مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۲ - ۳۳، شماره‌ی ۳/۱، ص. ۲۱-۲۹

Original Article

کلرزنی بهینه‌ی شبکه‌های توزیع آب شهری با درنظرگرفتن کلر باقیمانده و THM تشکیل‌شده

عبدالله اردشیر (دانشیار)
کوروش بهزادیان* (استادیار)
محمد علی‌محمدنژاد (کارشناس ارشد)
فاطمه جلیل ثانی (مربی)
دانشکده‌ی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
حسین فروتن علیزادگان (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی

علی‌رغم پیشنهاد کلرزنی بوستری 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 ژنتیک چندهدفه، 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 عبارت‌اند 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، عمدتاً از هر دو مشکل کلر باقیمانده با غلظت کمتر از حد استاندارد و محصولات جانبی با غلظت بالا رنج می‌برند. به‌علاوه برای هر تعداد مشخصی از ایستگاه‌های تزریق کلر، بیشینه‌ی میزان تزریق که در آن ریسک سرطان‌زایی 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

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

۱. مقدمه

گندزدایی آب در تصفیه‌خانه‌های آب به‌عنوان یک فرایند ضروری در تصفیه‌ی شیمیایی آب آشامیدنی پیش از ورود آب به شبکه‌ی توزیع به‌عنوان روش متداول گندزدایی شناخته می‌شود. متداول‌ترین گندزدای مورد استفاده در بسیاری از تصفیه‌خانه‌ها در حال حاضر ترکیبات مختلف کلر نظیر: گاز کلر، کلرامین، دی‌اکسید کلر و نظایر آن هستند.[۱] معمولاً کلرزنی به‌عنوان آخرین فرایند تصفیه در تصفیه‌خانه استفاده می‌شود، تا اولاً غالب باکتری‌های بیماری‌زای موجود در آب را از بین ببرد و ثانیاً با ایجاد یک میزان مشخص از کلر باقیمانده در آب از رشد مجدد آن‌ها در طول زمان در شبکه‌ی توزیع جلوگیری کند.[۲] 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، به دلایل مختلف لازم است مقدار کلر باقیمانده در شبکه در یک محدوده‌ی استاندارد بین مقادیر کمینه و بیشینه باقی بماند.[۳] به‌عنوان نمونه، کلر باقیمانده با مقدار کمینه‌ی ۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر برای جلوگیری از رشد مجدد باکتری‌ها موردنیاز است.[۲و۳] بیشینه‌ی غلظت کلر باقیمانده برابر با ۴ میلی‌گرم بر لیتر نیز برای جلوگیری از آثار مضر سلامتی انسان، کنترل بو و مزه در آب موردنیاز است.[۴]

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. اضمحلال 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)[۱] با پتانسیل سرطان‌زایی در شبکه با غلظتی بیشتر از

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

Archive of SID
www.SID.ir

حد استاندارد. پژوهشگران مختلفی با استفاده از معرفی نقاط و زمان‌بندی بهینه‌ی گندزداهای بوستری در نقاط میانی شبکه، تقریباً مستقیماً به دو مشکل اول توجه کرده‌اند.[۵و۶] کلرزنی بوستری در نقاط بهینه در شبکه‌ی توزیع آب قادر است علاوه بر حفظ مقدار کلر باقیمانده در شبکه در محدوده‌ی استاندارد، کل کلر مصرفی را نیز کاهش دهد.[۵-۷]

به‌صورت کلی مکان‌یابی بهینه‌ی ایستگاه‌های کلرزنی با ۴ هدف قابل تعریف است: ۱. بیشینه‌سازی حجم آب تحویلی به مصرف‌کننده 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 کل کلر مصرفی و ۴. کمینه‌سازی کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری ایستگاه‌های تزریق کلر. پژوهشگران مختلف بین‌المللی به مسئله‌ی مکان‌یابی و زمان‌بندی بهینه‌ی سیستم‌های کلرزنی بوستری با استفاده از ۳ تابع هدف اول به‌صورت صریح توجه کرده‌اند.[۲،۳و۵-۷] به‌عنوان نمونه در سال ۲۰۰۲، درادامه‌ی مطالعاتی در سال ۱۹۹۸ [۷] یک مدل بهینه‌سازی برای مکان‌یابی کلرزنی بوستری و همچنین زمان‌بندی کلرزنی ارائه شده است.[۵] یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه نیز برای مسئله‌ی مکان‌یابی 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.[۶] نتایج مطالعات انجام‌شده‌ی مذکور نشان‌دهنده‌ی اهمیت و برتری کلرزنی بوستری نسبت به کلرزنی در منبع مصرف است و درکلیه‌ی 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 نرخ اضمحلال کلر، شبیه‌سازی مدل کلرزنی واحد برای کلیه‌ی 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 ذخیره‌شده‌ی مدل شبیه‌سازی استفاده شده است که بدین ترتیب انجام مدل بهینه‌سازی در شبکه‌های مذکور میسر شده است.[۵-۷]

در ایران نیز سابقه‌ی مطالعات در زمینه‌ی شبیه‌سازی کلر باقیمانده در شبکه‌های توزیع آب از سال ۱۹۹۸ شروع شده است.[۸] 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 توزیع آب شهری نشان داده شده است.[۹] با وجود این شکل‌گیری محصولات جانبی با پتانسیل سرطان‌زایی نظیر تری‌هالومتان‌ها (THM)[۲] و اسیدهای هالواستیک (HAA۵)[۳] به‌صورت صریح در این مدل‌ها مشاهده نشده است، در حالی که با توجه به خطرات سرطان‌زایی لازم است به ردیابی این محصولات به‌صورت ویژه توجه شود و از رسیدن میزان آن به ترازهای استاندارد و ایمن در آب مصرفی اطمینان حاصل شود. برخی از سازمان‌های محیط‌زیستی نظیر سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA)[۴] یا سازمان بهداشت جهانی (WHO)[۵] کنترل شکل‌گیری محصولات جانبی نظیر THM و HAA۵ 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 (نظیر THM بالاتر از غلظت ۸۰ میکروگرم بر لیتر و HAA۵ بالاتر از غلظت ۶۰ میکروگرم بر لیتر) منجر به افزایش ریسک سرطان برای مصرف‌کنندگان خواهد شد.[۴] اگرچه پژوهشگرانی که با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی، مکان‌یابی ایستگاه‌های کلرزنی را انجام می‌دهند، اعتقاد دارند که کاهش مصرف کلر مصرفی در شبکه به‌صورت ضمنی منجر به کاهش محصولات جانبی در شبکه‌ی توزیع آب خواهد شد. اما در روش‌های مذکور حتی در مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه، تعیین تعداد ایستگاه‌ها، میزان کلر مصرفی در حالات مختلف جواب‌های بهینه با توجه به تأثیرات منفی THM تولیدی قابل بررسی نیست. با وجود این، پژوهشگران اندکی اثر کلرزنی چه به‌صورت متداول و چه به‌صورت بوستری را روی مقدار غلظت محصولات جانبی در شبکه‌ی توزیع آب بررسی کرده‌اند. برای نمونه، در مطالعه‌یی در سال ۲۰۰۹، در بررسی تأثیر کلرزنی بوستری روی کلر باقیمانده و THM شکل گرفته در شبکه‌ی توزیع آب نتیجه شده است که کلر باقیمانده در شبکه یکنواخت‌تر است و متوسط THM در بسیاری از بخش‌های سیستم به‌واسطه‌ی کلرزنی بوستری کاهش یافته است.[۱۰] همچنین برخی پژوهشگران در سال ۲۰۱۴، طراحی سیستم کلرزنی بوستری را با استفاده از مدل بهینه‌سازی تک‌هدفه با درنظر گرفتن تولید محصولات جانبی THM ارائه شده، در مدل EPANET-MSX ارائه کرده‌اند.[۱۱] در صورت استفاده از مدل EPANET-MSX برای مدل‌سازی 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 توزیع آب بزرگ بسیار زمان‌بر است 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 مدل‌بهینه‌سازی مکان‌یابی محل ایستگاه‌های بهینه‌ی کلرزنی بوستری در شبکه‌ی توزیع 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 به‌عنوان محصول جانبی کلرزنی براساس یک رابطه‌ی خطی به‌صورت غیرخطی برآورد و میزان آن در زمان شبیه‌سازی ردیابی و با میزان استاندارد مجاز مقایسه شده است. همچنین در نوشتار حاضر، برای بهره‌گیری از اصل برهم نهی خطی و افزایش سرعت مدل‌سازی، 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 کلر مصرفی را با توجه به میزان خطرات ناشی از تولید محصولات جانبی تعیین کند. درادامه‌ی نوشتار، در بخش ۲ به معرفی مدل بهینه‌سازی دوهدفه‌ی تزریق کلر در شبکه‌ی توزیع آب؛ توابع هدف و متغیرهای تصمیم؛ الگوریتم بهینه‌سازی و فرضیات حل مسئله پرداخته شده است. در بخش ۳، یک مطالعه‌ی موردی معرفی و فرضیات مرتبط توصیف شده است. همچنین در بخش ۴، نتایج مدل بهینه‌سازی ارائه و بر روی آن‌ها بحث شده و درانتها، جمع‌بندی نوشتار با ارائه‌ی 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 فلوچارتی 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 کلیه‌ی گره‌های شبکه تشکیل شده است. سپس مدل بهینه‌سازی تدوین و حل شده و در نهایت، پس از تعیین رویه‌ی بهینه‌ی پارتو موردنظر، میزان کلر باقیمانده و THM تشکیل شده برای چندین گره شبکه در رویه‌ی بهینه‌ی منتخب بررسی و تحلیل شده است. در ادامه، گام‌های اساسی این روش با جزئیات تشریح شده است.

Archive of SID
www.SID.ir

شکل ۱. فلوچارت روش پیشنهادی نوشتار حاضر.

۱.۲. 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. به‌منظور افزایش سرعت محاسباتی مدل بهینه‌سازی، ارزیابی توابع هدف با استفاده از اصل برهم نهی خطی و ضرایب پاسخ در شبیه‌سازی کیفی دینامیکی آب انجام شده است.[۵-۷] استفاده از انجام اصل فوق با فرض درنظرگرفتن سینتیک 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 به‌صورت 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 به‌صورت نسبت مجموع آب مورد نیاز مصرف‌کنندگان با مقدار غلظت کلر باقیمانده در محدوده‌ی استاندارد به مجموع آب مصرفی در کلیه‌ی گره‌های شبکه تعریف می‌شود. متغیرهای تصمیم مدل بهینه‌سازی چندهدفه عبارت‌اند از: محل این ایستگاه‌ها در شبکه‌ی توزیع و میزان تزریق کلر در هر بازه‌ی 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 به‌صورت روابط ۱ الی ۳ است:[۶]

$$\mathrm{Min}\, f_1 = \sum_{i=1}^{n_b} \sum_{k=1}^{n_k} M_i^k \qquad (1)$$

$$\mathrm{Max}\, f_2 = \frac{\sum_{m=\mu}^{\mu+n_h-1} \sum_{j=1}^{n_m} V_j^m}{V} \times 100 \qquad (2)$$

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

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

$$f_2 \ge c \qquad (4)$$

$$M_i^k \ge 0; \quad i = 1, ..., n_b; \quad k = 1, ..., n_k \qquad (5)$$

$$c_j^{\min} \le c_j^m; \quad j = 1, ..., n_m; \quad m = \mu, ..., \mu + n_h - 1 \qquad (6)$$

که در آن‌ها، c مقداری ثابت برای محدود ساختن تأمین یک تراز کمینه‌ی درصد آب آشامیدنی سالم (تابع هدف دوم) است. محدودیت سوم (رابطه‌ی ۶)، کمینه‌ی غلظت موردنیاز در گره‌های کنترلی را تضمین می‌کند. به‌منظور شناسایی میزان خطر محصولات جانبی حاصل از کلر مصرفی در شبکه‌ی توزیع آب نظیر THM تولید شده، لازم است مقدار آن‌ها با استفاده از روش‌های مناسب برآورد شود. مطالعات پیشین نشان داده است که شکل‌گیری THM فقط براساس تابعی از میزان اضمحلال کلر مصرفی خواهد بود. در سال‌های ۲۰۰۳، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی در سناریوهای مختلف کلرزنی در شبکه، رابطه‌یی 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:[۱۳]

$$THM = Y\,(\text{مصرفی}\ Cl_2) + M \qquad (7)$$

که در آن، THM مقدار کل تری‌هالومتان تشکیل شده (میکروگرم بر لیتر)؛ Y پارامتر معرف میکروگرم THM تشکیل‌شده برای هر میلی‌گرم کلر (cl_2) مصرف‌شده؛ و M پارامتر عرض از مبدأ که معمولاً صفر در نظر گرفته می‌شود. مقدار پارامتر Y وابسته به عوامل مختلفی نظیر: ترکیب شیمیایی و ساختار مواد آلی موجود در آب، PH و دماست.[۱۲و۱۳] مقادیر دو پارامتر مذکور براساس تحلیل رگرسیون خطی از داده‌های آزمایشگاهی به‌دست می‌آید. این رابطه می‌تواند مبنای خوبی برای برآورد غیرمستقیم میزان THM تولید شده در شبکه بدون شبیه‌سازی واقعی آن باشد. شایان ذکر است نرم‌افزار EPANET می‌تواند رشد یا اضمحلال یک ماده را در حین حرکتش در سرتاسر شبکه‌یی توزیع ردیابی کند که می‌توان غلظت کلر مصرفی را در طول شبکه محاسبه کرد. برای این منظور، لازم است نرخ واکنش اضمحلال غلظت کلر در شبکه‌های توزیع آب که شامل دو بخش واکنش حجمی[۶] و واکنش جداره‌ی لوله[۷] هستند را مشخص و شبکه را شبیه‌سازی کرد. یعنی اضمحلال کل غلظت کلر از مجموع اضمحلال حجمی و اضمحلال جداره‌ی لوله به‌دست می‌آید.

Archive of SID
www.SID.ir

۲.۲. مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه (MOGA)[۸]

بهترین روش برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی دوهدفه‌ی فوق، به‌کارگیری یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه است. برای این منظور در نوشتار حاضر از الگوریتم ژنتیک چندهدفه (MOGA) به‌عنوان 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.[۱۴] برخی از کاربردهای الگوریتم ژنتیک چندهدفه در حل مسائل شبکه‌های توزیع را می‌توان در برخی مطالعات،[۶و۱۵-۱۷] مشاهده کرد.

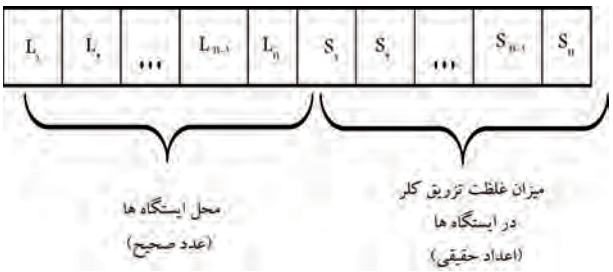
هدف کلی در بهینه‌سازی چندمعیاره، یافتن مجموعه جواب‌های بهینه‌ی پارتو است، که معمولاً به‌صورت یک رویه نشان داده می‌شوند. برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه از الگوریتم‌های تکاملی کاوشی استفاده می‌شود که توانایی مناسبی نسبت به روش‌های متداول در حل این‌گونه مسائل دارند.[۱۸] در روش‌های تکاملی، یک جمعیت از 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 وسیع‌تری پیدا کند. تاکنون الگوریتم‌های چندهدفه‌ی بسیاری از قبیل الگوریتم ژنتیک چندهدفه، الگوریتم تکاملی پارتو، الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی غیر پست (NSGA-II)[۹] و ... استفاده شده‌اند. در نوشتار حاضر، روش (NSGA-II) توسعه داده‌شده‌ی دب[۱۰] و همکاران (۲۰۰۲) استفاده شده است.[۱۸]

۳.۲. روش حل مسئله

در پژوهش حاضر، مدل الگوریتم ژنتیک دوهدفه‌ی NSGA-II با استفاده از یک برنامه‌ی کامپیوتری در نرم‌افزار MATLAB توسعه یافته است. به‌منظور کاهش تلاش و زمان محاسباتی اجرای مدل بهینه‌سازی، شبیه‌سازی سیستم 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.[۵و۷] 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 به‌صورت مجزا (مستقل) شبیه‌سازی و میزان کلر باقیمانده در گره کنترلی j برای زمان پایش m محاسبه و به‌صورت α_{ij}^{km} ذخیره شده است. میزان ضریب پاسخ α برای کلیه‌ی بازه‌های زمانی تزریق (n_k) و تعداد ایستگاه‌های تزریق (n_b) محاسبه شده است. میزان کلر باقیمانده در گره کنترلی برای مجموع تعداد شبیه‌سازی‌ها که برابر با $n_k \times n_b$ است، پیش از ورود به حلقه‌ی بهینه‌سازی ذخیره شده است.

در داخل حلقه‌ی بهینه‌سازی و برای هر یک از جواب‌های بالقوه، میزان غلظت کلر باقیمانده (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، به‌صورت ترکیب خطی رابطه‌ی ۸ محاسبه و از شبیه‌سازی مدل EPANET اجتناب شده است که این امر می‌تواند کاهش چشم‌گیری را در زمان اجرای مدل به‌وجود آورد.[۵]

$$c_j^m = \sum_{i=1}^{n_b} \sum_{k=1}^{n_k} \alpha_{ij}^{km} x_i^k \qquad (۸)$$



شکل ۲. نمایش ژنتیکی کروموزوم‌های الگوریتم ژنتیک با تعداد n ایستگاه تزریق کلر شامل: محل و میزان غلظت تزریق کلر (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 از ایستگاه‌هاست (اعداد حقیقی). 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 برابر 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 نشان‌دهنده‌ی محل ایستگاه تزریق کلر در آن جواب است $(n < n_p)$. به طور مشابه، هر یک از n ژن باقیمانده می‌توانند یک مقدار حقیقی بین ۰ تا بیشترین میزان تزریق را به‌عنوان میزان تزریق در ایستگاه تزریق کلر به خود اختصاص دهند. برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک چندهدفه‌ی NSGA-II استفاده شده است. عملگرهای الگوریتم ژنتیک مورد استفاده عبارت‌اند از: عملگر انتخاب تورنمنت، تزویج یک نقطه‌یی و جهش ژنی. جزئیات بیشتر الگوریتم ژنتیک چندهدفه‌ی NSGA-II در پژوهش دب و همکاران (۲۰۰۲) یافت می‌شود.[۱۸]

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 باقیمانده محاسبه و THM تخمین زده شده به‌کار 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، به‌صورت سیستم پمپاژ و ثقلی تأمین می‌شود. هیدرولیک شبکه در یک دوره‌ی ۲۴ ساعته با گام‌های زمانی یک ساعته و به‌صورت دوره‌یی فرض شده است. میزان متوسط مصرف در شبکه‌ی توزیع آب برابر ۲۰۹ لیتر بر ثانیه است که در طی روز به میزان بیشینه‌ی ۳۷۴ لیتر بر ثانیه افزایش می‌یابد و در کمترین 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 تبعیت می‌کند. نرخ اضمحلال گندزدا در شبکه از درجه‌ی اول فرض شده است. همچنین براساس عمده‌ی مطالعات پیشین برای اضمحلال کلر در شبکه، میزان ضریب ثابت دیواره‌یی (kw) برابر $(\mathrm{m.day}^{-1})$ ۰٫۰۹ و ضریب ثابت حجمی (kb) برابر (m) ۰٫۵۵،[۶] و نیز مقادیر ثابت ضریب و عرض از مبدأ در رابطه‌ی ۷ برای برآورد میزان تولید THM تشکیل شده بر حسب میزان کلر مصرف شده براساس مطالعات پیشین به ترتیب برابر $Y = 40$ و $M = 0$ فرض شده است.[۱۰و۱۸]

Archive of SID
www.SID.ir

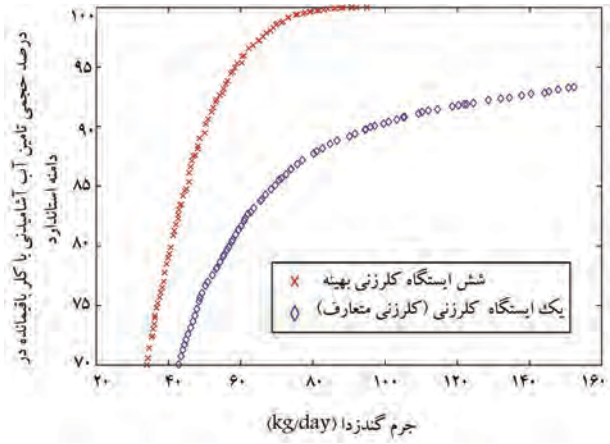
شکل ۳. شبکه‌ی توزیع آب شهری مورد مطالعه.

در شبکه‌ی توزیع مورد مطالعه، در وضعیت موجود فقط یک ایستگاه کلرزنی در محل تصفیه‌خانه موجود است که میزان تزریق آن در محدوده‌ی استاندارد بین ۰ و بیشترین غلظت مجاز است. ۳۰ مکان بالقوه برای نصب ایستگاه کلرزنی شامل تصفیه‌خانه‌ی موجود و ۲۹ گره به‌عنوان نقاط با پتانسیل و با اثربخشی بیشتر در شبکه به‌عنوان نقاط بالقوه‌ی ایستگاه‌های کلرزنی استفاده شده است که موقعیت این نقاط به‌صورت علامت + در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به عملکرد بهتر ایستگاه‌های بوستر پمپ از نوع تزریق کلر متناسب با دبی[۱۱] نسبت به نوع تزریق کلر با نرخ جرمی ثابت[۱۲]،[۶] در نوشتار حاضر از ایستگاه‌های نوع اول استفاده شده است که برخلاف ایستگاه‌های بوستر پمپ با نرخ جرمی ثابت، میزان تزریق کلر متناسب با دبی متغیر خواهد بود. همچنین فرض شده است که کلرزنی در هر ایستگاه برای یک بازه‌ی زمانی انجام می‌شود. بنابراین در ایستگاه‌های کلرزنی، مقدار غلظت کلر به‌عنوان متغیرهای تصمیم (اعداد حقیقی ژن‌های یک کروموزوم) در هر ایستگاه تعریف شده است که بین ۰ و بیشترین غلظت کلر (۴mg/l) تغییر می‌کند.

برای محدوده‌ی استاندارد مقدار کلر باقیمانده در گره‌ها (رابطه‌ی ۶)، مقادیر کمینه ($c_{\min}$) و بیشینه ($c_{\max}$) به ترتیب برابر (mg/l) ۰٫۲ و (mg/l) ۴ فرض شده است. همچنین مقدار کمینه‌ی درصد آب آشامیدنی سالم (رابطه‌ی ۴) برابر ۷۰٪ فرض شده است. به منظور از بین بردن تأثیر اولیه‌ی کلرزنی دوره‌یی ۲۴ ساعته در نتایج، مدت زمان شبیه‌سازی کیفی برابر ۱۴۴ ساعت تنظیم شده است که نتایج دوره‌ی ۲۴ ساعت آخر در محاسبات منظور شده است. پیش از اجرای نهایی الگوریتم ژنتیک چندهدفه لازم است پارامترهای آن تنظیم شود. مقادیر تنظیم‌شده‌ی پارامترهای الگوریتم ژنتیک عبارت‌اند از: احتمال تزویج برابر ۰٫۹ و احتمال جهش برابر ۰٫۲۵ و تعداد نسل‌های الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای همگرایی از ۴۰۰ نسل برای یک ایستگاه کلرزنی تا ۱۰۰۰۰ نسل برای ۲۰ ایستگاه تغییر کرده است.

۴. ارائه‌ی نتایج و بحث

مدل بهینه‌سازی دوهدفه‌ی معرفی‌شده 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 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 به‌دست خواهد آمد. نمونه‌یی 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 تصفیه‌خانه (یک ایستگاه کلرزنی)، درصد حجمی آب آشامیدنی با کلر باقیمانده در دامنه‌ی استاندارد با بیشترین مقدار کل تزریق در حدود ۱۵۲ kg/day، بیشینه‌ی ۹۳٫۳٪ مصرف‌کنندگان شبکه، آب آشامیدنی با کلر باقیمانده در دامنه‌ی استاندارد را دریافت خواهند کرد. اما با افزایش تعداد ایستگاه‌های تزریق به ۶ ایستگاه، با میزان کل تزریق ۹۰ کیلوگرم کلر در روز، کلیه‌ی مصرف‌کنندگان شبکه (۱۰۰٪) قادر به دریافت آب آشامیدنی با کلر باقیمانده در دامنه‌ی استاندارد خواهند بود که این مطلب تأییدکننده‌ی نتایج مطالعات پراسد و همکاران (۲۰۰۴a) است که با افزایش تعداد ایستگاه‌های کلرزنی، میزان تزریق به‌نحو چشم‌گیری کاهش خواهد یافت.[۶] همچنین برخی مطالعات پیشین نشان می‌دهند که تشکیل محصولات جانبی مضر حاصل از گندزدایی نظیر تری هالومتان‌ها که سرطان‌زا هستند، تابعی از مقدار گندزداست.[۱۹،۱۳،۱۲،۱۰]

برای مثال با به‌کارگیری 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 سوأل مطرح در بخش کنونی این است که با فرض افزایش تعداد ایستگاه‌ها، چه میزان کلی از گندزدا نظیر کلر 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 سوأل از روی منحنی شکل ۴ نیز مشخص است، بدین صورت که با افزایش میزان کل جرم گندزدا در قسمت پایینی منحنی، میزان درصد مصرف‌کنندگان با آب آشامیدنی سالم با شدت زیادی افزایش می‌یابد، اما در بخش بالایی این منحنی با افزایش جرم گندزدا، درصد مصرف‌کنندگان با آب آشامیدنی

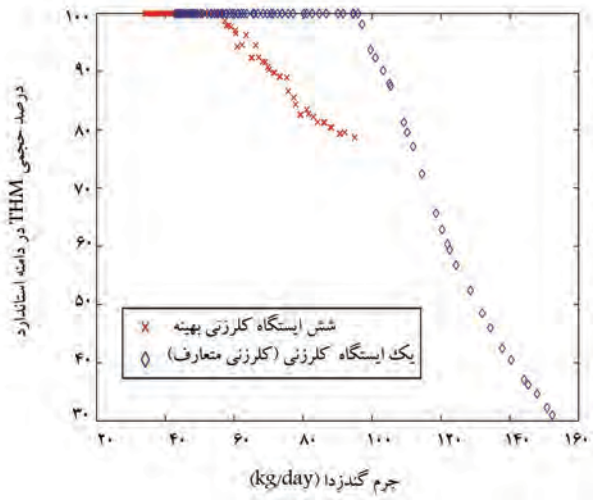
Archive of SID
www.SID.ir

سالم با نرخ اندکی 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 به‌عنوان نقطه‌ی خوبی از جواب مسئله اشاره شود.

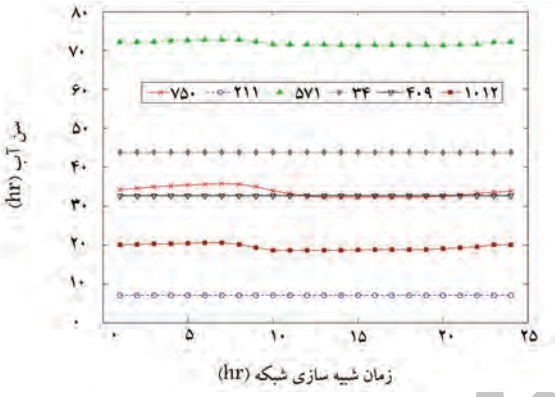
اما از نقطه‌نظر بخش دوم سوأل مطرح شده، لازم است میزان THM تولیدشده براساس کلر مصرف شده در شبکه‌ی توزیع با توجه به رابطه‌ی ۷ برآورد شود، تا تغییرات آن در این جواب‌ها بررسی شود. بر این اساس در شکل ۵، شبیه‌سازی انجام شده برای کلیه‌ی جواب‌های ارائه شده در رویه‌ی بهینه‌ی پارتو شکل ۴ ارائه شده است که بدین وسیله مقدار درصد حجمی مصرف‌کنندگان با THM در دامنه‌ی استاندارد (غلظت THM کمتر از ۸۰ میکروگرم بر لیتر) نمایش داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در حالت کلرزنی متعارفی تا حدود ۱ کیلوگرم تزریق کل کلر 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 میزان 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 مصرف‌کننده‌یی 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 میزان تزریق کلر بیش از مقدار مذکور، درصد آب تحویلی به مصرف‌کنندگان THM مجاز با شدت زیادی کاهش می‌یابد (شکل ۵). به‌نحوی که در حالت تزریق به میزان ۱۵۰ کیلوگرم در روز، میزان درصد آب تحویلی به مصرف‌کنندگان با THM در حالت استاندارد به حدود ۳۰٪ کاهش می‌یابد که بسیار خطرناک است و باید از آن‌ها پرهیز شود. در حالت ۶ ایستگاه کلرزنی نسبت به کلرزنی متعارفی، وضعیت به‌نحو چشم‌گیری بهبود یافته است، به‌طوری که تا حدود تزریق کلر به میزان ۵۸ کیلوگرم در روز، ۱۰۰٪ 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). به‌عبارت دیگر، در این حالت تزریق کلر بیشتر از این مقدار در شبانه‌روز منجر به افزایش ریسک سرطان‌زایی در شبکه توزیع آب خواهد بود. از طرف دیگر، با مقایسه‌ی شبیه‌سازی ۲ حالت کلرزنی بهینه (۱ و ۶ ایستگاه) ملاحظه می‌شود که نرخ نزولی افت THM با دامنه‌ی استاندارد در شبکه‌ی توزیع آب به‌واسطه‌ی افزایش میزان جرم کل گندزدا در حالت ۶ ایستگاه کلرزنی شدت کمتری دارد.

به‌منظور 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 آنها طی مدت شبانه‌روز بررسی شده است. شکل ۶، سن آب را برای چندین گره مختلف در شبکه‌ی 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، کلر باقیمانده کاهش و میزان THM تشکیل شده افزایش می‌یابد. در شکل مذکور از برخی از گره‌های دوردست نظیر ۷۵۰، ۵۷۱ و ۱۰۱۲ و همچنین گره‌های نزدیک و میانی شبکه‌ی نظیر ۳۴، ۲۱۱ و ۴۰۹ استفاده شده است که موقعیت آنها در شکل



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

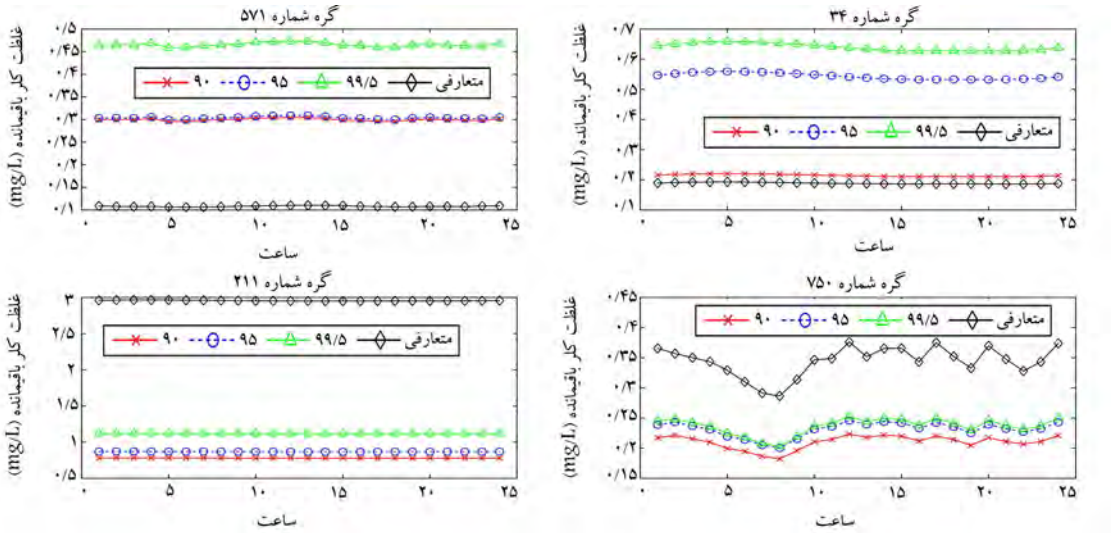


شکل ۶. سن آب برای گره‌های مختلف شبکه‌ی توزیع آب مورد مطالعه.

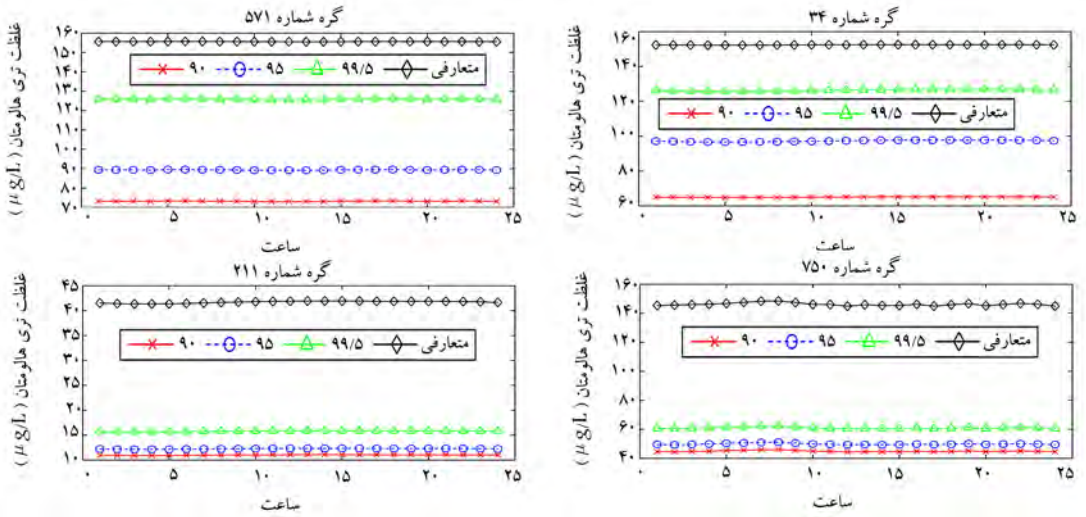
۳ مشاهده می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشترین سن آب مربوط به گره شماره‌ی ۵۷۱ می‌شود که سن آب برای رسیدن به این نقطه بیش از ۷۰ ساعت است. حتی گره شماره‌ی ۳۴ که در ظاهر نقطه‌ی دوری نسبت به منبع آب شبکه نیست، نیز با بیش از ۴۰ ساعت سن آب در رده‌ی بعدی است. کمترین سن آب نیز مربوط به گره‌ی شماره‌ی ۲۱۱ است که در نزدیکی محل منبع قرار دارد. برای تحلیل‌های بعدی، پارامترهای کیفی فوق برای گره‌های با بیشترین سن آب (۵۷۱، ۳۴ و ۷۵۰) و کمترین سن آب (۲۱۱) در شبانه‌روز برای حالت کلرزنی متعارفی (تأمین بیشترین درصد آب آشامیدنی سالم) و همچنین ۶ ایستگاه کلرزنی برای درجات مختلف آب آشامیدنی سالم با غلظت کلر باقیمانده در دامنه‌ی استاندارد با جزئیات بیشتر بررسی می‌شود.

شکل ۷، میزان غلظت کلر باقیمانده را برای ۴ گره فوق در شبانه‌روز نشان می‌دهد. برای هرگره، تغییرات کلر باقیمانده برای ۴ حالت ترسیم شده است که عبارت‌اند از: یک وضعیت کلرزنی متعارفی در ۱ ایستگاه و ۳ حالت کلرزنی بهینه که میزان درصد حجم آب مصرفی با غلظت کلر باقیمانده در شبکه ۹۰، ۹۵ و ۹۹/۵ درصد باشد. مطابق شکل مذکور، برای گره شماره‌ی ۵۷۱ به‌عنوان گره با سن آب بسیار بالا، غلظت کلر باقیمانده فقط در حالت متعارفی در محدوده‌ی غیرمجاز ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر است و در بقیه‌ی حالت‌های ۶ ایستگاه بهینه‌ی کلرزنی در محدوده‌ی استاندارد کمتر از ۱

Archive of SID
www.SID.ir



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



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

میلی‌گرم بر لیتر قرار دارد. همچنین تغییرات غلظت کلر باقیمانده در شبانه‌روز برای گره شماره‌ی ۲۱۱ به‌عنوان 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. درگره‌های دیگر (نقاط ۷۵۰ و ۳۴) تغییرات غلظت کلر باقیمانده در محدوده‌ی استاندارد و البته در برخی اوقات در آستانه‌ی حدی قرارگرفته است. شکل ۸، تغییرات میزان غلظت THM برای ۴ گره مذکور در شبانه‌روز 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 متعارفی، ناحیه‌ی شبکه‌ی ذکر شده (شامل گره ۵۷۱) بالاترین حد غلظت THM تشکیل شده را به‌خود اختصاص داده‌اند (حدود 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 پارامترکیفی 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 مذکور، میزان غلظت THM تولید شده درکلیه‌ی حالات به تناسب کمتر است. البته در محدوده‌ی گره‌ی شماره‌ی ۷۵۰ در پایین شبکه‌ی توزیع، فقط غلظت THM تشکیل شده در وضعیت غیرمجاز است و برای کلیه‌ی حالات

www.SID.ir

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، مکان‌یابی 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 مصرف‌کنندگان با غلظت کلر باقیمانده در محدوده‌ی استاندارد و کمینه‌سازی جرم گندزدای مصرفی در شبانه‌روز تعیین شده است. مسئله‌ی بهینه‌سازی مذکور با استفاده از مدل الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II حل شده است. برآورد غیرمستقیم غلظت THM تشکیل‌شده براساس رابطه‌ی خطی میزان کلر مصرف شده برای نتایج بهینه در ۲ حالت کلرزنی متعارف و ۶ ایستگاه کلرزنی نشان داده است که با افزایش جرم گندزدا از یک حد مشخص، به‌تدریج بخشی از مصرف‌کنندگان آب را با غلظت THM بالاتر از حد مجاز دریافت می‌کنند. بدین ترتیب برای حالت کلرزنی متعارفی، بیشینه‌ی مجاز کل تزریق کلر به‌نحوی 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 به‌دست می‌آید، در حالی که برای ۶ ایستگاه کلرزنی، مصرف‌کنندگان آب آشامیدنی ۹۵٪ آب تحویلی با غلظت کلر در محدوده‌ی استاندارد را دریافت می‌کنند. همچنین بحرانی‌ترین 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.

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.
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).

Archive of SID
www.SID.ir

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 Ardeshir, 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., Ardeshir, A., Jalilsani, 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).

Archive of SID

www.SID.ir