



کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵

1053P-NWWCE

کاربرد الگوریتم ژنتیک تحت نرم افزار اکسل در مدیریت بهینه کیفی شبکه های توزیع آب

علیرضا مقدم^۱، مهدی مختاری^۲، رویا پیروی^{۳*}

۱- دانشجوی دکترا مهندسی منابع آب، دانشگاه ارومیه؛ ارومیه

۲- مرکز تحقیقات علوم و فناوری های محیط زیست، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی

و خدمات بهداشتی درمانی شهید صدوقی یزد، یزد

۳- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، مرکز تحقیقات توسعه اجتماعی و ارتقای سلامت،

دانشگاه علوم پزشکی گناباد، گناباد

*rpeirovi@yahoo.com

خلاصه

گندزدایی به علت اهمیتی که در کیفیت میکروبی آب دارا می باشد از مراحل مهم در تصفیه آب محسوب می شود. یکی از ترکیبات گندزدایی آب کلر است که طبق استانداردهای بهداشتی حفظ میزان باقیمانده آن بین حداقل و حداکثر در سراسر شبکه امری ضروریست. در این مقاله برای اولین بار با استفاده از یک افزونه بهینه سازی به نام GANetXL که از الگوریتم ژنتیک تحت نرم افزار اکسل استفاده می نماید میزان کلر تزریقی در یک شبکه مرجع بر مبنای ارتباط پویا با مدل تحلیل هیدرولیکی و کیفی EPANET2 بهینه گردید. با کاهش تعداد نسل به ۲۰۰ کمترین میزان تزریق در ایستگاه ها صفر، بیشترین آن ۷۷۶/۵۷، متوسط میزان تزریق ۱۸۳/۸۷ و مجموع تزریق در طی یک شبانه روز برابر با ۴۴۱۲/۸۴ میلی گرم بر دقیقه حاصل شد. با توجه به نتایج، کمینه سازی میزان کلر مصرفی در عین رعایت میزان حداقل نیاز باقیمانده از آن در شبکه علاوه بر اثرات مثبت بر سلامتی، دارای آثار مثبت اقتصادی نیز می باشد.

کلمات کلیدی: شبکه های توزیع آب، بهینه سازی، کلر، اکسل، GANetXL.

۱. مقدمه

کلر از ترکیبات رایجی که از خود باقیمانده بر جای می گذارد و به طور عمده در تصفیه خانه ها به منظور گندزدایی آب استفاده می شود. طبق استانداردهای بهداشتی حفظ میزان کلر باقیمانده بین حداقل (۰/۲ میلی گرم بر لیتر) و حداکثر (معمولا ۴ mg/L و در ایران ۵ mg/L) در سراسر شبکه توزیع آب آشامیدنی امری ضروریست [۱-۳]. واکنش کلر با اجزا موجود در توده آب و مواد ته نشین شده بر جداره لوله در حین حرکت در شبکه و تغییر شرایط جریان در داخل لوله ها منجر به کاهش غلظت کلر در شبکه توزیع می شود که در اصطلاح به آن زوال کلر نامیده می شود. دزهای بالای کلر باقیمانده در شبکه توزیع آب آشامیدنی ممکن است منجر به تشکیل ترکیبات جانبی گندزدایی مانند تری هالومتان ها و هالو استیک اسیدها شود که ترکیبات سرطان زا و خطرناک می باشند و از طرفی نگهداری میزان کلر باقیمانده در حد مطلوب در سراسر شبکه توزیع، توصیه می شود. تزریق کلر در تصفیه خانه و منابع آب آشامیدنی قبل از ورود به شبکه سبب بروز غلظت های بالا در گره های نزدیک به منابع و عدم وجود میزان کلر باقیمانده مناسب در گره های انتهایی شبکه در برخی از ساعات شبانه روز می شود.

مطالعات مختلف اهمیت و تاثیر بوسترپمپ های کلرزنی در شبکه جهت حفظ کلر باقیمانده در تمامی نقاط شبکه را بیان کرده اند [۳-۴]. میزان تزریق کلر می تواند بصورت غلظت کلر بر حسب میلی گرم بر لیتر و یا بصورت نرخ جرمی بر حسب میلی گرم بر دقیقه وارد سیستم شود. هدف تعیین مناسب ترین میزان تزریق در شبکه می باشد به طوریکه غلظت در تمامی نقاط شبکه در بازه استاندارد تعیین شده باشد. جهت دستیابی به این هدف

می توان با روش سعی و خطا به میزان تزریق مناسب رسید که البته روشی خسته کننده و بسیار وقت گیر بخصوص در شبکه های بزرگ می باشد و نیز احتمال رسیدن به جواب بهینه بسیار پایین می باشد [۴-۵].

از این رو لزوم بکارگیری الگوریتم های بهینه سازی کاملا مشهود می باشد. پژوهش های زیادی در این زمینه توسط محققین مختلف انجام شده است، مانند بوسلی و همکاران که با تابع هدف خطی و قراردادن محدودیت های مناسب بمنظور نگهداشتن غلظت کلر در تمامی نقاط شبکه در بازه مورد نظر توسط تزریق در بوستر پمپ ها میزان کلر مصرفی تزریق شده را با مدل بهینه سازی خطی بهینه کردند [۶]. روحیانین با استفاده از تابع هدف دوگانه که یکی جهت کنترل گندزدایی کردن کلر (غلظت بزرگتر از حداقل) و دومی به منظور کنترل طعم و بو برای زمانی که غلظت کلر باقیمانده از مقدار حداکثر استاندارد بیشتر شود توسط الگوریتم ژنتیک بهینه سازی را انجام داده اند [۷]. آیوز و همکاران از چارچوب تصمیم گیری فازی (DMF) که با ترکیب الگوریتم ژنتیک و برنامه نویسی خطی (GA-LP) ادغام شده بود، برای تعیین بهترین مکان نصب بوستر در شبکه توزیع آب استفاده نمودند. مدل ترکیبی پیشنهادی GA-LP به طور همزمان دو هدف متناقض یعنی، به حداقل رساندن کل دوز کلر تزریقی و تعداد ایستگاه های بوستر و در همان زمان، نگه داشتن غلظت کلر باقیمانده در محدوده مورد نظر را بهینه می کرد. انتخاب بهترین گزینه از میان راه حل های بهینه شده توسط چارچوب تصمیم گیری فازی چند هدفه انجام شد [۸]. در مطالعه کنونی برای اولین بار با استفاده از یک افزونه بهینه سازی به نام GANetXL که از الگوریتم ژنتیک استفاده می نماید میزان کلر تزریقی در یک شبکه توزیع آب مرجع و شناخته شده از مطالعات قبلی بر مبنای ارتباط پویا با مدل تحلیل هیدرولیکی و کیفی EPANET2 در محیط نرم افزار اکسل بهینه گردید.

۲. مواد و روش ها

۲.۱. مدل دینامیکی کیفی شبکه

انتقال همرفتی مواد گندزدا در طول لوله ۱ در شبکه توزیع به صورت معادله انتقال کلاسیک در زیر توضیح داده شده است:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -u_i \frac{\partial c_i}{\partial x} \pm R(c_i) \quad (1)$$

که C_i غلظت کلر در لوله i تابعی از مکان و زمان بر حسب mg/L ، u_i سرعت جریان در لوله i بر حسب m/s و $R(c_i)$ بیانگر نرخ واکنش است که برای گندزدایی با کلر توسط راسمن معین شده است [۴-۵].

نرم افزار EPANET2 قادر است تولید یا تخریب یک ماده در اثر واکنش آب در درون شبکه توزیع را ردیابی کند و بدین منظور نرخی که ماده در آن واکنش می دهد و چگونگی وابستگی این نرخ به غلظت نیاز است. واکنش ها می تواند هم در حجم آب و هم با مواد موجود در جداره لوله رخ دهد. این نرم افزار قادر است واکنش هایی با مرتبه n سینتیکی را که در حجم جریان رخ می دهد مدلسازی نماید؛ که در این حالت سرعت واکنش با معادله زیر بیان می شود:

$$R = K_b C^n \quad (2)$$

در معادله فوق R نرخ واکنش برحسب (جرم/حجم/زمان)، K_b ضریب نرخ واکنش جریان، C غلظت واکنش دهنده (جرم/حجم) و n درجه واکنش می باشد.

۲.۲. معرفی مدل GANetXL

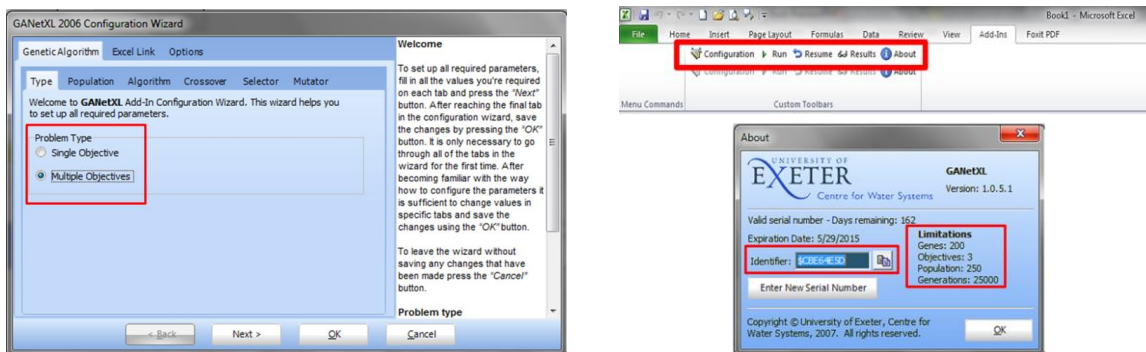
بسیک و همکاران یک ابزار بهینه سازی با کمک الگوریتم ژنتیک در محیط نرم افزار اکسل به نام GANetXL توسعه دادند که به طیف وسیعی از کاربرانی که هیچ تجربه قبلی در برنامه نویسی ندارند برای حل مسائل با استفاده از GA کمک می نماید. در طی سال های گذشته GANetXL در حال توسعه بوده و امکانات آن افزایش یافته است تا نیازهای محققین را برآورده سازد و آخرین نسخه آن از الگوریتم ژنتیک تک هدفه و چند هدفه

¹ - Fuzzy Decision-Making Framework

² - Genetic Algorithm-Linear Programming

پشتیبانی می کند و به کاربران کم تجربه اجازه می دهد تا یک مسئله بهینه سازی را تعریف، پیکربندی و اجرا نمایند و نتایج آن را در صفحات مجزا مشاهده کنند [۱۶].

پارامترهای الگوریتم های فوق به آسانی می تواند با استفاده از یک پنجره گرافیکی که مرحله به مرحله کاربر مبتدی را برای انتخاب گزینه های مربوطه هدایت می کند تعیین شود. یکی از خصوصیات GANetXL توانایی ارتباط آسان آن با نرم افزار های شبیه سازی می باشد که می تواند برازندگی راه حل ها را به کمک این نرم افزارها ارزیابی نماید. همچنین این امکان وجود دارد تابعی که در محیط ویزوال بیسیک توسط کاربر تعریف شده است برای ارزیابی توسط GANetXL فراخوانی شود شکل ۱ قسمت هایی از محیط کاری GANetXL را نمایش می دهند. GANetXL با تحلیلگر هیدرولیکی شبکه EPANET2 و مدل های توسعه یافته در محیط برنامه نویسی ویزوال بیسیک که بصورت توابع کتابخانه ای پویا^۱ (DLL) می باشند با موفقیت لینک می گردد [۹]. رام پلاترا [۱۷] و گوردهانام [۱۸] و سایر محققین [۱۹-۲۱] در مطالعات خود از GANetXL استفاده نمودند.



شکل ۱- نمایشی از مدل GANetXL افزوده شده به نرم افزار اکسل

۳.۲. تابع هدف

همانطور که در مقدمه بیان شد همواره میزان کلر باقیمانده در شبکه توزیع باید در بازه استاندارد قرار گیرد. بدین منظور در این مقاله تابع هدف بر مبنای بهینه سازی تک هدفه به نحوی تدوین شد که مربع تفاضل بین غلظت کلر محاسبه شده و حداقل مجاز میزان کلر باقیمانده در شبکه برای هر کدام از گره های کنترل شونده برای تمامی گام های زمانی مورد نظر کمینه شود. متغیرهای تصمیم میزان بهینه دزهای مختلف تزریق در مکان های نصب بوسترها بود. بنابراین تابع هدف در این مطالعه مانند مقاله کومار به شکل زیر نوشته شد:

$$\text{minimize } E = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{N_j} [Cn_{jk} - C_{\min}]^2 \quad (3)$$

subject to

$$Cn_{jk} \geq C_{\min}$$

$$Cn_{jk} \leq C_{\max}$$

$$j = 1, \dots, M ; k = 1, \dots, N_j$$

که M = تعداد گره های کنترل شونده، N_j = تعداد گام های زمانی در گره j درون بازه کنترل، C_{\min} و C_{\max} به ترتیب حداقل و حداکثر غلظت مجاز کلر (mg / L) در شبکه می باشند.

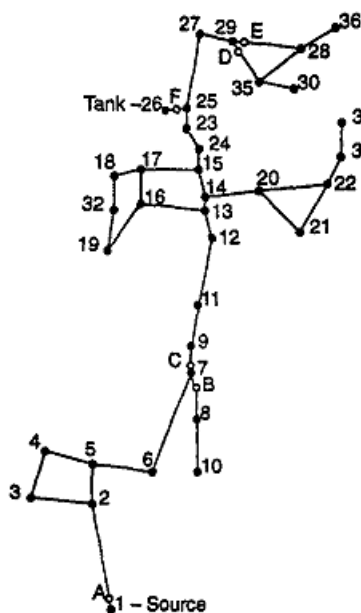
در ادامه تابع هدف همراه با اعمال قیدهای ذکر شده (حداقل و حداکثر غلظت کلر) با کمک مدل دینامیکی کیفی آب EPANET2 و ارتباط پویای آن با GANetXL در محیط ویزوال بیسیک محاسبه می شود. بدین منظور ابتدا هر یک از عضوهای جمعیت (متغیرهای تصمیم) ایجاد شده توسط GA موجود در GANetXL برای تحلیل وارد مدل EPANET2 و سپس مقادیر غلظت کلر باقیمانده در گره های کنترل شونده شبکه وارد

¹Dynamic-Link Libraries

تابع هدف می گردد. سپس تحلیل GA برای تولید نسل بعدی بر اساس بهترین نتایج حاصله از تابع هدف محاسبه و عضوهای جدید جمعیت در GA که همان دوزهای تزریق در بوسترها می باشند به EPANET2 وارد و این عمل تا یافتن جواب بهینه بطور مداوم تکرار می شود.

۴.۲ کاربرد مدل

در این مقاله عملکرد مدل GANetXL در بهینه سازی میزان تزریق کلر بر روی شبکه توزیع آب واقع در منطقه جنوب ایالت کانکتیکوت مرکزی در ناحیه Cherry Hill/Brushy در شهر برندفورد مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۲ نمای این شبکه و ایستگاه های بوستر پمپ های تزریق کلر را به ترتیب با حروف A تا F نشان می دهد. سایر اطلاعات این شبکه از قبیل مشخصات هیدرولیکی و موقعیت بوستر پمپ های تزریق کلر در مطالعات قبلی مانند بوسلی [۶]، کومار [۴] و جیسیس [۲۲] بیان شده است. ضریب واکنش جریان 0.5 بر روز و جداره لوله صفر متر در روز در نظر گرفته شد. تزریق در این محل ها به صورت جرمی و با چهار الگوی تزریق متفاوت در ۲۴ ساعت شبانه روز صورت می گرفت. بنابراین با توجه به محل های تزریق (۶ گره) در بازه های زمانی (۴ دوره) تعداد متغیرهای تصمیم در الگوریتم ژنتیک مدل GANetXL برابر ۲۴ عدد بود.



شکل ۲ - نمای شبکه مورد استفاده

۳ نتایج و بحث

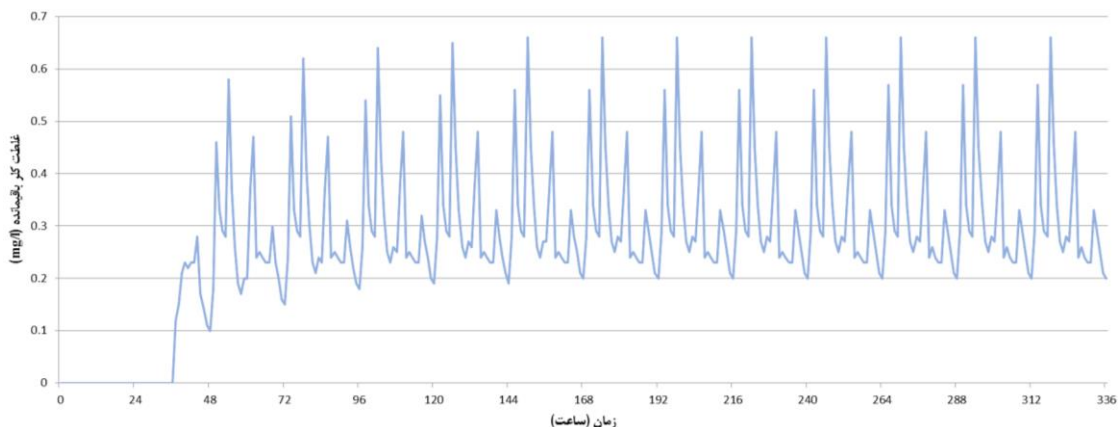
در این مقاله ۲۴ ساعت انتهایی بازه زمانی انتخابی تحلیل کیفی شبکه (۱۴ هفته) مورد بررسی و مبنای تحلیل کلر باقیمانده در شبکه و میزان تزریق در بوستر پمپ ها می باشد که مبنای این انتخاب رسیدن به حالت پایدار کیفی در شبکه از لحاظ مصرف کلر می باشد. با توجه به تابع هدف که کمینه کردن میزان تزریق کلر در شبکه با رعایت محدودیت های میزان کلر باقیمانده بود؛ کمترین میزان تزریق در ایستگاه ها صفر، بیشترین آن $57/776$ ، متوسط میزان تزریق $87/183$ و مجموع تزریق در طی یک شبانه روز برابر با $84/4412$ میلی گرم بر دقیقه می باشد. در مطالعه بوسلی و همکاران در حالتی که هر شش بوستر در شبکه وارد مدل خطی شدند، دز کل مصرفی برابر با 1120 گرم در روز بوده است [۶] و مطالعه موناوالی و کومار [۴] که این عدد برابر با ۶ و مطالعه تابش و همکاران [۵] برابر با $61/1370$ گرم در روز که در مقایسه با $4/412$ گرم در روز در این مطالعه، از اختلاف چشمگیری برخوردار است. موناوالی و کومار در مطالعه خود با جمعیت اولیه ۱۰۰ و تعداد نسل ۱۲۰۰ و تابش و همکاران با اندازه جمعیت ۷۰ و تعداد نسل ۶۰۰ به

کمینه کردن میزان کلر پرداخته؛ در حالیکه در مطالعه کنونی با کاهش تعداد نسل به ۲۰۰، میزان تزریق کمتر حاصل شد که نتایج در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای به دست آمده برای GA در شبکه مورد مطالعه

مقدار	پارامترهای الگوریتم ژنتیک
۱۰۰	اندازه جمعیت
۲۰۰	تعداد نسل
یکنواخت	نوع عملگر تقاطع
۰/۹۵	احتمال تقاطع
۰/۷	احتمال جهش

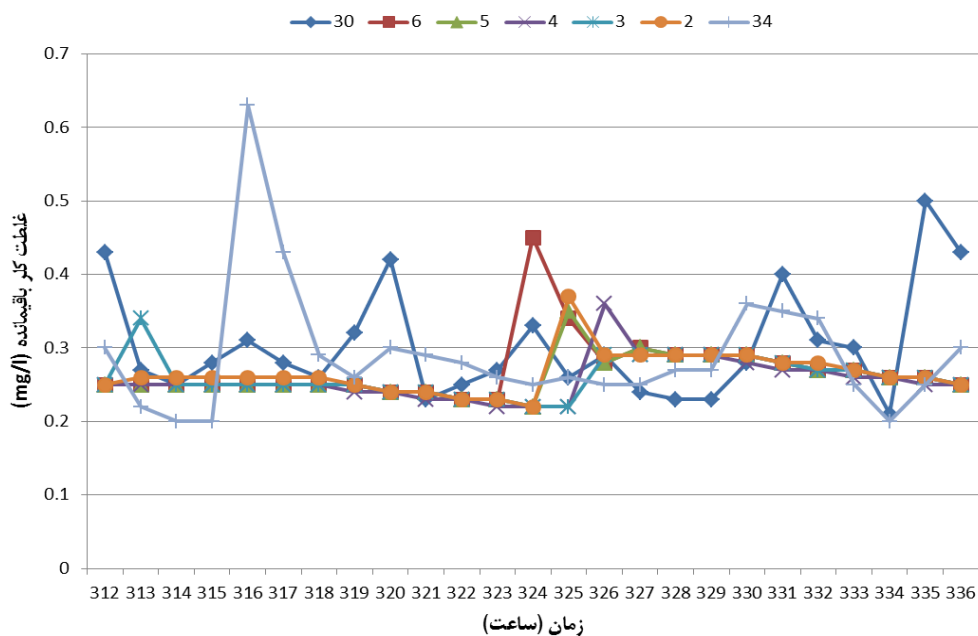
تمامی گره های کنترلی (همه گره های شبکه بجز گره هایی که بوستر بر روی آن ها نصب گردید) دارای کلر باقیمانده در بازه تعریف شده بودند به طوریکه حداقل غلظت در گره ها ۰/۲ ، حداکثر آن ۱/۵۷ و متوسط غلظت در گره ها ۰/۴۵ میلی گرم بر لیتر بوده است. شکل ۳ تغییرات غلظت کلر باقیمانده در گره ۳۶ برای کل بازه زمانی مورد مطالعه را نشان می دهد همانطور که مشاهده می شود در چند روز اول میزان کلر برابر با صفر و زیر ۰/۲ میلی گرم بر لیتر می باشد. شکل ۴ تغییرات را در بازه زمانی ۲۴ ساعته انتهایی گام زمانی برای دو گره ۳۵ و ۳۶ که جز گره های بحرانی از لحاظ میزان کلر باقیمانده در حد کمینه را نشان می دهد.



شکل ۳. تغییرات غلظت کلر باقیمانده در گره ۳۶ در کل بازه مورد مطالعه

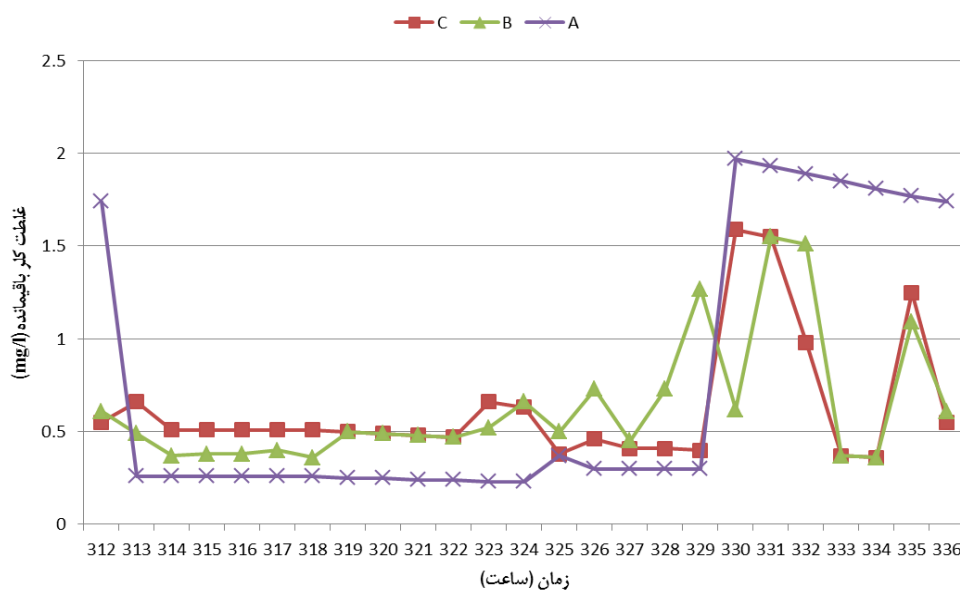
از آنجایی که بالاترین غلظت کلر باقیمانده در گره ها با حداکثر مجاز تعریف شده (۴ میلی گرم بر لیتر) اختلاف زیادی داشت؛ جستجوی گره های بحرانی تنها از نظر حداقل غلظت انجام شد. بدین منظور گره هایی که بیشترین ساعات را در طی یک شبانه روز (بیش از ۶۰ درصد شبانه روز) دارای غلظت بین ۰/۲ تا ۰/۳ میلی گرم بر لیتر بودند به عنوان گره بحرانی انتخاب شدند. با توجه به موقعیت گره های بحرانی در شبکه که در نقاط انتهایی قرار دارند، در صورت نبود بوستر قطعا دارای غلظتی پایینتر از حداقل مطلوب می باشند. گره های بحرانی که شامل گره های ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۳۰ و ۳۴ می باشند در مجموع ۲۰ درصد از کل گره های شبکه را تشکیل می دهند، که با درصد گره های کمتر از ۰/۳ میلی گرم بر لیتر در مطالعه مونوالی و کومار (۲۵٪) نزدیکی دارد. در مطالعه تابش و همکاران (۹۳/۱٪) از گره ها دارای غلظت بین ۰/۲ تا ۰/۵ بودند (۴-۵). شکل ۴ تغییرات غلظت کلر را در بازه ۲۴ ساعته انتهایی گام زمانی برای گره های بحرانی (گره های ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۳۰ و ۳۴) را نشان می دهد.

کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران
دانشگاه تهران، تهران
۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵



شکل ۴- تغییرات غلظت کلر باقیمانده در گروه های بحرانی

شکل ۵ به ترتیب تغییرات غلظت کلر باقیمانده در ۲۴ ساعت انتهایی بازه در گروه های تزریق A، B، C و را نشان می دهد.



شکل ۵- تغییرات غلظت کلر باقیمانده در ۲۴ ساعت انتهایی بازه زمانی تحلیل کیفی در گروه های A(آبی)، B(سبز) و C(قرمز)

۴. نتیجه گیری

کاربرد روش های نوین بهینه سازی در حوزه های مختلف مدیریتی و حساس مهندسی در جوامع امروز رشد بسیار چشمگیری داشته است. در گذشته روش های سعی و خطا برای تصمیم گیری بسیار وقت گیر و هزینه بر بوده و همچنین روش های آزمایشگاهی نیز با توجه به لزوم نمونه برداری از سراسر



شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور

کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵



شبکه بسیار پرهزینه، زمانبر و نیازمند نیروی انسانی زیادی بوده است اما روش های جدید مانند الگوریتم های بهینه سازی علاوه بر بررسی هزاران تصمیم ممکن برای یک مسئله سبب صرفه جویی در زمان و هزینه می شوند. در این مقاله با استفاده از الگوریتم ژنتیک تحت نرم افزار اکسل و با کمک مدل GANetXL، میزان کلر تزریقی در یک شبکه مرجع بر مبنای ارتباط پویا با مدل تحلیل هیدرولیکی و کیفی EPANET2 بهینه گردید. با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعه بر اساس تابع هدف، کمینه سازی میزان کلر مصرفی در عین رعایت میزان حداقل نیاز باقیمانده از آن در شبکه علاوه بر اثرات مثبت بر سلامتی از جنبه های مختلف مانند غلظت پایین تر محصولات جانبی گندزدایی و عدم دریافت کلر اضافی در آب مصرفی دارای آثار مثبت اقتصادی نیز می باشد.

۵. مراجع

1. Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories, EPA 822-R-06-013 (2006).
2. Drinking water -Physical and chemical specifications, ISIRI 1053, 5th. revision Institute of Standards and Industrial Research of Iran
3. صبوریان سررودی ص، اردشیر ع، بهزادیان ک، جلیل ثانی ف. مکان یابی بهینه ایستگاه های تزریق کلر با نرخ زوال غیر خطی در شبکه توزیع آب شهری. دو ماهنامه علمی - پژوهشی آب و فاضلاب. ۲۰۱۵؛ ۲۵(۶): ۷۷-۸۷.
4. Munavalli G, Kumar MM. Optimal scheduling of multiple chlorine sources in water distribution systems. Journal of water resources planning and management. 2003;129(6):493-504.
5. تابش م، آزادی ب، روزبهانی ع. بهینه سازی میزان تزریق کلر در شبکه های آبرسانی توسط الگوریتم ژنتیک. دو ماهنامه علمی - پژوهشی آب و فاضلاب. ۲۰۱۱؛ ۲۲(۱): ۲-۱۲.
6. Boccelli DL, Tryby ME, Uber JG, Rossman LA, Zierolf ML, Polycarpou MM. Optimal scheduling of booster disinfection in water distribution systems. Journal of water resources planning and management. 1998;124(2):99-111.
7. Rouhiainen C, Tade M, West G. Multi-objective genetic algorithm for optimal scheduling of chlorine dosing in water distribution systems. Advances in Water Supply Management, (ed C Maksimovic, D Butler & FA Memon), Balkema, Rotterdam, (2003a). 2003:459-69.
8. Ayvaz MT, Kentel E. Identification of the best booster station network for a water distribution system. Journal of water resources planning and management. 2014;141(5):04014076.
9. Rossman LA. EPANET 2: users manual. US Environmental Protection Agency Office of Research and Development National Risk Management Research Laboratory. 2000.
10. مقدم ع، علیزاده ا، ضیایی ع ن، فریدحسینی ع، هروی دف. افزایش سرعت همگرایی در بهینه سازی شبکه های توزیع آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک با آشفتنی سریع. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۱۳۹۳؛ ۲۸(۱): ۲۲-۳۴.
11. مقدم ع، منتصری م، رضایی ح. کاربرد الگوریتم های GA، SMPSO و HGAPSO در بهره برداری بهینه از مخازن سدها. آب و خاک. ۱۳۹۵؛ ۳۰(۴).
12. Savic DA, Walters GA. Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. Journal of water resources planning and management. 1997;123(2):67-77.
13. Salomons E, Goryashko A, Shamir U, Rao Z, Alvisi S. Optimizing the operation of the Haifa-A water-distribution network. Journal of Hydroinformatics. 2007;9(1):51-64.
14. Islam N. Water quality management in small to medium sized distribution networks: optimizing chlorine



کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵



disinfection strategies: University of British Columbia; 2015.

15. Islam N, Sadiq R, Rodriguez MJ. Optimizing booster chlorination in water distribution networks: a water quality index approach. Environmental monitoring and assessment. 2013;185(10):8035-50.
16. Deb K, Agrawal S, Pratap A, Meyarivan T, editors. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. International Conference on Parallel Problem Solving From Nature; 2000: Springer.
17. Piratla KR. Investigation of sustainable and reliable design alternatives for water distribution systems: Arizona State University; 2012.
18. Goverdhanam S. Decentralized water systems for sustainable and reliable supply. 2014.
19. Suja R, Deepthi N, Letha J. Multi-objective reliability based design of water distribution system. Journal of Civil Engineering (IEB). 2011;39(1):19-31.
20. Savić DA, Bicik J, Morley MS. A DSS generator for multiobjective optimisation of spreadsheet-based models. Environmental Modelling & Software. 2011;26(5):551-61.
21. Stanton A, Javadi A. An automated approach for an optimised least cost solution of reinforced concrete reservoirs using site parameters. Engineering Structures. 2014;60:32-40.
22. Gibbs M, Maier H, Dandy G. Comparison of genetic algorithm parameter setting methods for chlorine injection optimization. Journal of water resources planning and management. 2009;136(2):288-91.