزنی چه به صورت متدالو و چه به صورت بسترهای توزیع آب روی مقدار غلظت محصولات جانبی در شبکه‌ی توسعه آب بررسی کرده‌اند. برای نمونه، در مطالعه‌ی  $THM$  در سال ۲۰۰۹ در بررسی تأثیر کلرزنی بسترهای روی کلر باقیمانده و  $THM$  شکل گرفته در شبکه‌ی توسعه آب نتیجه شده است که کلر باقیمانده در شبکه یکنواخت‌تر است و متوسط  $THM$  در بسیاری از بخش‌های سیستم به واسطه کلرزنی بسترهای کاهش یافته است.<sup>[۱۰]</sup> همچنین برخی پژوهشگران در سال ۲۰۱۴، طراحی سیستم کلرزنی بسترهای را با استفاده از مدل بهینه‌سازی تک‌هدفه با درنظر گرفتن تولید محصولات جانبی  $THM$  ارائه شده، در مدل EPANET-MSX ارائه کرده‌اند.<sup>[۱۱]</sup> در صورت استفاده از مدل EPANET-MSX برای مدل سازی  $THM$ ، استفاده از اصل برهم نهی خطی مجاز نیست و استفاده از مدل شبیه‌سازی پیش از ورود به حلقه‌ی بهینه‌سازی وجود ندارد. بنابراین شبیه‌سازی مدل کلرزنی باید در داخل حلقه‌ی بهینه‌سازی انجام شود که این امر برای استفاده در شبکه‌های توسعه آب بزرگ بسیار زمان برداشت که در واقع یک نقطه ضعف جدی محسوب می‌شود. همچنین پژوهشگران مذکور، روش خود را برای یک شبکه‌ی مصنوعی توسعه داده‌اند.

در نوشتار حاضر، در یک مدل بهینه‌سازی مکان‌بایی محل ایستگاه‌های بهینه کلرزنی بسترهای در شبکه‌ی توسعه آب، تأثیر میزان محصولات جانبی تولیدی ( $THM$ ) روی انتخاب نقاط نهایی با هم بررسی شده است. بدین صورت که علاوه بر کلر باقیمانده، میزان  $THM$  نیز به عنوان محصول جانبی کلرزنی برآسان یک رابطه خطی به صورت غیرخطی برآورد و میزان آن در نوشتار حاضر، برای بهره‌گیری از استاندارد مجاز مقایسه شده است. همچنین در نوشتار حاضر، میزان  $THM$  تولید شده با اصل برهم نهی خطی و افزایش سرعت مدل سازی، میزان  $THM$  تولید شده با استفاده از یک روش ساده شده تخمین و در مدل جایگزین شده است. با استفاده از این دیدگاه برخلاف روش‌های پیشین، تصمیم‌گیرنده قادر است تعداد مناسب ایستگاه‌های کلرزنی و همچنین میزان کل کار مصرفی را با توجه به میزان خطوط ناشی از تولید محصولات جانبی تعیین کند. در ادامه‌ی نوشتار، در بخش ۲ به معروفی مدل بهینه‌سازی دوهدفه تزریق کلر در شبکه‌ی توسعه آب؛ توابع هدف و متغیرهای تصمیم، الگوریتم بهینه‌سازی و فرضیات حل مسئله پرداخته شده است. در بخش ۳، یک مطالعه‌ی موردنی معروفی و فرضیات مرتبط توصیف شده است. همچنین در بخش ۴، نتایج مدل بهینه‌سازی ارائه و بر روی آن‌ها بحث شده و در انتهای، جمع‌بندی نوشتار با ارائه خلاصه، نتایج کلیدی و همچنین پیشنهادهایی برای انجام مطالعات آتی انجام یافته است.

## ۲. روش پژوهش

گام‌های پیشنهادی برای روش پیشنهادی در نوشتار حاضر در فلوجاری در شکل ۱ ارائه شده است. برای این منظور، پیش از تدوین و حل مدل بهینه‌سازی، ماتریس ضرایب پاسخ کلر باقیمانده و  $THM$  تولید شده برای کلیه کره‌های شبکه تشکیل شده است. سپس مدل بهینه‌سازی تدوین و حل شده و در نهایت، پس از تعیین رویه‌ی بهینه‌ی پارتو موردنظر، میزان کار باقیمانده و  $THM$  تشکیل شده برای چندین کره شبکه در رویه‌ی بهینه‌ی منتخب بررسی و تحلیل شده است. در ادامه، گام‌های اساسی این روش با جزئیات تشریح شده است.

حد استاندارد. پژوهشگران مختلفی با استفاده از معرفی نقاط و زمان‌بندی بهینه‌ی گشته‌های بسترهای در نقاط میانی شبکه، تقریباً مستقیماً به دو مشکل اول توجه کرده‌اند.<sup>[۱۲]</sup> کلرزنی بسترهای در نقاط بهینه در شبکه‌ی توزیع آب قادر است علاوه بر حفظ مقدار کلر باقیمانده در شبکه در محدوده استاندارد، کل کار مصرفی را نیز کاهش دهد.<sup>[۷-۵]</sup>

به صورت کلی مکان‌بایی بهینه‌ی ایستگاه‌های کلرزنی با ۴ هدف قابل تعریف است:  
 ۱. بیشینه‌سازی حجم آب تحویلی به مصرف‌کنندگان در محل گره‌های شبکه با مقدار کلر باقیمانده در حد استاندارد؛  
 ۲. بیشینه‌سازی حجم آب تحویلی به مصرف‌کنندگان با مقدار محصولات جانبی تولیدشده کمتر از حد مجاز؛  
 ۳. کمینه‌سازی مقدار کلر مصرفی و  
 ۴. کمینه‌سازی کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری ایستگاه‌های تزریق کلر. پژوهشگران مختلف بین المللی به مسئله‌ی مکان‌بایی و زمان‌بندی بهینه‌ی سیستم‌های کلرزنی بسترهای با استفاده از ۳ تابع هدف اول به صورت صریح توجه کرده‌اند.<sup>[۷-۵]</sup><sup>[۱۳]</sup> به عنوان نمونه در سال ۲۰۰۲، در ادامه‌ی مطالعاتی در سال ۱۹۹۸<sup>[۱۷]</sup> یک مدل بهینه‌سازی برای مکان‌بایی کلرزنی بسترهای و همچنین زمان‌بندی بهینه‌ی ارائه شده است.<sup>[۱۵]</sup> یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه نیز برای مسئله‌ی مکان‌بایی و زمان‌بندی کلرزنی در سال ۲۰۰۴ ارائه شده است که در آن دو نوع سیستم کلرزنی براساس جرم کلرزنی ثابت و کلرزنی متناسب با غلظت متغیر با زمان پیشنهاد شده است.<sup>[۱۶]</sup> نتایج مطالعات انجام‌شده مذکور نشان‌دهنده اهمیت و برتری کلرزنی بسترهای نسبت به کلرزنی در منع مصرف است و در کلیه‌ی آن‌ها، میزان کلر باقیمانده در نقاط مختلف شبکه با میزان استاندارد کلر باقیمانده مقایسه شده و برای استفاده‌ی مؤثر مدل‌های پیشنهادی برای کاربرد در شبکه‌های واقعی و بزرگ، با فرض خطی بودن نزخ اصلاح‌کار، شبیه‌سازی مدل کلرزنی واحد برای کلیه گره‌های بالقوه پیش از ورود به حلقه‌ی بهینه‌سازی در مدل EPANET انجام شده و در داخل حلقه با استفاده از اصل برهم نهی خطی فقط از نتایج ذخیره‌شده مدل شبیه‌سازی استفاده شده است که بدین ترتیب انجام مدل بهینه‌سازی در شبکه‌های مذکور میسر شده است.<sup>[۷-۵]</sup>

در ایران نیز سابقه‌ی مطالعات در زمینه‌ی شبیه‌سازی کلر باقیمانده در شبکه‌های توسعه آب از سال ۱۹۹۸ شروع شده است.<sup>[۸]</sup> برای نمونه در سال ۲۰۱۱، کارایی تلفیق مدل‌های تحلیل هیدرولیکی و کیفی EPANET و مدل بهینه‌سازی جهت تعیین میزان تزریق کلر در محل‌های تزریق برای دو نمونه از شبکه‌ی توسعه آب شهری نشان داده شده است.<sup>[۹]</sup> با وجود این شکل‌گیری محصولات جانبی با پتانسیل سلطان زایی نظری تری‌الومتان‌ها ( $THM$ )<sup>[۱۰]</sup> و اسیدهای هالواستیک (HAA)<sup>[۱۱]</sup> به صورت صریح در این مدل‌ها مشاهده شده است، در حالی که با توجه به خطوط سلطان زایی لازم است به ردیابی این محصولات به صورت ویژه توجه شود و از رسیدن میزان آن به تراهای استاندارد و این در آب مصرفی اطمینان حاصل شود. برخی از سازمان‌های محیط‌زیستی نظر سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA)<sup>[۱۲]</sup> یا سازمان بهداشت جهانی (WHO)<sup>[۱۳]</sup> کنترل شکل‌گیری محصولات جانبی نظری  $THM$  و HAA<sup>[۱۴]</sup> را جزء نیازمندی‌های اصلی آب آشامیدنی قرار داده‌اند. این حساسیت زیاد به این دلیل است که مصرف آب آشامیدنی با غلظت بالاتر از حد استاندارد (نظری  $THM$  بالاتر از غلظت ۸۰ میکروگرم بر لیتر و HAA<sup>[۱۵]</sup> بالاتر از غلظت ۶۰ میکروگرم بر لیتر) منجر به افزایش رسیک سلطان برای مصرف‌کنندگان خواهد شد.<sup>[۱۶]</sup> اگرچه پژوهشگرانی که با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی، مکان‌بایی ایستگاه‌های کلرزنی را انجام می‌دهند، اعتقاد دارند که کاهش مصرف کلر مصرفی در شبکه به صورت ضمیمی منجر به کاهش محصولات جانبی در شبکه‌ی توسعه آب خواهد شد. اما در روش‌های مذکور حتی در مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه،

$$V_j^m = \begin{cases} Q_j^m \times \Delta t_h & \text{when } c_j^{\min} \leq c_j^m \leq c_j^{\max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

که در آن‌ها،  $n_b$  تعداد ایستگاه‌های کلرزنی؛  $M_i^k$  کل جرم کل مصرفی ( $\text{kg/day}$ ) در ایستگاه تزریق  $i$  و در دوره‌ی تزریق  $k$ ؛  $V_j^m$  حجم آب مصرفی در گره زام در دوره‌ی کنترل زمانی  $m$  مجموع حجم آب مصرفی در شبانه‌روز حاصل از مجموع دبی‌های مصرفی در گره‌ها؛  $Q_j^m$  دبی مصرفی در گره زام در دوره‌ی کنترل زمانی  $m$  بازه کنترل زمانی؛  $f_1$  تابع هدف کمینه‌سازی مقدار کل گذرا؛  $f_2$  تابع هدف بیشینه‌سازی درصد حجم آب آشامیدنی سالم در شبانه‌روز؛  $c_j^m$  غلظت کل باقیمانده ( $\text{mg/l}$ ) در گره کنترل زام در دوره‌ی کنترل زمانی  $m$ ؛  $c_j^{\min}$  و  $c_j^{\max}$  به ترتیب حد پایین و بالای غلظت کل باقیمانده ( $\text{mg/l}$ ) در گره کنترل زام؛  $n_k$  تعداد گام‌های کنترل زمانی کیفی آب در شبکه‌ی توزیع برای محاسبه‌ی تغیرات غلظت کل باقیمانده است. بدین ترتیب وضعیت ایده‌آل زمانی رخ خواهد داد که در کلیه‌ی گره‌های مصرف‌کننده، محدودیت غلظت کل باقیمانده ارضاء شود. همچنین محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی به صورت روابط ۴ الی ۶ ارائه می‌شوند:

$$f_1 \geq c \quad (4)$$

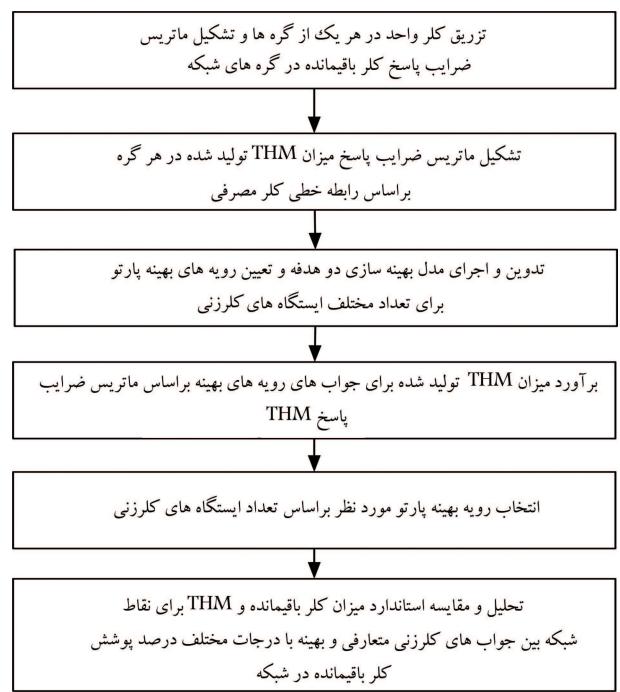
$$M_i^k \geq 0; \quad i = 1, \dots, n_b; \quad k = 1, \dots, n_k \quad (5)$$

$$c_j^{\min} \leq c_j^m; \quad j = 1, \dots, n_m; \quad m = \mu, \dots, \mu + n_k - 1 \quad (6)$$

که در آن‌ها،  $c$  مقداری ثابت برای محدود ساختن تأمین یک تاز کمینه‌ی درصد آب آشامیدنی سالم (تابع هدف دوم) است. محدودیت سوم (رابطه‌ی ۶)، کمینه‌ی غلظت موردنیاز در گره‌های کنترلی را تضمین می‌کند. به منظور شناسایی میزان خطر محصولات جانبی حاصل از کلر مصرفی در شبکه‌ی توزیع آب نظری  $THM$  تولید شده، لازم است مقدار آن‌ها با استفاده از روش‌های مناسب برآورد شود. مطالعات پیشین نشان داده است که شکل‌گیری  $THM$  فقط براساس تابع از میزان اضمحلال کلر مصرفی خواهد بود. در سال‌های ۲۰۰۳، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی در سناریوهای مختلف کلرزنی در شبکه، رابطه‌ی قوی بین  $THM$  تولیدی و کلر مصرفی [۱۲] و نیز در سال ۲۰۰۲، رابطه‌ی ۷ بین  $THM$  تولیدی و کلر مصرفی برای مقادیر  $PH$  بین ۶ تا ۸ مشاهده شده است: [۱۲]

$$THM = Y Cl_2 + M \quad (7)$$

که در آن،  $THM$  مقدار کل تری هالومتان تشکیل شده (میکروگرم بر لیتر)؛  $Y$  پارامتر معرف میکروگرم  $THM$  تشکیل شده برای هر میلی‌گرم کلر ( $Cl_2$ ) مصرف شده؛ و  $M$  پارامتر عرض از مبدأ که معمولاً صفر در نظر گرفته می‌شود. مقدار پارامتر  $Y$  وابسته به عوامل مختلفی نظری: ترکیب شیمیایی و ساختار مواد آلی موجود در آب،  $PH$  و دماست. [۱۲] مقادیر دو پارامتر مذکور براساس تحلیل رگرسیون خطی از داده‌های آزمایشگاهی به دست می‌آید. این رابطه می‌تواند مبنای خوبی برای برآورد غیرمستقیم میزان  $THM$  تولید شده در شبکه بدون شیوه‌سازی واقعی آن باشد. شایان ذکر است نرم‌افزار EPANET می‌تواند رشد یا اضمحلال یک ماده را در حین حرکتش در سرتاسر شبکه‌ی توزیع ردیابی کند که می‌توان غلظت کلر مصرفی را در طول شبکه محاسبه کرد. برای این منظور، لازم است نزد واکنش اضمحلال غلظت کل در شبکه‌های توزیع آب که شامل دو بخش واکنش حجمی<sup>۶</sup> و واکنش جداره‌ی لوله<sup>۷</sup> هستند را مشخص و شبکه را شیوه‌سازی کرد. یعنی اضمحلال کل غلظت کل از مجموع اضمحلال حجمی و اضمحلال جداره‌ی لوله به دست می‌آید.



شکل ۱. فلوچارت روش پیشنهادی نوشتار حاضر.

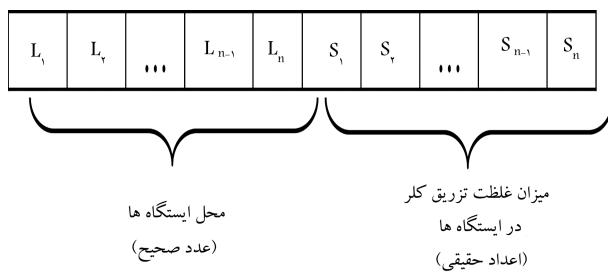
## ۱۰.۲. مسئله‌ی بهینه‌سازی

در نوشتار حاضر، ابتدا یک مسئله‌ی بهینه‌سازی برای تعیین مکان‌ها و زمان‌بندی بهینه‌ی ایستگاه‌های تزریق کلر در شبکه‌ی توزیع آب معرفی شده است. به منظور افزایش سرعت محاسباتی مدل بهینه‌سازی، ارزیابی توابع هدف با استفاده از اصل برهمنهی خطی و ضرایب پاسخ در شبیه‌سازی کیفی دینامیکی آب انجام شده است.<sup>[۷-۵]</sup> استفاده از انجام اصل فوق با فرض درنظر گرفتن سیستمیک درجه‌ی اول برای اضمحلال کلر باقیمانده قابل انجام است که در اینجا نیز به همین صورت در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است که شبکه‌ی توزیع آب کاملاً کالیبره شده است. نتایج حل مسئله‌ی بهینه‌سازی به صورت منحنی تعامل بین اهداف معرفی شده نشان داده شده است.

دو تابع هدف صریح مورد استفاده در این مسئله عبارت‌اند از: کمینه‌سازی مقدار کل کلر مصرفی در شبانه‌روز در کلیه‌ی ایستگاه‌های تزریق کلر در شبکه‌ی توزیع آب و بیشینه‌سازی درصد آب آشامیدنی سالم. درصد آب آشامیدنی سالم به صورت نسبت مجموع آب مورد نیاز مصرف‌کننگان با مقدار غلظت کلر باقیمانده در محدوده‌ی استاندارد به مجموع آب مصرفی در کلیه‌ی گره‌های شبکه تعریف می‌شود. متغیرهای تصمیم مدل بهینه‌سازی چند‌هدهفه عبارت‌اند از: محل این ایستگاه‌ها در شبکه‌ی توزیع و میزان تزریق کلر در هر بازه زمانی مشخص در شبانه‌روز. همچنین غلظت کلر باقیمانده نیز در کلیه‌ی گره‌های شبکه به تعداد  $n_m$  گره کنترل می‌شود. فرمول‌بندی ریاضی مسئله‌ی بهینه‌سازی دو هدفه‌ی مذکور شامل توابع هدف به صورت روابط ۱ الی ۳ است:<sup>[۶]</sup>

$$\text{Min } f_1 = \sum_{i=1}^{n_b} \sum_{k=1}^{n_k} M_i^k \quad (1)$$

$$\text{Max } f_2 = \frac{\sum_{m=\mu}^{\mu+n_k-1} \sum_{j=1}^{n_m} V_j^m}{V} \times 100 \quad (2)$$



شکل ۲. نمایش ژنتیکی کروموزوم‌های الگوریتم ژنتیک با تعداد  $n$  ایستگاه تزریق کلر شامل: محل و میزان غلظت تزریق کلر ( $\text{mg/l}$ ) در  $n$  ایستگاه.

متغیرهای تصمیم مدل بهینه‌سازی عبارت‌اند از: موقعیت ایستگاه‌های تزریق کلر و میزان تزریق کلر در هر بازه زمانی. بنابراین هر کروموزوم (جواب) دارای  $2n$  ژن است که  $n$  ژن آن معرف مکان نصب ایستگاه کلرزنی در گره‌های شبکه (اعداد صحیح) و  $n$  ژن دیگر معرف مقدار تزریق کلر در هر یک ایستگاه‌هاست (اعداد صحیقی). نمایش ژنتیکی این حالت کروموزوم‌ها در مدل برای  $n$  ایستگاه کلرزنی و میزان تزریق کلر بر حسب میلی‌گرم بر لیتر در شکل ۲ نشان داده شده است که مطابق آن با فرض داشتن تعداد گره‌هایی با پتانسیل نصب ایستگاه تزریق کلر برای  $n_p$ ، هر یک از  $n$  ژن عدد صحیح هر کروموزوم می‌توانند مقادیر عدد صحیح بین ۱ تا  $n_p$  را به خود اختصاص دهند که نشان‌دهنده محل ایستگاه تزریق کلر در آن جواب است ( $n_p < n$ ). به طور مشابه، هر یک از  $n$  ژن با قیمانده می‌توانند یک مقدار حقیقی بین ۰ تا بیشترین میزان تزریق را به عنوان میزان تزریق در ایستگاه تزریق کلر به خود اختصاص دهند. برای حل مسئله بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II استفاده شده است. عملگرهای الگوریتم ژنتیک مورد استفاده عبارت‌اند از: عملگر انتخاب تورنمنت، توزیع یک نقطه‌ی و جهش زنی. جزئیات بیشتر الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II در پژوهش دب و همکاران (۲۰۰۲) [۱۸] یافت می‌شود.

### ۳. مطالعه‌ی موردی و فرضیات

مدل دوهدفه‌ی مکان‌یابی و زمان‌بندی بهینه‌ی ایستگاه‌های کلرزنی در کلیه‌ی گره‌های مصرف شبکه‌ی توزیع آب نشان داده شده در شکل ۲، برای کنترل غلظت کلر با قیمانده محاسبه و  $THM$  تخمین زده شده به کار برده شده است. شبکه‌ی مذکور ۱۱۲۶ گره و ۱۳۲۴ لوله با طول  $۱۱۰,۹۸$  کیلومتر دارد که مدل بهینه‌سازی برای کل آن اجرا شده و آب آن از طریق فقط یک منبع آب و تصفیه‌خانه، به صورت سیستم پمپاژ و نقلی تأمین می‌شود. هیدرولیک شبکه در یک دوره ۲۴ ساعته با گام‌های زمانی یک ساعته و به صورت دوره‌یی فرض شده است. میزان متوسط مصرف در شبکه‌ی توزیع آب برای  $۲۰\%$  لیتر بر ثانیه است که در طی روز به میزان بیشینه‌ی  $۳۷۴$  لیتر بر ثانیه افزایش می‌یابد و در مدتین میزان در نیمه‌های شب به  $۸۸$  لیتر بر ثانیه می‌رسد. فرض شده است که نیاز آبی در کلیه‌ی گره‌های شبکه از یک الگوی زمانی تغییرات نیاز آبی با گام‌های زمانی ۶ ساعته تعیین می‌کند. نز اضمحلال گندزدا در شبکه از درجه‌ی اول فرض شده است. همچنین براساس عدمه‌ی مطالعات پیشین برای اضمحلال کل در شبکه، میزان ضریب ثابت دیواره‌یی ( $kw$ ) برای ( $\text{m}.\text{day}^{-1}$ )  $۰,۰۹$  و ضریب ثابت حجمی ( $k_b$ ) برای ( $m^3/\text{day}$ )  $۰,۵۵$  و نیز مقادیر ثابت ضریب و عرض از مبدأ در رابطه‌ی  $۷$  برای برآورد میزان تولید  $THM$  تشکیل شده بر حسب میزان کل مصرف شده براساس مطالعات پیشین به ترتیب برای  $۴۰^\circ \text{C}$  و  $۰^\circ \text{C}$  فرض شده است. [۱۸, ۱۰]

### ۲.۲. مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه (MOGA)

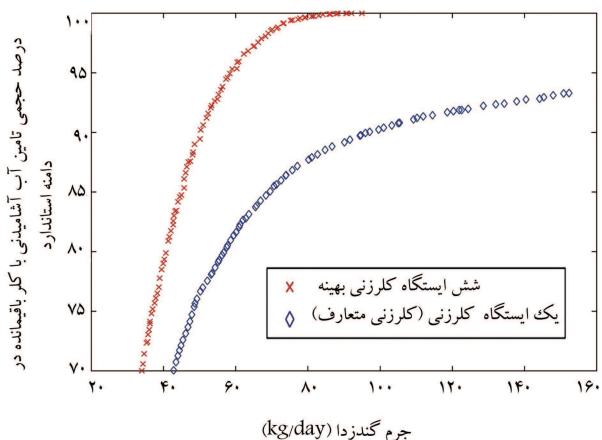
بهترین روش برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی دوهدفه‌ی فوق، به کارگیری یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه است. برای این منظور در نوشتار حاضر از الگوریتم ژنتیک چندهدفه (MOGA) به عنوان مدل بهینه‌سازی حل مسئله استفاده شده است. مزیت‌های چشم‌گیر استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه نسبت به الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه در مطالعات پیشین به وضوح مشاهده می‌شود. [۱۲] برخی از کاربردهای الگوریتم ژنتیک چندهدفه در حل مسائل شبکه‌های توزیع را می‌توان در برخی مطالعات [۱۷-۱۵] مشاهده کرد.

هدف کلی در بهینه‌سازی چندمعیاره، یافتن مجموعه جواب‌های بهینه‌ی پارتو است، که معمولاً به صورت یک رویه نشان داده می‌شوند. برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه از الگوریتم‌های تکاملی کاوشی استفاده می‌شود که توانایی متناسبی نسبت به روش‌های متداول در حل این‌گونه مسائل دارند. [۱۸] در روش‌های تکاملی، یک جمعیت از جواب‌ها در جستجو استفاده می‌شوند و اصولاً در هر بار اجرای برنامه، جواب‌های بهینه پیدا می‌شوند. مکانیزم حفظ تنوع می‌تواند به الگوریتم‌های تکاملی کاوشی اضافه شود، تا جواب‌های بهینه‌ی پارتو مختلف را در دامنه‌ی وسیع‌تر پیدا کند. تاکنون الگوریتم‌های چندهدفه بسیاری از قبیل الگوریتم ژنتیک چندهدفه، الگوریتم تکاملی پارتو، الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی غیر پست (NSGA-II) و ... استفاده شده‌اند. در نوشتار حاضر، روش (NSGA-II) توسعه داده شده دب  $1^\circ$  و همکاران (۲۰۰۲) [۱۸] استفاده شده است.

### ۳. روش حل مسئله

در پژوهش حاضر، مدل الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II با استفاده از یک برنامه‌ی کامپیوتری در نرم‌افزار MATLAB توسعه یافته است. به منظور کاهش تلاش و زمان محاسباتی اجرای مدل بهینه‌سازی، شبیه‌سازی کلرزنی برای هر یک از ایستگاه‌ها با استفاده از نرم‌افزار EPANET پیش از ورود به حلقه‌ی بهینه‌سازی انجام و در مدل بهینه‌سازی از اصل برهم نهی خطی و ضرایب پاسخ برای ترکیبات مختلف ایستگاه‌ها استفاده شده است. [۱۵] بدین ترتیب ابتدا برای هر گره با پتانسیل نصب ایستگاه تزریق، یک شبیه‌سازی کیفی بلندمدت آب برای کل دوره‌ی زمانی تزریق در محیط نرم‌افزار EPANET انجام و نتایج ذخیره شده است. بدین ترتیب تزریق کلر واحد در گره با پتانسیل نصب ایستگاه  $i$  و بازه زمانی تزریق  $k$  به صورت مجزا (مستقل) شبیه‌سازی و میزان کلر با قیمانده در گره کنترلی  $j$  برای زمان پایش  $m$  محاسبه و به صورت  $\alpha_{ij}^{km}$  ذخیره شده است. میزان ضریب پاسخ برای کلیه‌ی بازه‌های زمانی تزریق ( $n_k$ ) و تعداد ایستگاه‌های تزریق ( $n_b$ ) محاسبه شده است. میزان کلر با قیمانده در گره کنترلی برای مجموع تعداد شبیه‌سازی‌ها که برابر با  $n_b \times n_k$  است، پیش از ورود به حلقه‌ی بهینه‌سازی ذخیره شده است. در داخل حلقه‌ی بهینه‌سازی و برای هر یک از جواب‌های بالقوه، میزان غلظت کلر با قیمانده ( $c_i^m$ ) در هر یک از گره‌های کنترلی  $j$  در زمان پایش  $m$  براساس میزان تزریق کلر در گره تزریق  $i$  در بازه زمانی تزریق  $k$  ( $x_i^k$ ) با توجه به اصل برهم نهی خطی و ضرایب پاسخ، به صورت ترکیب خطی رابطه‌ی  $\Delta$  محاسبه و از شبیه‌سازی مدل EPANET اجتناب شده است که این امر می‌تواند کاهش چشم‌گیری را در زمان اجرای مدل به وجود آورد. [۱۵]

$$(8) \quad c_j^m = \sum_{i=1}^{n_b} \sum_{k=1}^{n_k} \alpha_{ij}^{km} x_i^k$$

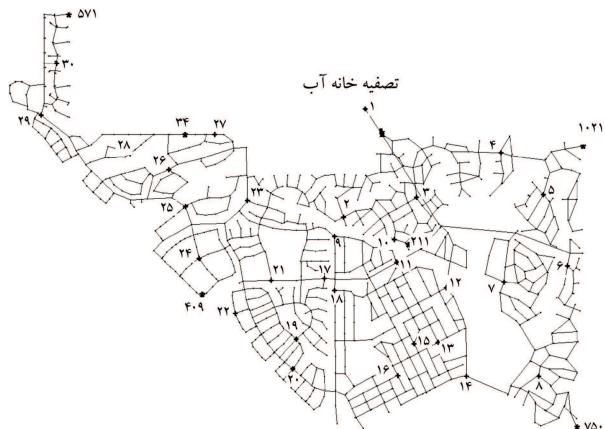


شکل ۴. رویه‌های بهینه‌ی پارتوکل کلر مصرفی و درصد حجمی تأمین آب آشامیدنی با کلر باقیمانده در دامنه‌ی استاندارد.

حجمی آب آشامیدنی سالم با کلر باقیمانده در دامنه‌ی استاندارد با درنظر گرفتن تعداد ثابت و مشخصی از ایستگاه‌های تزریق گندزدا به دست خواهد آمد. نمونه‌ی از این رویه‌ها در شکل ۴ برای ۲ تیپ ایستگاه شامل یک ایستگاه کلرزنی (کلرزنی در منابع آب) و ۶ ایستگاه کلرزنی نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، برای حالت کلرزنی متعارف یعنی کلرزنی در تصفیه خانه (یک ایستگاه کلرزنی)، درصد حجمی آب آشامیدنی با کلر باقیمانده در دامنه‌ی استاندارد با بیشترین مقدار کل تزریق در حدود  $kg/day$  ۱۵۲، بیشینه‌ی  $\% ۹۳$  مصرف‌کنندگان شبکه، آب بهتر ایستگاه‌های بسترهای پمپ از نوع تزریق کلر متناسب با دبی  $^{11}$  نسبت به نوع تزریق کلر با نزخ جرمی ثابت  $^{12}$  در نوشتر حاضر از ایستگاه‌های نوع اول استفاده شده است که برخلاف ایستگاه‌های بسترهای پمپ با نزخ جرمی ثابت، میزان تزریق کلر متناسب با دبی متغیر خواهد بود. همچنین فرض شده است که کلرزنی در هر ایستگاه برای یک بازه زمانی انجام می‌شود. بنابراین در ایستگاه‌های کلرزنی، مقدار غلظت کلر به عنوان متغیرهای تصمیم (اعداد حقیقی ژن‌های یک کروموزوم) در هر ایستگاه تعریف شده است که بین  $^{13} ۰$  و بیشترین غلظت کلر ( $mg/l$ )  $۴$  تغییر می‌کند.

برای مثال با بهارگیری  $^{14}$  ۶ ایستگاه کلرزنی نسبت به ۱ ایستگاه کلرزنی (مطابق شکل ۴)، علاوه بر اینکه هزینه‌ی کل جرم گندزدا کاهش می‌یابد و درصد بالاتری مصرف‌کنندگان از آب آشامیدنی سالم برخوردار می‌شوند، با کاهش مقدار گندزدای بهکار رفته شده، تشکیل محصولات جانبی  $THM$  نیز کاهش می‌یابد. همچنین لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر رویه‌های بهینه‌ی مدل مذکور برای تعداد دیگری از ایستگاه‌های کلرزنی نیز تهیه شده است، اما مقایسه‌ی رویه‌های بهینه‌ی تعداد مختلف ایستگاه‌های کلرزنی نشان داده است که میزان بهبود رویه‌ی بهینه بیشتر از ۶ ایستگاه بسیار ناچیز بوده و بنابراین در پژوهش حاضر فقط نتایج برای ۶ ایستگاه ارائه شده است.

اما سوال مطرح در بخش کنونی این است که با فرض افزایش تعداد ایستگاه‌ها، چه میزان کلی از گندزدا نظریه کل در شبکه مصرف شود که هم درصد مصرف‌کنندگان با آب آشامیدنی سالم افزایش یابد و هم مقدار  $THM$  تولید شده در شبکه زیاد نشود. پاسخ به بخش اول روی منحنی شکل ۴ نیز مشخص است، بدین صورت که با افزایش میزان کل جرم گندزدا در قسمت پایین منحنی، میزان درصد مصرف‌کنندگان با آب آشامیدنی سالم با شدت زیادی افزایش می‌یابد، اما در بخش بالای این منحنی با افزایش جرم گندزدا، درصد مصرف‌کنندگان با آب آشامیدنی



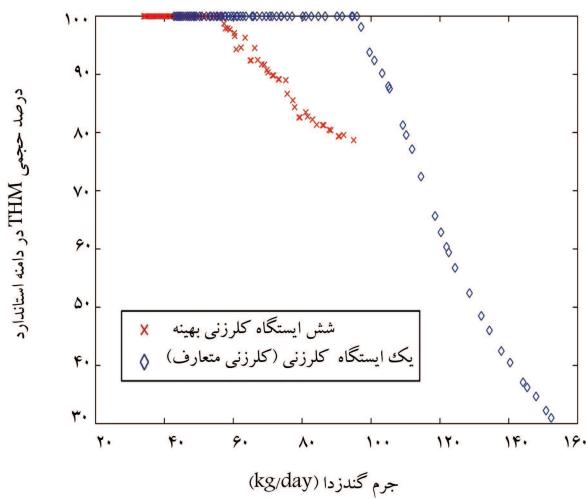
شکل ۳. شبکه‌ی توزیع آب شهری مورد مطالعه.

در شبکه‌ی توزیع مورد مطالعه، در وضعیت موجود فقط یک ایستگاه کلرزنی در محل تصفیه خانه موجود است که میزان تزریق آن در محدوده‌ی استاندارد بین  $^{15} ۰$  و بیشترین غلظت مجاز است.  $^{15}$  مکان بالقوه برای نصب ایستگاه کلرزنی شامل تصفیه خانه موجود و  $^{29}$  گره به عنوان نقاط پتانسیل و با اثربخشی بیشتر در شبکه به عنوان نقاط بالقوه ایستگاه‌های کلرزنی استفاده شده است که موقعیت این نقاط به صورت علامت  $+$  در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به عملکرد بهتر ایستگاه‌های بسترهای پمپ از نوع تزریق کلر متناسب با دبی  $^{11}$  نسبت به نوع تزریق کلر با نزخ جرمی ثابت  $^{12}$  در نوشتر حاضر از ایستگاه‌های نوع اول استفاده شده است که برخلاف ایستگاه‌های بسترهای پمپ با نزخ جرمی ثابت، میزان تزریق کلر متناسب با دبی متغیر خواهد بود. همچنین فرض شده است که کلرزنی در هر ایستگاه برای یک بازه زمانی انجام می‌شود. بنابراین در ایستگاه‌های کلرزنی، مقدار غلظت کلر به عنوان متغیرهای تصمیم (اعداد حقیقی ژن‌های یک کروموزوم) در هر ایستگاه تعریف شده است که بین  $^{13} ۰$  و بیشترین غلظت کلر ( $mg/l$ )  $۴$  تغییر می‌کند.

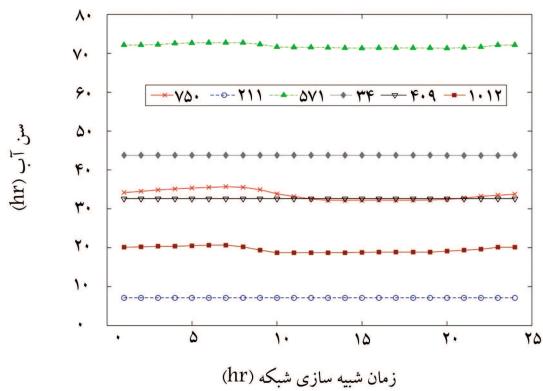
برای محدوده‌ی استاندارد مقدار کلر باقیمانده در گره‌ها (راطیه  $^{16}$  ۶)، مقادیر کمیته ( $c_{min}$ ) و بیشینه ( $c_{max}$ ) به ترتیب برابر ( $mg/l$ )  $۰,۲$  و  $(1)$   $۴$  فرض شده است. همچنین مقدار کمیته در درصد آب آشامیدنی سالم (راطیه  $^{17}$  ۴) برابر  $۷۰\%$  فرض شده است. به منظور از بین بدن تأثیر اولیه‌ی کلرزنی دوره‌ی  $^{24}$  ساعه در نتایج، مدت زمان شبیه‌سازی کیفی برابر  $۱۴۴$  ساعت تنظیم شده است که نتایج دوره‌ی  $^{24}$  ساعت آخر در محاسبات منظور شده است. پیش از اجرای نهایی الگوریتم ژنتیک چنددهدفه لازم است پارامترهای آن تنظیم شود. مقادیر تنظیم شده‌ی پارامترهای الگوریتم ژنتیک چنددهدفه از احتمال توزیع برابر  $۹\%$  و احتمال جهش برابر  $۲۵\%$  و تعداد نسل‌های الگوریتم ژنتیک چنددهدفه برای هم‌گرایی از  $^{40}$  نسل برای یک ایستگاه کلرزنی تا  $^{10000}$  نسل برای  $^{20}$  ایستگاه تغییر کرده است.

#### ۴. ارائه‌ی نتایج و بحث

مدل بهینه‌سازی دوهدفه معرفی شده در بخش ۳ را می‌توان به دفعات و هر بار برای تعداد متفاوتی از ایستگاه‌های تزریق کلر با استفاده از الگوریتم NSGA-II، حل کرد که در نتیجه‌ی آن منحنی تعامل بین جرم گندزدا بر حسب کیلوگرم بر روز و درصد



شکل ۵. شبیه‌سازی جواب‌های رویه‌های بهینه‌ی پارتو شکل ۴ برای درصد حجمی مصرف‌کنندگان با  $THM$  تشکیل شده در دامنه‌ی استاندارد.



شکل ۶. سن آب برای گره‌های مختلف شبکه‌ی توزیع آب مورد مطالعه.

۳ مشاهده می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشترین سن آب مربوط به گره شماره‌ی ۵۷۱ می‌شود که سن آب برای رسیدن به این نقطه بیش از ۷۰ ساعت است. حتی گره شماره‌ی ۳۴ که در ظاهر نقطه‌ی دوری نسبت به منبع آب شبکه نیست، نیز با بیش از ۴۰ ساعت سن آب در ردیف بعدی است. کمترین سن آب نیز مربوط به گره شماره‌ی ۲۱۱ است که در نزدیک محل منبع قرار دارد. برای تحلیل‌های بعدی، پارامترهای کیفی فوق برای گره‌های با بیشترین سن آب (۳۴، ۵۷۱) و کمترین سن آب (۷۵۰) در شباهنروز برای حالت کلرزنی متعارفی (تأمین بیشتر بررسی می‌شود).

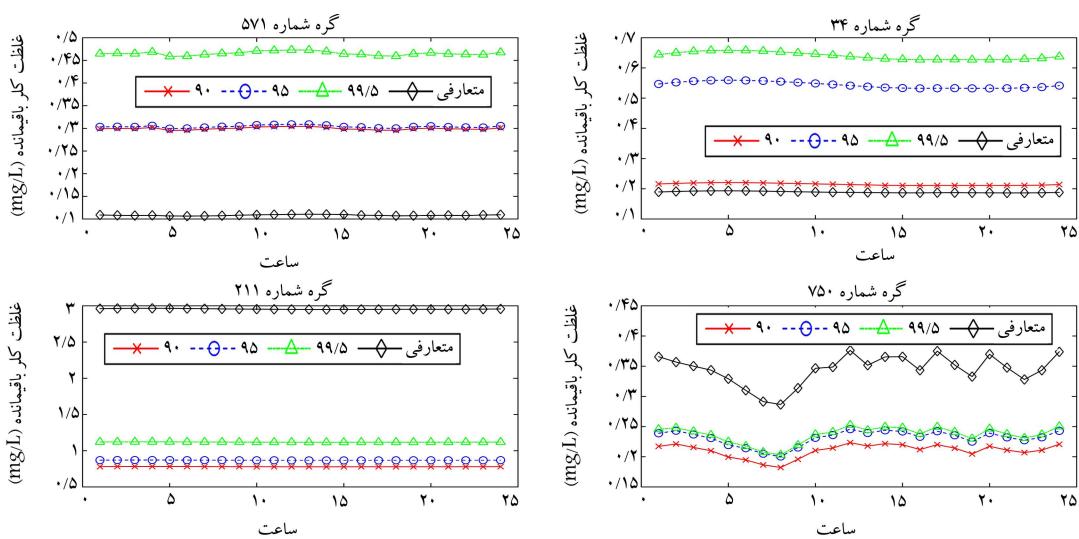
شکل ۷، میران غلظت کلر باقیمانده را برای ۴ گره فوق در شباهنروز نشان می‌دهد. برای هر گره، تغییرات کلر باقیمانده برای ۴ حالت ترسیم شده است که عبارت‌انداز: یک وضعیت کلرزنی متعارفی در ۱ ایستگاه و ۳ حالت کلرزنی بهینه که میران درصد حجم آب مصرفی با غلظت کلر باقیمانده در شبکه ۹۵، ۹۰ و ۹۹/۵ درصد باشد. مطابق شکل مذکور، برای گره شماره‌ی ۵۷۱ به عنوان گره با سن آب بسیار بالا، غلظت کلر باقیمانده فقط در حالت متعارفی در محدوده‌ی غیرمجاز ۱۰ میلی‌گرم در لیتر است و در بقیه‌ی حالت‌های ۶ ایستگاه بهینه‌ی کلرزنی در محدوده‌ی استاندارد کمتر از ۱

سالم با نیخ انکی افزایش می‌یابد در صورتی که محدودیت بودجه یا درصد حجمی آب آشامیدنی سالم وجود نداشته باشد، محل تقاطع این دو وضعیت توصیف شده در این منحنی می‌تواند به عنوان نقطه‌ی خوبی از جواب مستانه اشاره شود.

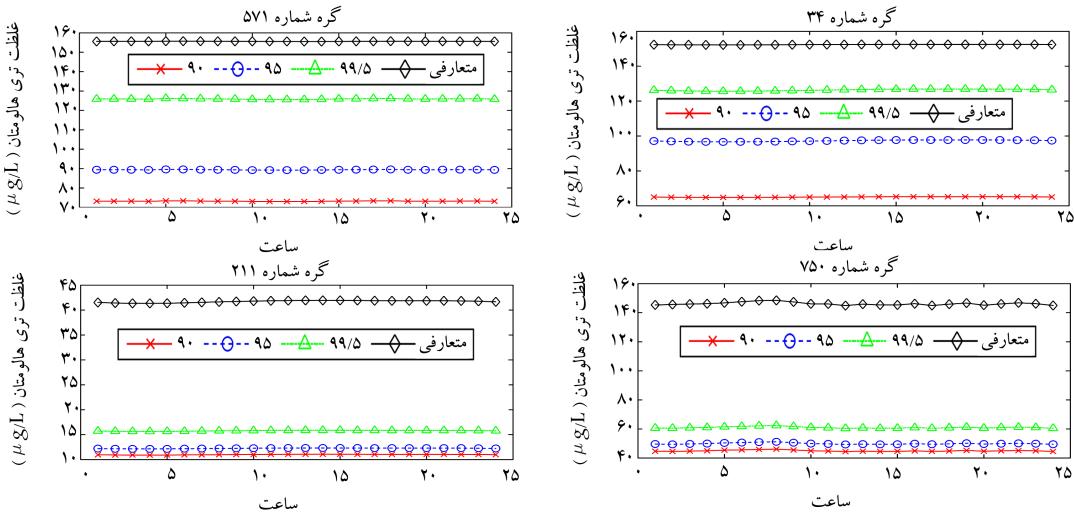
اما از نقطه‌نظر بخش دوم سوال مطرح شده، لازم است میران  $THM$  تولیدشده براساس کلر مصرف شده در شبکه‌ی توزیع با توجه به راطه‌ی ۷ برآورد شود، تا تغییرات آن در این جواب‌ها بررسی شود. برای این اساس در شکل ۵، شبیه‌سازی انجام شده برای کلیه‌ی جواب‌های ارائه شده در رویه‌ی بهینه‌ی پارتو شکل ۴ ارائه شده است که بدین وسیله مقدار درصد حجمی مصرف‌کنندگان با  $THM$  در دامنه‌ی استاندارد ( $THM$  کمتر از ۸۰ میکروگرم بر لیتر) نمایش داده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در حالت کلرزنی متعارفی تا حدود ۱ کیلوگرم تزریق کل کل در روز، کل آب تحویلی به مصرف‌کنندگان با  $THM$  تشکیل شده در دامنه‌ی استاندارد (کمتر از ۸۰ میکروگرم بر لیتر) است. این در حالی است که با همان میران تزریق، حدود ۹۰٪ مصرف‌کنندگان، آب آشامیدنی سالم (غلظت کلر باقیمانده با دامنه‌ی استاندارد) را دریافت می‌کنند (شکل‌های ۴ و ۵) بنابراین در حالت کلرزنی متعارفی برای امنیت کامل شبکه (نداشتن مصرف‌کنندگی با  $THM$  در محدوده غیرمجاز) پیشنهاد می‌شود که بیشینه‌ی ۱۰۰ کیلوگرم در روز تزریق کلر انجام شود که در این صورت بیشینه‌ی ۹۰٪ آب آشامیدنی سالم قابل تأمین خواهد بود. با افزایش میران تزریق کلر بیش از مقدار مذکور، درصد آب تحویلی به مصرف‌کنندگان مجاز باشد زیادی کاهش می‌یابد (شکل ۵). به نحوی که در حالت تزریق به میران ۱۵۰ کیلوگرم در روز، میران درصد آب تحویلی به مصرف‌کنندگان با  $THM$  در حالت استاندارد به حدود ۳۰٪ کاهش می‌یابد که بسیار خطناک است و باید از آن‌ها پرهیز شود. در حالت ۶ ایستگاه کلرزنی نسبت به کلرزنی متعارفی، وضعیت به نحو چشم‌گیری بهبود یافته است، به طوری که تا حدود تزریق کلر به میران ۵۸ کیلوگرم در روز، ۱۰٪ آب تحویلی به مصرف‌کنندگان با  $THM$  در محدوده‌ی استاندارد قرار دارد که این مقدار در حدود ۹۵٪ آب آشامیدنی سالم به مصرف‌کنندگان است.

در حالت کلرزنی بهینه با ۶ ایستگاه کلرزنی، با افزایش مقدار جرم کلر تزریقی به بیش از حدود ۶۰ کیلوگرم در روز، به تدریج درصدی از مصرف‌کنندگان شبکه‌ی توزیع آب با مقدار غلظت  $THM$  بیشتر از حد استاندارد ۸۰ میکروگرم بر لیتر را دریافت می‌کنند، اگرچه که درصدی از مصرف‌کنندگان شبکه که آب با غلظت کلر باقیمانده در دامنه‌ی استاندارد را دریافت می‌کنند، بهبود می‌یابد (شکل ۵). به عبارت دیگر، در این حالت تزریق کلر بیشتر از این مقدار در شباهنروز منجر به افزایش ریسک سلطان‌زایی در شبکه توزیع آب خواهد بود. از طرف دیگر، با مقایسه‌ی شبیه‌سازی ۲ حالت کلرزنی بهینه (۱ و ۶ ایستگاه) ملاحظه می‌شود که نیخ نزولی افت  $THM$  با دامنه‌ی استاندارد در شبکه‌ی توزیع آب به واسطه‌ی افزایش میران جرم کل گندزا در حالت ۶ ایستگاه کلرزنی شدت کمتری دارد.

به منظور مقایسه‌ی بیشتر و ردیابی تأثیر کلر باقیمانده و  $THM$  تشکیل شده در شبکه‌ی توزیع آب شهری، نقاط مختلفی از شبکه که مشخصه‌های مختلفی دارند، انتخاب و مقدار غلظت پارامترهای کیفی فوق در شبکه توزیع آب شده است. شکل ۶، سن آب را برای چندین گره مختلف در شبکه توزیع آب نشان می‌دهد. سن آب یک مقدار غیر ویژه و ساده از کیفیت کلی آب آشامیدنی تحویلی است که بهوسیله‌ی آن تا حد زیادی می‌توان در هر گره با سن آب مشخص، وضعیت کلر باقیمانده و  $THM$  تشکیل شده را حدس زد، که با افزایش سن آب، کل باقیمانده کاهش و میران  $THM$  تشکیل شده افزایش می‌یابد. در شکل مذکور از برخی از گره‌های دوردست نظیر ۷۵۰، ۵۷۱ و ۱۰۱۲ و همچنین گره‌های نزدیک و میانی شبکه می‌توانند این روند را مشاهده کردند. این نتایج نشان می‌دهند که در بقیه‌ی حالت‌های ۶ ایستگاه بهینه‌ی کلرزنی در محدوده‌ی استاندارد کمتر از ۱۰٪ استفاده شده است که موقعیت آنها در شکل



شکل ۷. تغییرات کلر باقیمانده برای ۴ گره شبکه‌ی توزیع آب شهری برای وضعیت‌های: (۱) کلرزنی متعارف؛ و (۲-۲) بهینه با میزان درصد حجم آب مصرفی با غلظت کلر باقیمانده برابر ۹۰، ۹۵، ۹۹/۵ درصد.



شکل ۸. تغییرات  $THM$  باقیمانده برای ۴ گره شبکه‌ی توزیع آب شهری برای وضعیت‌های: (۱) کلرزنی متعارف؛ و (۲-۲) بهینه با میزان درصد حجم آب مصرفی با غلظت کلر باقیمانده برابر ۹۰، ۹۵، ۹۹/۵ درصد.

۱۵۵ میکروگرم بر لیتر) که برای مصرف‌کنندگان آب در این ناحیه می‌تواند از جنبه‌ی افزایش ریسک سرطان بسیار خطرناک باشد. علاوه بر این در محدوده‌ی ذکر شده (گره ۵۷۱، کلرزنی با ۶ ایستگاه کلرزنی در حالت تأمین ۹۹/۵٪ حجمی آب آشامیدنی سالم (غلظت کلر باقیمانده در محدوده‌ی استاندارد)، هنوز مقدار غلظت  $THM$  تشکیل شده (بیش از ۱۲۰ میکروگرم بر لیتر) بالاست که نشان می‌دهد تأمین درصد زیاد آب آشامیدنی سالم (غلظت کلر باقیمانده در محدوده‌ی استاندارد) می‌تواند از طرف دیگر منجر به افت شدید دیگر پارامتر کیفی آب یعنی  $THM$  تولید شده شود. همین تناسب برای غلظت  $THM$  تشکیل شده برای گره ۳۴ نیز برقرار است، با این تفاوت که در محدوده‌ی ذکر شده میزان غلظت  $THM$  تولید شده در کلیه‌ی حالات به تناسب کمتر است. البته در محدوده‌ی گره شماره‌ی ۷۵۰ در پایین شبکه‌ی توزیع، فقط غلظت  $THM$  تشکیل شده در وضعیت غیرمجاز است و برای کلیه‌ی حالات (گره شماره‌ی ۵۷۱) بالاترین حد غلظت  $THM$  تشکیل شده را به خود اختصاص داده‌اند (حدود

میلی‌گرم بر لیتر قرار دارد. همچنین تغییرات غلظت کلر باقیمانده در شباهه روز برای گره شماره‌ی ۲۱۱ به عنوان یک گره نزدیک به منبع آب نشان می‌دهد که این نواحی از میزان غلظت بالای کلر باقیمانده (حدود ۳ میلی‌گرم بر لیتر) رنج می‌برند، در حالی که برای کلیه‌ی حالات کلرزنی با ۶ ایستگاه، میزان غلظت کلر باقیمانده در این نقطه در دامنه‌ی استاندارد و مطلوبی قرار دارد. در گره‌های دیگر (نقاط ۳۴ و ۷۵۰) تغییرات غلظت کلر باقیمانده در محدوده‌ی استاندارد والبته در برخی اوقات در آستانه‌ی حدی قرار گرفته است. شکل ۸، تغییرات میزان غلظت  $THM$  برای ۴ گره مذکور در شباهه روز را برای ۴ وضعیت مشابه شکل ۷ نشان می‌دهد که مطابق آن میزان غلظت  $THM$  برای دورترین نقطه‌ی شبکه (گره شماره‌ی ۵۷۱)، بیشترین مقادیر را به خود اختصاص داده است. خصوصاً اینکه در حالت کلرزنی متعارف، ناحیه‌ی شبکه‌ی ذکر شده (شامل گره ۵۷۱) بالاترین حد غلظت  $THM$  تشکیل شده را به خود اختصاص داده‌اند (حدود

حالت کلرزنی متعارف و ۶ ایستگاه کلرزنی نشان داده است که با افزایش جرم گندزداز از یک حد مشخص، به ترتیب بخشی از مصرف کنندگان آب را با غلظت  $THM$  بالاتر از حد مجاز دریافت می‌کنند. بدین ترتیب برای حالت کلرزنی متعارفی، بیشینه‌ی مجاز کل تزریق کلر به‌خودی که کل شبکه، ریسک وجود  $THM$  را نداشته باشد، حدود ۱۰۰ کیلوگرم در روز و برای حالت ۶ ایستگاه کلرزنی بیشینه‌ی این میزان به حدود ۶۰ کیلوگرم در روز محدود شده است. این در حالی است که در حالت کلرزنی متعارفی برای این میزان بیشینه‌ی تزریق فقط ۹۰٪ آب آشامیدنی با غلظت کلر باقیمانده در محدوده‌ی استاندارد به دست می‌آید، در حالی که برای ۶ ایستگاه کلرزنی، مصرف کنندگان آب آشامیدنی ۹۵٪ آب تحویلی با غلظت کلر در محدوده‌ی استاندارد را دریافت می‌کنند. همچنین بحرانی ترین نقاط شبکه به لحاظ تولید  $THM$  تشکیل شده، نقاط دوردستی با توجه به سن آب هستند. بدین ترتیب علاوه بر حالت کلرزنی متعارفی، در حالت وجود تعداد بیشتری از بوستر پمپ‌های تزریق کلر، تزریق زیاد جرم کلر در شبکه برای تأمین درصد بالاتری از غلظت کلر باقیمانده در محدوده‌ی استاندارد می‌تواند منجر به افزایش ریسک سرطان در شبکه‌ی توزیع آب شود.

۶ ایستگاه کلرزنی وضعیت خوب و مطلوبی وجود دارد. همچنین برای محدوده‌ی گره شماره‌ی ۲۱۱ که نمایان‌گر یک نقطه‌ی میانی در شبکه‌ی توزیع است، وضعیت در کلیه‌ی حالات حتی برای حالت کلرزنی متعارفی نیز در محدوده‌ی مطلوب قرار دارد.

## ۵. جمع‌بندی

در نوشتار حاضر، مکان‌بایی و زمان‌بندی بهینه‌ی ایستگاه‌های تزریق کلر در یک شبکه‌ی توزیع آب شهری با توجه به پارامترهای کیفی آب بررسی شده است. اهداف مدل بهینه‌سازی طبق مطالعات پیشین، بیشینه‌سازی درصد آب مصرف کنندگان با غلظت کلر باقیمانده در محدوده‌ی استاندارد و کمینه‌سازی جرم گندزدای مصرفی در شبکه روز تعیین شده است. مسئله‌ی بهینه‌سازی مذکور با استفاده از مدل الگوریتم رتیک چنددهدفه NSGA-II حل شده است. با آورد غیرمستقیم غلظت  $THM$  تشکیل شده براساس رابطه‌ی خطی میزان کار مصرف شده برای نتایج بهینه در ۲

## پانوشت‌ها

1. disinfected by-products
2. Tri Halo Methane
3. Halo Acetic Acids
4. environmental protection agency
5. world health organization
6. bulk reaction
7. wall reaction
8. multi-objective genetic algorithm
9. nondominated sorting genetic algorithm II (NSGA II)
10. Deb
11. flowpaced booster
12. mass booster

## منابع (References)

1. Vasconcelo, J.J., Rossman, L.A., Grayman, W.M., Boulos, P.F. and Clark, R.M. "Kinetics of chlorine decay", *J. Am. Water Works Assoc.*, **89**(7), pp. 54-65 (1997).
2. Munavalli, G.R. and Kumar, M.S.M. "Optimal scheduling of multiple chlorine sources in water distribution systems", *J. Water Resour. Plann. Manage.*, **129**(6), pp. 493-504 (2003).
3. Kang, D. and Lansey, K. "Real-time optimal valve operation and booster disinfection for water quality in water distribution systems", *J. Water Resour. Plann. Manage.*, **136**(4), pp. 463-473 (2010).
4. USEPA, "National primary drinking water regulations: Stage 1 disinfectants and disinfection byproducts rule", [www.epa.gov/ogwdw/mcl.html](http://www.epa.gov/ogwdw/mcl.html).
5. Tryby, M.E., Boccelli, D.L., Uber, J.G. and Rossman, L.A. "Facility location model for booster disinfection of
- water supply networks", *J. Water Resour. Plan. Manage.*, **128**(5), pp. 322-333 (2002).
6. Prasad, T.D., Walters, G.A. and Savic, D.A. "Booster disinfection of water supply networks: Multiobjective approach", *J. Water Resour. Plann. Manage.*, **130**(5), pp. 367-376 (2004).
7. Boccelli, D.L., Tryby, M.E., Uber, J.G., Rossman, L.A., Zierolf, M.L. and Polycarpou, M.M. "Optimal scheduling of booster disinfection in water distribution systems", *J. Water Resour. Plan. Manage.*, **124**(2), pp. 99-111 (1998).
8. Samghabadi, S., Tajrish A. and Abrishamchi, M. "Application of simulation models of residual chlorine in water distribution networks", *J. Water and Wastewater*, **26**, pp. 2-15 (1998).
9. Tabesh, M., Azadi, B. and Rouzbahani, A. "Optimization of chlorine injection dosage in water distribution networks using a genetic algorithm", *J. Water and Wastewater*, **22**(1), pp. 2-11 (2011).
10. Carrico, B. and Singer C.P. "Impact of booster chlorination on chlorine decay and THM production: Simulated analysis", *J. Environ. Eng.*, **135**(10), pp. 928-935 (2009).
11. Ohar, Z. and Ostfeld, A. "Optimal design and operation of booster chlorination stations layout in water distribution systems", *Water Research*, **58**, pp. 209-220 (2014).
12. Boccelli, D.L., Tryby, M.E., Uber, J.G. and Summers, R.S. "A reactive species model for chlorine decay and THM formation under rechlorination conditions", *Water Research*, **37**(11), pp. 2654-2666 (2003).
13. Singer, P.C., Weinberg, H.S., Brophy, K., Liang, L., Roberts, M. and Grisstede, I., *Relative Dominance of HAAs and THMs in Treated Drinking Water*, American Water Works Association Research Foundation and American Water Works Association, Denver, 344 p. (2002).

14. Kapelan, Z.S., Savic, D.A. and Walters G.A. "Optimal sampling design methodologies for water distribution model calibration", *J. Hydraulic Engineering*, **131**(3), pp. 190-200 (2005).
15. Walters, G.A., Halhal, D., Savic, D.A. and Ouazar, D. "Improved design of 'Anytown' distribution network using structured messy genetic algorithms", *Urban Water*, **1**(1), pp. 23-38 (1999).
16. Kapelan, Z.S., Savic, D.A. and Walters, G.A. "Multi-objective sampling design for water distribution model calibration", *J. Water Resour. Plan. Manage.*, **129**(6), pp. 466-479 (2003).
17. Behzadian, K., Kapelan, Z., Savic, D. and Ardestir, A. "Stochastic sampling design using a multi-objective genetic algorithm and adaptive neural networks", *Environmental Modelling & Software*, **24**(4), pp. 530-541 (2009).
18. Deb, K., Pratap, A., Agrawal, S. and Meyarivan, T. "A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Piscataway, N.J., **6**(2), pp. 182-197 (2002).
19. Behzadian, K., Alimohammadnejad, M., Ardestir, A., Jalilzani, F. and Vasheghani, H. "A novel approach for water quality management in water distribution systems by multi-objective booster chlorination", *International Journal of Civil Engineering*, **10**(1), pp. 51-60 (2012).