مجله سلامت و محیط زیست، فصلنامه‌ی علمی پژوهشی
انجمن علمی بهداشت محیط ایران
دوره دهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۶، صفحات ۳۰۵ تا ۳۱۶

Available online: http://ijhe.tums.ac.ir

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی میزان تزریق کلر در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از مدل GANetXL

علیرضا مقدم[۱]، مهدی مختاری[۲]، رویا پیروی[۲،۳*]

۱- گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی یزد، یزد، ایران
۳- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی گناباد، گناباد، ایران

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۴/۲۸
تاریخ ویرایش: ۹۶/۰۷/۱۹
تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۷/۲۵
تاریخ انتشار: ۹۶/۰۹/۲۱

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی، کلر، الگوریتم ژنتیک

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:
rpeirovi@yahoo.com

چکیده

زمینه و هدف: گندزدایی یکی از مراحل تصفیه آب است که به منظور حفظ کیفیت میکروبی آب در شبکه توزیع انجام می‌شود. یکی از ترکیبات گندزدایی کلر است که طبق استانداردهای بهداشتی حفظ میزان باقیمانده آن بین حداقل و حداکثر در سراسر شبکه امری ضروریست. این مقاله با هدف بهینه‌سازی میزان تزریق کلر در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از مدل بهینه‌سازی GANetXL صورت گرفت.

روش بررسی: در این مقاله برای اولین بار با استفاده از یک افزونه بهینه‌سازی به نام GANetXL که از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌نماید میزان کلر تزریقی در یک شبکه مرجع بر مبنای ارتباط پویا با مدل تحلیل هیدرولیکی و کیفی EPANET2 در محیط نرم افزار Excel بهینه گردید. تابع هدف بر مبنای بهینه‌سازی تک هدفه به نحوی تدوین شد که مربع تفاضل بین غلظت کلر محاسبه شده و حداقل مجاز میزان کلر باقیمانده در شبکه برای هرکدام از گره‌های کنترل‌شونده برای تمامی گام‌های زمانی کمینه شود. متغیرهای تصمیم میزان بهینه دوزهای تزریق در محل بوسترها بود.

یافته‌ها: با کاهش تعداد نسل به ۲۰۰ کمترین میزان تزریق در ایستگاه‌ها صفر، بیشترین آن ۷۷۶/۵۷، متوسط میزان تزریق ۱۸۳/۸۷ و مجموع تزریق در طی یک شبانه روز برابر با ٤٤١٢/٨٤ mg/min حاصل شد. گره‌های بحرانی در مجموع ۲۰ درصد از کل گره‌های شبکه را تشکیل دادند.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج، کمینه‌سازی 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 است. نتایج این تحقیق می‌تواند به مدیریت شبکه آب آشامیدنی از لحاظ کیفیت آب در زمینه حفظ کلر باقیمانده و در نتیجه ارتقا سلامت جامعه و نیز به لحاظ اقتصادی کمک شایانی نماید.

Please cite this article as: Moghaddam A, Mokhtari M, Peirovi R. Optimization of chlorine injection dosage in water distribution networks using GANetXL model. Iranian Journal of Health and Environment. 2017;10(3):305-16.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2024-09-29]

مقدمه

گندزدایی یکی از مراحل اساسی تصفیه آب است که به منظور حفظ کیفیت میکروبی آب در شبکه‌های توزیع آب آشامیدنی انجام می‌شود. یکی از ترکیبات گندزدایی که به‌طور عمده استفاده می‌شود کلر است. طبق رهنمودهای بهداشتی حفظ میزان کلر باقیمانده بین حداقل (۰/۲ mg/L) و حداکثر (توصیه شده ٤ mg/L و مقدار کاربردی در ایران ٥ mg/L) در سراسر شبکه توزیع آب آشامیدنی امری ضروریست (۳-۱). میزان حداقل کلر باقیمانده به منظور کنترل رشد پاتوژن‌ها و میزان حداکثر آن برای کنترل مشکلات طعم و بو و تشکیل محصولات جانبی در نظر گرفته شده است. 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 لوله‌ها منجر به کاهش غلظت کلر در شبکه توزیع می‌شود که در اصطلاح زوال کلر نامیده می‌شود. بنابراین اگر تنها غلظت بالایی از کلر در تصفیه‌خانه تزریق شود نگهداری کلر باقیمانده در بازه تعریفی استاندارد مشکل است. دوزهای بالای کلر باقیمانده در شبکه توزیع آب آشامیدنی ممکن است منجر به تشکیل ترکیبات جانبی گندزدایی مانند تری هالومتان‌ها و هالواستیک‌اسیدها شود که ترکیبات سرطان‌زا و خطرناک هستند. تزریق کلر در تصفیه خانه و منابع آب آشامیدنی قبل از ورود به شبکه سبب بروز غلظت‌های بالا در گره‌های نزدیک به منابع و عدم وجود میزان کلر باقیمانده مناسب در گره‌های انتهایی شبکه در برخی از ساعات شبانه روز می‌شود. مطالعات مختلف اهمیت و تاثیر بوستر پمپ‌های کلرزنی در شبکه جهت حفظ کلر باقیمانده در تمامی نقاط شبکه را بیان کرده‌اند (۳، ٤). یکی از مسائل مهم در این زمینه یافتن مکان و میزان مناسب تزریق کلر است به نحوی که غلظت کلر باقیمانده در کلیه نقاط شبکه در بازه استاندارد بوده و علاوه بر آن هزینه‌های صرف شده در حداقل ممکن باشد (۳). جهت دستیابی به این هدف می‌توان با روش سعی و خطا به میزان تزریق مناسب رسید که البته روشی خسته‌کننده و بسیار وقت‌گیر بخصوص در شبکه‌های بزرگ است و نیز احتمال رسیدن به جواب بهینه بسیار پایین است (٤، ٥). از این رو لزوم بکارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی کاملا مشهود است. پژوهش‌های زیادی در این زمینه توسط محققین مختلف انجام شده است، مانند Boccelli و همکاران که با تابع هدف خطی و قرار دادن محدودیت‌های مناسب بمنظور نگهداشتن غلظت کلر در تمامی نقاط شبکه در بازه مورد نظر توسط تزریق در بوستر پمپ‌ها میزان کلر مصرفی تزریق شده را با مدل بهینه‌سازی خطی بهینه کردند (٦). Rouhiainen و همکاران 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 بهینه‌سازی را انجام داده‌اند (۷). Ayvaz و همکار از چارچوب تصمیم‌گیری فازی (Fuzzy Decision-Making Framework (DMF)) که با ترکیب الگوریتم ژنتیک و برنامه نویسی خطی (Genetic Algorithm-Linear Programming (GA-LP)) ادغام شده بود، برای تعیین بهترین مکان نصب بوستر در شبکه توزیع آب استفاده نمودند. مدل ترکیبی پیشنهادی GA-LP به‌طور همزمان دو هدف متناقض یعنی، به حداقل رساندن کل دوز کلر تزریقی و تعداد ایستگاه‌های بوستر و در همان زمان، نگهداشتن غلظت کلر باقیمانده در محدوده مورد نظر را بهینه می‌کرد. انتخاب بهترین گزینه از میان راه‌حل‌های بهینه شده توسط چارچوب تصمیم‌گیری فازی چند هدفه انجام شد (۸). در مطالعه کنونی برای اولین بار با استفاده از یک افزونه بهینه‌سازی به نام GANetXL که از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌نماید، 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 Excel بهینه گردید.

مواد و روش‌ها

۱- مدل دینامیکی کیفی شبکه

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

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2024-09-29]

(معادله ۱):

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -u_i \frac{\partial c_i}{\partial x} \pm R(c_i) \quad (۱)$$

که در آن:

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

$R(c_i)$ بیانگر نرخ واکنش است که برای گندزدایی با کلر توسط راسمن معین شده است (٤، ٥).

در انشعاباتی که جریان را از دو یا چند لوله دریافت می‌کنند اختلاط جریان به صورت آنی و کامل لحاظ می‌شود. بنابراین غلظت یک ماده در آب خروجی از انشعاب برابر با مجموع وزنی غلظت جریان لوله‌های ورودی به آن است. به‌عنوان مثال غلظت کلر ناشی از اختلاط کامل در گره i در زمان k به صورت زیر به دست می‌آید (معادله ۲):

$$Cn_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^{I} Q_i c_{i,(x=L_i)} + Q_E Q_E}{\sum_{i=1}^{I} Q_i + Q_E}; \qquad j = 1, \dots, N_n \quad (۲)$$

در معادله ۲، N_n تعداد کل گره‌های موجود در شبکه، I تعداد لوله‌های ورودی به گره j، L_i طول لوله i، Q_i دبی در لوله i بر حسب m^3/s، Q_E میزان جریان تغذیه شده از منبع خارجی به گره j بر حسب m^3/s و C_E غلظت کلر تزریقی به گره j بر حسب mg/L است. روش زمانمند لاگرانژی (Lagrangian time-based approach) شیوه‌ای مناسب برای محاسبه تغییرات غلظت کلر و بازه‌های زمانی کیفی است که مدل کیفی شبکه آب را به‌صورت عددی حل می‌کند (٤، ٥). این روش تلفیقی آنالیز دینامیکی کیفی آب، مدل‌های هیدرولیکی و کیفی مذکور را با هم ترکیب می‌کند.

۲- واکنش کیفی آب

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 می‌دهد و چگونگی وابستگی این نرخ به غلظت نیاز است. واکنش‌ها می‌توانند هم در حجم آب و هم با مواد موجود در جداره لوله رخ دهد. این نرم افزار قادر است واکنش‌هایی با مرتبه n ام سینتیکی را که در حجم جریان رخ می‌دهد مدلسازی نماید؛ که در این حالت سرعت واکنش با معادله ۳ بیان می‌شود:

$$R = K_b C^n \quad (۳)$$

در معادله ۳، R نرخ واکنش برحسب (جرم/حجم/زمان)، K_b ضریب نرخ واکنش جریان، C غلظت واکنش‌دهنده (جرم/حجم) و n درجه واکنش است.

ضریب واکنش جریان برای واکنش‌های تولید یک ماده (محصولات جانبی گندزدایی) مثبت و برای واکنش‌های تخریب (زوال کلر) منفی در نظر گرفته می‌شود. EPANET2 همچنین واکنش‌هایی که در آن محدوده غلظت برای تولید یا تخریب یک ماده وجود دارد را نیز می‌تواند شبیه‌سازی نماید در این موارد معادله به شکل زیر تغییر می‌کند (معادله ٤):

$$R = K_b(C_l - C)C^{(n-1)} \qquad for\ n > 0, K_b > 0 \quad (٤)$$

$$R = K_b(C - C_l)C^{(n-1)} \qquad for\ n > 0, K_b < 0$$

که در آن: C_L محدوده غلظت است.

نرخ واکنش‌های کیفی آب که در نزدیکی جداره لوله رخ می‌دهد به غلظت در جریان وابسته است و با معادله ۵ محاسبه می‌شود:

$$R = (A/V)K_w C^n \quad (۵)$$

در معادله ۵، K_w ضریب نرخ واکنش دیواره و A/V مساحت در واحد حجم داخل لوله است (۹).

در مدل EPANET2 تزریق کلر در ایستگاه‌های تزریق در شبکه‌های توزیع آب بر مبنای چهار روش غلظت (Concentration)، جریان – عبوری (Flow-paced booster)، تزریق جرمی (Mass injection source) یا نقطه تنظیمی (Set-point booster source) صورت می‌گیرد (۹). در تزریق بر مبنای غلظت، کلر با مقدار و الگوی زمانی مشخص حفظ می‌شود. در تزریق بر مبنای جریان– عبوری، غلظت مشخصی از کلر را در یک الگوی زمانی معین به غلظت ماقبل که ناشی از جریان ورودی از یک لوله به گره است اضافه می‌شود. در تزریق جرمی، همواره جریان جرمی

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2024-09-29]

مشـخصی بر حسب میلی گرم بر دقیقه به دبی که گره را ترک می‌کند، اضافه می‌شـود و در نهایت در تزریـق بر مبنای نقطه تنظیمـی، غلظت هر جریان خروجی از گره تا زمانی که غلظت از همـه جریان‌هـای ورودی به آن گره کمتـر از نقطه تنظیمی باشـد ثابت در نظر گرفته می‌شود. نقطه تنظیمی، غلظتی از کلر است که برای همه گره‌ها در همه زمان‌ها باید مطلوب باشد. در این مقاله از روش تزریق جرمی استفاده شده است.

۳- مدل بهینه سازی

۳-۱ الگوریتم ژنتیک

روش الگوریتم ژنتیک که از جدیدترین روش‌های برنامه‌ریزی است کـه با بهره‌گیری از نظریه تکامل و بقاء در علم زیست شناسی و استفاده از اصول علم ژنتیک به عنوان روشی موثر برای بهینه‌سازی ایجـاد شده است. الگوریتم ژنتیک، از تئوری‌هـای تکامل بیولوژیکی، از قبیل وراثت ژنتیک و اصل تناظر بقای داروین بهره می‌برد و روش‌هـای جستجوی کامـلا موازی را برای مسائل پیچیده بهینه‌سازی ارائه می‌نماید. مدل‌هـای مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای تحقق به اجزای زیر نیازمند است:

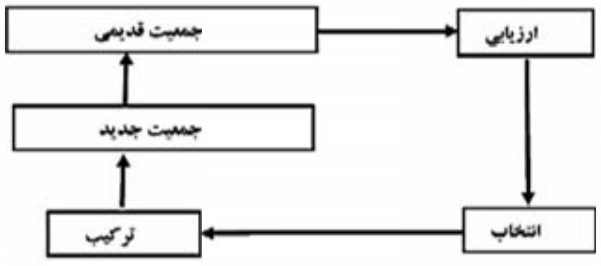
• جمعیت اولیه: یک مجموعه اولیه از اعضاء (کروموزم‌ها) که معمولا بصورت رشته‌هایی از ژن‌هـا (بیت‌هـا) کد می‌شوند و جواب‌هایی از مسئله را ارائه می‌نمایند.

• تابع ارزیابی: روشی برای اندازه‌گیری میزان برازندگی هر عضو (جواب) است.

• انتخاب: فرایندی است برای گزینش اعضای مناسب برای تولید و ترکیب مجدد.

• عملگرهای ژنتیک: که برای تولید اعضای جدید و تکامل تدریجی بکار می‌روند.

الگوریتم مذکور دارای چرخه‌ای مشابه شکل۱ است. اولین مرحله، ایجاد جمعیت اولیه از کروموزم‌ها بصورت تصادفی اسـت. سپس میزان برازندگی هر یک اعضا (کروموزم‌هـا) در جمعیت، ارزیابی و تعیین می‌گردد و مرحله انتخاب براساس میزان برازندگی اعضا انجام می‌پذیرد. یعنی تعدادی از برازنده‌ترین کروموزم‌هـا برای تولید مجدد انتخاب می‌گردند. در انتها عملگرهای ژنتیک (آمیـزش (Crossover) و جهش (Mutation)) بـر روی اعضای انتخاب شده عمل کـرده و کدهای ژنتیک آنها را اصلاح و ترکیب می‌کنند. یکبار انجام این چرخه یک نسل نامیده می‌شود و تا رسیدن به شرط توقف حلقه، مراحل فوق مرتبا تکرار می‌گردند (شکل ۱) (۱۰, ۱۱).



شکل ۱- چرخه الگوریتم ژنتیک

کارایـی الگوریتم ژنتیـک (Genetic Algorithm (GA)) به‌عنوان یک روش بهینه‌سازی بسیـار قدرتمند در حل مسائل متعـدد چندجمله‌ای به‌خصوص مسائل مرتبـط با سیستم‌های توزیـع آب (Water Distribution System (WDS)) اثبات شـده است. GA اولیـن بار توسـط Savic و همکار (۱۹۹۷) در برنامه‌ریزی استراتژیـک سیستم‌های توزیع آب از قبیـل مسائل طراحی، نوسازی و کالیبراسیـون بکار گرفته شد (۱۲). علاوه بر این Salomons و همکاران (۲۰۰۷) از GA برای کنترل زمان واقعی WDS استفاده کردند (۱۳). الگوریتم ژنتیـک به‌طور وسیعی توسط محققین در زمینه مسائل مختلف شبکه توزیع آب استفاده شده است (۱۰، ۱۱، ۱٤، ۱۵).

۳-۲ معرفی مدل GANetXL

Deb و همکـاران (۲۰۰٦) یک ابزار بهینه‌سازی در محیط نرم افـزار Excel به نام GANetXL توسعـه دادند که به طیف وسیعـی از کاربرانـی که هیـچ تجربه قبلـی در برنامه نویسی ندارنـد برای حل مسائـل با استفـاده از GA کمک می‌نماید. در طـی سال‌های گذشتـه GANetXL در حال توسعه بوده و امکانـات آن افزایـش یافتـه است تـا نیازهـای محققین را برآورده سازد و آخرین نسخه آن از الگوریتم ژنتیک تک هدفه و چنـد هدفـه پشتیبانی می‌کند و به کاربـران کم تجربه اجازه

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2024-09-29]

می‌دهد تا یـک مسئله بهینه‌سازی را تعریف، پیکربندی و اجرا نماینـد و نتایـج آن را در صفحات مجزا مشاهـده کنند (۱۶). پارامترهای الگوریتم‌های فـوق به آسانی می‌تواند با استفاده از یک پنجـره گرافیکی که مرحله به مرحله کاربر مبتدی را برای انتخاب گزینه‌هـای مربوطه هدایت می‌کنـد تعیین شود. یکی از خصوصیـات GANetXL توانایـی ارتباط آسان آن با نرم افزارهای شبیه‌سازی است کـه می‌تواند برازندگی راه‌حل‌ها را بـه کمک این نـرم افزارها ارزیابی نمایـد. همچنین این امکان وجـود دارد تابعـی که در محیـط ویژوال بیسیـک (Visual Basic) توسط کاربـر تعریف شده است برای ارزیابی توسط GANetXL فراخوانی شود شکـل ۲ قسمت‌هایی از محیط کـاری GANetXL را نمایـش می‌دهنـد. GANetXL با تحلیل‌گـر هیدرولیکی شبکه EPANET2 و مدل‌های توسعه یافتـه در محیـط برنامه نویسـی ویژوال بیسیـک که بصورت توابـع کتابخانـه‌ای پویـا (Dynamic-Link Libraries (DLL)) هستنـد با موفقیـت لینک می‌گـردد (۹). Piratla (۱۷) و Goverdhanam (۱۸) و سایر محققین (۲۱-۱۹) در مطالعات خود از GANetXL استفاده نمودند.

۳-۳ تابع هدف

همانطـور که در مقدمه بیان شد همواره میزان کلر باقیمانده در شبکه توزیع آب باید در بازه استاندارد قرار گیرد. تجاوز غلظت از حداکثـر و نزول از حداقل استاندارد دارای آثار زیانباریست بدین منظور در ایـن مقاله تابع هدف بر مبنای بهینه‌سازی تک هدفـه به نحـوی تدوین شد که مربع تفاضـل بین غلظت کلر محاسبه شده از حداقل مجاز میزان کلر باقیمانده در شبکه برای هر کدام از گره‌های کنتـرل شونده برای تمامی گام‌های زمانی مـورد نظر کمینه شود. متغیرهای تصمیـم میزان بهینه دوزهای مختلف تزریق در مکان‌های نصب بوسترها است. بنابراین تابع هدف در این مطالعه ماننـد مطالعه کومار(Kumar) به شکل زیر نوشته شد (معادله ۶):

(۶)

$$
\begin{aligned}
&minimize \quad E = \sum_{j=1}^{M} \sum_{k=1}^{N_j} \left[Cn_{jk} - C_{min}\right]^2 \\
&subject\ to \\
&Cn_{jk} \geq C_{min} \\
&Cn_{jk} \leq C_{max} \\
&j = 1 \ldots, M; \quad k = 1, \ldots, N_j
\end{aligned}
$$

M= تعـداد گره‌های کنترل‌شونده، N_j =تعـداد گام‌های زمانی در گـره j درون بازه کنترل، C_{min} و C_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر غلظت مجـاز کلر (mg/L) در شبکه هستند. در ادامه تابع هدف همراه با اعمال قیدهای ذکر شده (حداقل و حداکثر غلظت کلر) با کمک مـدل دینامیکی کیفی آب EPANET2

شکل ۲- نمایی از مدل GANetXL افزوده شده به نرم افزار Excel

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2024-09-29]

و ارتبـاط پویای آن با GANetXL در محیط ویژوال بیسیک محاسبـه می‌شـود. بدیـن منظور ابتـدا هر یـک از عضوهای جمعیت (متغیرهای تصمیم) ایجاد شده توسط GA موجود در GANetXL برای تحلیـل وارد مدل EPANET2 می‌شود و سپس مقادیر غلظت کلـر باقیمانده در گره‌های کنترل‌شونده شبکـه وارد تابع هدف می‌گردد. سپس تحلیل GA برای تولید نسل بعدی براساس بهترین نتایج حاصله از تابع هدف محاسبه می‌گردد و عضوهای جدید جمعیت در GA که همان دوزهای تزریق در بوسترها هستند به EPANET2 وارد می‌شود و این عمل تا یافتن جواب بهینه بطور مداوم تکرار می‌شود.

۳-٤ تابع جریمه

در روش الگوریتـم ژنتیـک، قیدها به شکـل توابع جریمه در محاسبـات تابع هدف اعمال می‌شوند. تابع جریمه افزوده شده به تابع هدف براساس معادله ۷ تعریف می‌شود:

(۷)

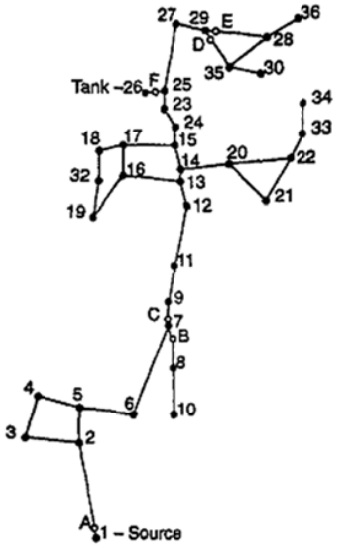
$$E = \sum_{j=1}^{M}\sum_{k=1}^{N_j}\left[Cn_{jk} - C_{min}\right]^2 + \sum_{j=1}^{M}\sum_{k=1}^{N_j} P_1\left[\max(0, C_{min} - Cn_{jk})\right]^2 \sum_{j=1}^{M}\sum_{k=1}^{N_j} P_2\left[\max(0, Cn_{jk} - C_{max})\right]^2$$

که در آن: P_1 و P_2 فاکتورهای جریمه برای تجاوز از حداقل و حداکثـر کلر باقیمانده در شبکه هستند که در این مقاله برابر با ۱۰۰۰۰۰۰ هستنـد. از آنجایی‌که تابع هدف از نوع کمینه کردن است بالاترین برازندگـی زمانی حاصل می‌شود که تابع هدف در پایین‌ترین مقدار باشد.

٤- کاربرد مدل

در ایـن مقاله عملکرد مدل GANetXL در بهینه‌سازی میزان تزریـق کلر بـر روی شبکه توزیع آب واقـع در منطقه جنوب ایالت کانکتیکوت مرکزی در ناحیه Cherry Hill/Brushy در شهـر برندفورد مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۳ نمای این شبکه و ایستگاه‌های بوستـر پمپ‌های تزریق کلر را به ترتیب بـا حروف A تا F نشـان می‌دهد. سایر اطلاعـات این شبکه از قبیـل مشخصات هیدرولیکی و موقعیـت بوستر پمپ های تزریق کلر در مطالعات قبلی مانند Boccelli و همکاران (٦)، Munavalli و همکـار (٤) و Gibbs و همکاران (۲۲) بیان شده اسـت. ضریب واکنش جریان ۰/۵- بر روز و جداره لوله صفر متر در روز در نظر گرفته شد.

در انتخـاب محل بوسترها سعی شده اسـت تا هر یک از آنها بتواننـد غلظت کلـر را در نقاط دور از دسترـس شبکه تامین کنند. تزریـق در این محل‌ها به صـورت جرمی و در بازه ۰ تا ۸۰۰ mg/min و با چهار الگوی تزریق متفاوت در ۲٤ ساعت شبانـه روز صـورت می‌گرفت. بنابراین بـا توجه به محل‌های تزریـق (٦ گره) در بازه‌های زمانـی (٤ دوره) تعداد متغیرهای تصمیم در الگوریتـم ژنتیک مدل GANetXL برابر ۲٤ عدد بـود. کل زمـان در نظر گرفته شـده برای اجـرای مدل کیفی EPANET2، ١٤ روز در نظر گرفته شد.



شکل ۳- نمای شبکه مورد استفاده

یافته‌ها

در ایـن مقاله ۲٤ ساعت انتهایی بازه زمانی انتخابی تحلیل کیفی شبکـه (١٤ روز) مورد بررسی و مبنـای تحلیل کلر باقیمانده در شبکه و میزان تزریق در بوستر پمپ‌ها است که مبنای این انتخاب رسیدن به حالت پایدار کیفی در شبکه از لحاظ مصرف کلر است. جدول ۱ مقادیر تزریق بهینه بدست آمده توسط GANetXL در

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2024-09-29]

شش ایستگاه تزریق کلر (بوستر) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود برای ایستگاه‌هـــا صفر کمتریـــن و ۷۷۶/۵۷ mg/min بیشترین میزان تزریق بوده است. در جدول ۲ پارامترهای الگوریتم ژنتیک برای شبکه مورد مطالعه بیان شده است.

جدول ۱- میزان‌های بهینه شده تزریق کلر

زمان	نام ایستگاه					
	A	B	C	D	E	F
۱	٦٥٠/٠٣	٦/٣١	٦٠٠/١٣	٠/٠٢	٠/٠١	٧٤٨/٥١
۲	٦٥٠/٠٣	٦/٣١	٦٠٠/١٣	٠/٠٢	٠/٠١	٧٤٨/٥١
۳	٦٥٠/٠٣	٦/٣١	٦٠٠/١٣	٠/٠٢	٠/٠١	٧٤٨/٥١
٤	٦٥٠/٠٣	٦/٣١	٦٠٠/١٣	٠/٠٢	٠/٠١	٧٤٨/٥١
٥	٦٥٠/٠٣	٦/٣١	٦٠٠/١٣	٠/٠٢	٠/٠١	٧٤٨/٥١
٦	٦٥٠/٠٣	٦/٣١	٦٠٠/١٣	٠/٠٢	٠/٠١	٧٤٨/٥١
۷	٣٨/٤٤	٠	٠/١٣	٠	٠/٠١	٢٧٣/٤٥
۸	٣٨/٤٤	٠	٠/١٣	٠	٠/٠١	٢٧٣/٤٥
۹	٣٨/٤٤	٠	٠/١٣	٠	٠/٠١	٢٧٣/٤٥
۱۰	٣٨/٤٤	٠	٠/١٣	٠	٠/٠١	٢٧٣/٤٥
۱۱	٣٨/٤٤	٠	٠/١٣	٠	٠/٠١	٢٧٣/٤٥
۱۲	٣٨/٤٤	٠	٠/١٣	٠	٠/٠١	٢٧٣/٤٥
۱۳	٧٧٦/٥٧	١٢/٥١	٣٠٠/٠٩	٠/٨٤	٠/١	٤٠٠/٢٦
١٤	٧٧٦/٥٧	١٢/٥١	٣٠٠/٠٩	٠/٨٤	٠/١	٤٠٠/٢٦
۱۵	٧٧٦/٥٧	١٢/٥١	٣٠٠/٠٩	٠/٨٤	٠/١	٤٠٠/٢٦
١٦	٧٧٦/٥٧	١٢/٥١	٣٠٠/٠٩	٠/٨٤	٠/١	٤٠٠/٢٦
۱۷	٧٧٦/٥٧	١٢/٥١	٣٠٠/٠٩	٠/٨٤	٠/١	٤٠٠/٢٦
۱۸	٧٧٦/٥٧	١٢/٥١	٣٠٠/٠٩	٠/٨٤	٠/١	٤٠٠/٢٦
۱۹	٢٠٣/٢٣	٠/٠٥	٠/٠١	٠/٥٧	١/٥٧	٤٠٠
۲۰	٢٠٣/٢٣	٠/٠٥	٠/٠١	٠/٥٧	١/٥٧	٤٠٠
۲۱	٢٠٣/٢٣	٠/٠٥	٠/٠١	٠/٥٧	١/٥٧	٤٠٠
۲۲	٢٠٣/٢٣	٠/٠٥	٠/٠١	٠/٥٧	١/٥٧	٤٠٠
۲۳	٢٠٣/٢٣	٠/٠٥	٠/٠١	٠/٥٧	١/٥٧	٤٠٠
٢٤	٢٠٣/٢٣	٠/٠٥	٠/٠١	٠/٥٧	١/٥٧	٤٠٠

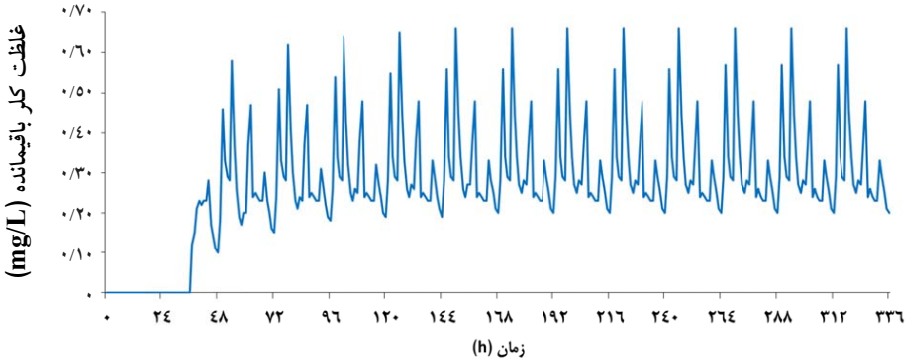
[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2024-09-29]

جدول ۲- پارامترهای به‌دست آمده برای GA در شبکه مورد مطالعه

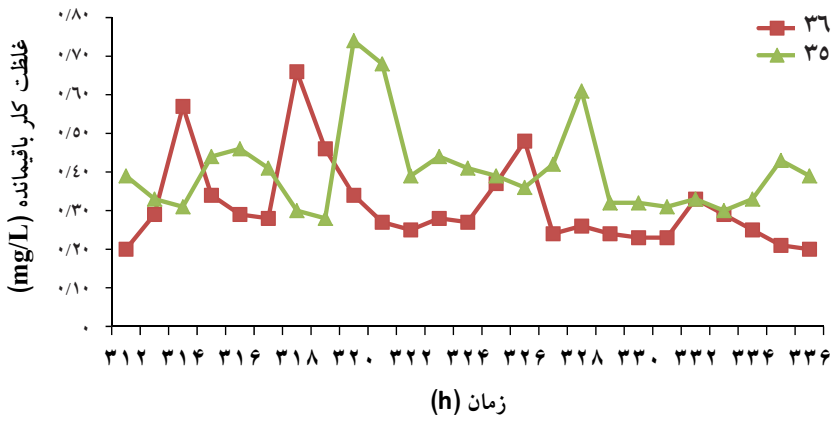
پارامترهای الگوریتم ژنتیک	اندازه جمعیت	تعداد نسل	نوع عملگر تقاطع	احتمال تقاطع	احتمال جهش
مقدار	۱۰۰	۲۰۰	یکنواخت	۰/۹۵	۰/۷

میزان تزریق‌های بهینه شده کلر در ایستگاه‌های تزریق توسط الگوریتم ژنتیک وارد EPANET2 و میزان کلر باقیمانده در گره‌ها محاسبه گردید. تمامی گره‌های کنترلی (همه گره‌های شبکه بجز گره‌هایی که بوستر بر روی آنها نصب گردید) دارای کلر باقیمانده در بازه تعریف شده بودند به‌طوری‌که حداقل غلظت در گره‌ها ۰/۲، حداکثر آن ۱/۵۷ و متوسط غلظت در گره‌ها ۰/٤٥ mg/L بوده است. نمودار ۱ تغییرات غلظت کلر باقیمانده در گره ۳٦ در کل بازه مورد مطالعه را نشان می‌دهد همانطور که مشاهده می‌شود در چند روز اول میزان کلر برابر با صفر و زیر ۰/۲ است. نمودار ۲ تغییرات را در بازه زمانی ۲٤ ساعته در دو گره ۳۵ و ۳٦ نشان می‌دهد.

از آنجایی‌که بالاترین غلظت کلر باقیمانده در گره‌ها با حداکثر مجاز تعریف شده (٤ mg/L) اختلاف زیادی داشت؛ جستجوی گره‌های بحرانی تنها از نظر حداقل غلظت انجام شد. بدین منظور گره‌هایی که بیشترین ساعات را در طی یک شبانه روز (بیش از ٦۰ درصد شبانه روز) دارای غلظت بین



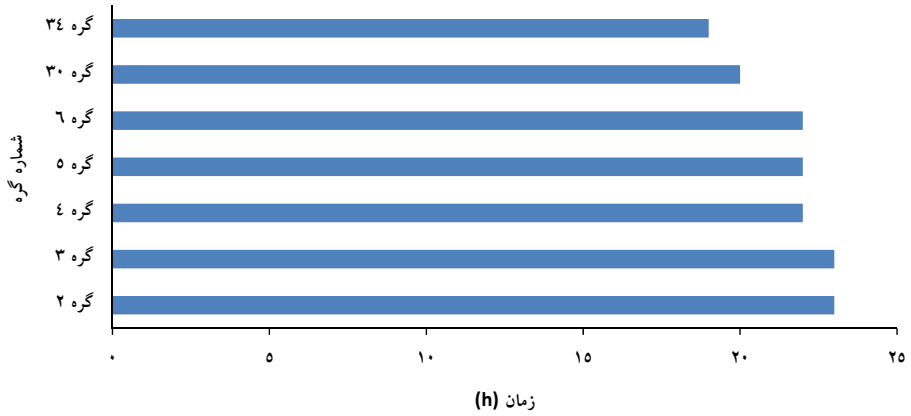
نمودار ۱- تغییرات غلظت کلر باقیمانده در گره ۳٦ در کل بازه مورد مطالعه



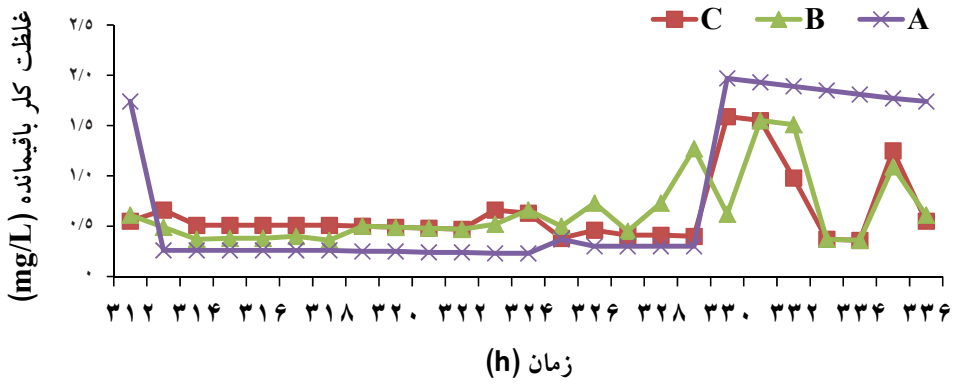
نمودار ۲- تغییرات غلظت کلر باقیمانده در دو گره ۳۵ (منحنی سبز) و ۳٦ (منحنی قرمز)

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2024-09-29]

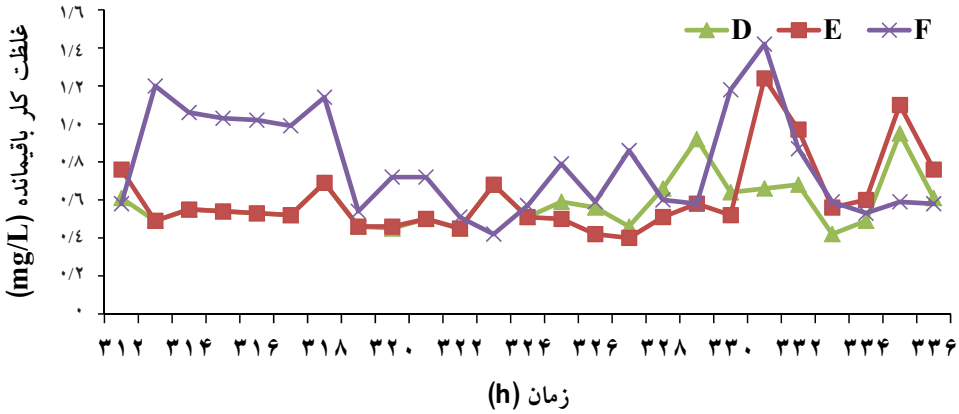
۰/۲ تا ۰/۳ mg/L بودند به‌عنوان گره بحرانی انتخاب شدند. با توجه به موقعیت گره‌های بحرانی در شبکه که در نقاط انتهایی قرار دارنـــد، در صورت نبود بوستر قطعا دارای غلظتی پایین‌تر از حداقـــل مطلوب هستند (نمودار ۳). نمودار ٤ و ٥ به ترتیب تغییـــرات غلظت کلـــر باقیمانده در ٢٤ ساعـــت انتهایی بازه در گره‌های تزریق A-B-C و D-E-F را نشان می‌دهد.



نمودار ۳- گره‌های بحرانی در شبکه مورد مطالعه



نمودار ٤- تغییرات غلظت کلر باقیمانده در ٢٤ ساعت انتهایی بازه زمانی تحلیل کیفی در گره‌های A، B و C



نمودار ٥- تغییرات غلظت کلر باقیمانده در ٢٤ ساعت انتهایی بازه زمانی تحلیل کیفی در گره‌های D، E و F

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2024-09-29]

بحث

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود با توجه به تابع هدف که کمینه کردن میزان تزریق کلر در شبکه با رعایت محدودیت‌های میزان کلر باقیمانده بود؛ کمترین میزان تزریق در ایستگاه‌ها صفر، بیشترین آن ۷۷٦/۵۷، متوسط میـزان تزریق ۱۸۳/۸۷ و مجموع تزریـق در طـی یک شبانـه روز برابر بـا ٤٤۱۲/۸٤ mg/min اسـت. در مطالعـه Boccelli و همکـاران در حالتـی که هر شـش بوستر در شبکه وارد مدل خطـی شدند، دوز کل مصرفی برابـر با ۱۱۲۰ g/day بوده اسـت (٦) و مطالعه Munavalli و همکـار (٤) که ایـن عدد برابر با ٦ و مطالعـه Tabesh (۵) برابـر با ۱۳۷۰/٦۱ g/day که در مقایسه بـا ٤/٤۱۲ g/day در این مطالعه، از اختلاف چشمگیری برخوردار است. البته لازم به ذکر است که Boccelli با نـرم افزار EPANET 1.0مطالعه خـود را انجام داده درحالی‌کـه مطالعه کنونی و دو مطالعه دیگر بـا نسخه ۲ ایـن نرم افزار انجام شده‌انـد و مبنای حل معادلات کیفی در این دو نسخه متفـاوت است. Munavalli و همکار در مطالعـه خود با جمعیـت اولیه ۱۰۰ و تعـداد نسل ۱۲۰۰ و Tabesh و همکاران با اندازه جمعیت ۷۰ و تعداد نسل ٦۰۰ به کمینه کردن میزان کلر پرداختند؛ در حالی‌که در مطالعه کنونی با کاهش تعداد نسل به ۲۰۰، میزان تزریق کمتر حاصل شد (جدول ۲). در قسمت نتایج ملاک انتخاب گره‌های بحرانی بیان و محل آنها در شبکه با توجه به نمودار ۳ مشخص گردید در این مطالعه گره‌های بحرانـی در مجموع ۲۰ درصد از کـل گره‌های شبکه را تشکیـل می‌دهند، که با درصـد گره‌های کمتر از ۰/۳ mg/L در مطالعـه Munavalli و همکـار (۲۵ درصد) نزدیکی دارد. در مطالعـه Tabesh و همکاران ۹۳/۱ درصـد از گره‌ها دارای غلظت بیـن ۰/۲ تا ۰/۵ بودنـد (٤، ۵). کاربرد روش‌های نوین بهینه‌سازی در حوزه‌هـای مختلف مدیریتی و حساس مهندسی در جوامع امروز رشد بسیار چشمگیری داشته است. تحلیل کیفی شبکه‌های توزیع آب یکی از حیطه‌های مهم در مدیریت شهری است کـه در آن تصمیم‌گیری صحیح در مـدت زمان کم امری بسیار دشوار است چه بسا که یک تصمیم اشتباه هزینه‌های جانی و مالی جبران ناپذیری بر پیکره یک جامعه شهری وارد نماید. در گذشته روش‌های سعی و خطا برای تصمیم‌گیری بسیار وقت‌گیر و هزینـه بر بوده و همچنین روش‌های آزمایشگاهی نیز با توجه بـه لزوم نمونه‌برداری از سراسر شبکـه بسیار پرهزینه، زمانبر و نیازمند نیروی انسانی زیادی بوده است اما روش‌های جدید مانند الگوریتم‌های بهینه‌سازی علاوه بر بررسی هزاران تصمیم ممکن است برای یک مسئله سبب صرفه جویی در زمان و هزینه شوند.

نتیجه‌گیری

بـا توجه به نتایج به‌دست آمـده از مطالعه براساس تابع هدف، کمینه‌سـازی میزان کلر مصرفی در عیـن رعایت میزان حداقل نیـاز باقیمانده از آن در شبکه علاوه بر اثرات مثبت بر سلامتی از جنبه‌هـای مختلف مانند غلظـت پایین‌تر محصولات جانبی گندزدایـی و عدم دریافت کلر اضافـی در آب مصرفی دارای آثار مثبـت اقتصادی نیز است؛ بدین ترتیب که با کاهش میزان کلر مصرفـی ناشی از بهینه‌کردن غلظـت آن در سراسر شبکه طی چند سـال هزینه‌های نصب بوسترهـا جبران خواهد شد. نتایـج این تحقیق می‌تواند بـه مدیریت شبکه آب آشامیدنی از لحاظ کیفیت آب در زمینه حفظ کلر باقیمانده و در نتیجه ارتقا سلامت جامعه و نیز به لحاظ اقتصادی کمک شایانی نماید.

منابع

1. USEPA. Drinking water standards and health advisories. Washington DC: United States Environmental Protection Agency; 2006. Report No.: EPA 822-R-06-013.
2. Shargil D, Gerstl Z, Fine P, Nitsan I, Kurtzman D. Impact of biosolids and wastewater effluent application to agricultural land on steroidal hormone content in lettuce plants. Science of the Total Environment. 2015;505:357-66.
3. Sarroodi SS, Ardeshir A, Behzadian K, Sani FJ. Optimal site location for booster stations of chlorine injection with non-linear decay rate in water distribution system. Journal of Water and Wastewater. 2015;25(6):77-87 (in Persian).

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2024-09-29]

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 (in Persian).
5. Tabesh M, Azadi B, Rouzbahani A. Optimization of chlorine injection dosage in water distribution networks using a genetic algorithm. Journal of Water and Wastewater. 2011;22(1):2-12 (in Persian).
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. Maksimovic D, Butler D, Memon FA. Advances in Water Supply Management. Rotterdam: CRC Press; 2003.
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. Washington DC: United States Environmental Protection Agency; 2000.
10. Moghaddam A, Alizadeh A, Ziaei A, Faridhosseini A, Falah HD. Convergence Rate Improvement in Water Distribution Network Optimization Using Fast Messy Genetic Algorithm (FMGA). Journal of Water and Soil. 2014;28(1):22-34 (in Persian).
11. Moghaddam A, Montaseri M, Rezaei H. The application of GA, SMPSO and HGAPSO in optimal reservoirs operation. Journal of Water and Soil. 2016;30(4):1102-13 (in Persian).
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 disinfection strategies [dissertation]. Vancouver: 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. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. International Conference on Parallel Problem Solving From Nature; 2000. New York: Springer; 2000.
17. Piratla KR. Investigation of sustainable and reliable design alternatives for water distribution systems [dissertation]. Arizona: 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. 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.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2024-09-29]

Available online: http://ijhe.tums.ac.ir

Original Article

Optimization of chlorine injection dosage in water distribution networks using GANetXL model

A Moghaddam[1], M Mokhtari[2], R Peirovi[2,3,*]

1- Department of Water Engineering, College of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

2- Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran

3- Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Gonabad University of Medical Sciences, Gonabad, Iran

ARTICLE INFORMATION:

Received: 19 July 2017
Revised: 11 October 2017
Accepted: 17 October 2017
Published: 12 December 2017

Key words: Optimization, Chlorine, Genetic algorithm

***Corresponding Author:**
rpeirovi@yahoo.com

ABSTRACT

Background and Objective: one of the steps in water treatment to protect microbial quality of water network is disinfection. Chlorine is one of disinfectants. It is necessary to maintain Free Residual Chlorine (FRC) between minimum and maximum throughout the distribution system in accordance to health standards. This study was aimed to optimize Chlorine dosage in water distribution networks using GANetXL model.

Materials and Methods: In this paper for the first time using a add-in called GANetXL optimization that uses a genetic algorithm, the Chlorine injection was optimized in a reference network based on dynamic connection to EPANET2 hydraulic and qualitative analysis in Excel software. The objective function is formulated such that the squared difference between computed chlorine concentrations and the minimum residual concentration at all monitoring nodes at all times is minimum. The decision variables were the optimized injection dose at boosters' locations.

Results: The injection rate was obtained (minimum: 0, average: 183.87, maximum: 776.57 and total 4412.84 mg/min per a day) at the station as the number of generation was reduced to 200. Critical nodes formed 20% of the total nodes of network.

Conclusion: Based on the results, minimization of Chlorine whilst comply with FRC standard has both health and economical effects. The results can help the water distribution system management in terms of water quality (by maintaining FRC), health promotion and monetary.

Please cite this article as: Moghaddam A, Mokhtari M, Peirovi R. Optimization of chlorine injection dosage in water distribution networks using GANetXL model. Iranian Journal of Health and Environment. 2017;10(3):305-16.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2024-09-29]