



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

مقاله پژوهشی

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

علیرضا مقدم<sup>۱</sup>، مهدی مختاری<sup>۲</sup>، رویا پیروی<sup>۳\*</sup>

- 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: 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.

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

**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 هر کدام از گره‌های کنترل‌شونده برای تمامی گام‌های زمانی کمینه شود. متغیرهای تصمیم میزان بهینه دوزهای تزریق در محل بوسترها بود.

**واژگان کلیدی:** بهینه‌سازی، کلر، الگوریتم ژنتیک

**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 ۴۴۱۲/۸۴ 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.

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:  
rpeirovi@yahoo.com

## 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 ( $0.2 \text{ mg/L}$ ) و حداکثر (توصیه شده  $4 \text{ mg/L}$  و مقدار کاربردی در ایران  $5 \text{ mg/L}$ ) 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 تصفیه‌خانه 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، ۴). 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 (۴، ۵). از

این رو لزوم بکارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی کاملاً 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 (۶). 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

نماید؛ که در این حالت سرعت واکنش با معادله ۳ بیان می‌شود:

$$R = K_b C^n \quad (3)$$

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 ۴):

$$R = K_b (C_l - C) C^{(n-1)} \quad \text{for } n > 0, K_b > 0 \quad (4)$$

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

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:

$$R = (A/V) K_w C^n \quad (5)$$

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

(معادله ۱):

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

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 (۴، ۵).

در انشعاباتی که جریان را از دو یا چند لوله دریافت می‌کند اختلاط جریان به صورت آبی 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):

$$C_{njk} = \frac{\sum_{i=1}^I Q_i C_{i(x=L_i)} + Q_E Q_E}{\sum_{i=1}^I Q_i + Q_E}; \quad j = 1, \dots, N_n \quad (2)$$

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 (۴، ۵). 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 نرخ کیفی 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  $n$  سینتیکی را که در حجم جریان رخ می‌دهد مدل‌سازی

(Mutation)) بر روی اعضای انتخاب شده عمل کرده 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 مرتباً تکرار می‌گردند (شکل ۱) (۱۰، ۱۱).



شکل ۱- چرخه الگوریتم ژنتیک

کارایی الگوریتم ژنتیک ((Genetic Algorithm (GA)) به‌عنوان یک روش بهینه‌سازی بسیار قدرتمند در حل مسائل متعدد چندجمله‌ای به‌خصوص مسائل مرتبط با سیستم‌های توزیع آب ((Water Distribution System (WDS)) اثبات شده است. GA اولین بار توسط Savic و همکار (۱۹۹۷) در برنامه‌ریزی استراتژیک سیستم‌های توزیع آب از قبیل مسائل طراحی، نوسازی و کالیبراسیون بکار گرفته شد (۱۲). علاوه بر این Salomons و همکاران (۲۰۰۷) از GA برای کنترل زمان واقعی WDS استفاده کردند (۱۳). الگوریتم ژنتیک به‌طور وسیعی توسط محققین در زمینه مسائل مختلف شبکه توزیع آب استفاده شده است (۱۰، ۱۱، ۱۴، ۱۵).

### ۳-۲ معرفی مدل GANetXL

Deb و همکاران (۲۰۰۶) یک ابزار بهینه‌سازی در محیط نرم افزار Excel 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 می‌نماید. در طی سال‌های 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 پشتیبانی می‌کند و به کاربران کم تجربه اجازه

مشخصی بر حسب میلی گرم بر دقیقه به دبی که گره را ترک می‌کند، اضافه می‌شود و در نهایت در تزریق بر مبنای نقطه تنظیمی، غلظت هر جریان خروجی از گره تا زمانی که غلظت از همه جریان‌های ورودی به آن گره کمتر از نقطه تنظیمی باشد 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.

### ۳-۳ مدل بهینه‌سازی

#### ۳-۱ الگوریتم ژنتیک

روش الگوریتم ژنتیک که از جدیدترین روش‌های برنامه‌ریزی است که با بهره‌گیری از نظریه تکامل و بقا در علم زیست‌شناسی و استفاده از اصول علم ژنتیک به عنوان روشی موثر برای بهینه‌سازی ایجاد شده است. الگوریتم ژنتیک، از تئوری‌های تکامل بیولوژیکی، از قبیل وراثت ژنتیک و اصل تناظر بقای داروین بهره می‌برد و روش‌های جستجوی کاملاً موازی را برای مسائل پیچیده بهینه‌سازی ارائه می‌نماید. مدل‌های مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای تحقق به اجزای زیر نیازمند است:

- جمعیت اولیه: یک مجموعه اولیه از اعضا (کروموزم‌ها) که معمولاً بصورت رشته‌هایی از ژن‌ها (بیت‌ها) 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 شکل ۱ است. اولین مرحله، ایجاد جمعیت اولیه از کروموزم‌ها بصورت تصادفی است. سپس میزان برازندگی هر یک اعضا (کروموزم‌ها) در جمعیت، ارزیابی و تعیین می‌گردد و مرحله انتخاب براساس میزان برازندگی اعضا انجام می‌پذیرد. یعنی تعدادی از برازنده‌ترین کروموزم‌ها برای تولید مجدد انتخاب می‌گردند. در انتها عملگرهای ژنتیک (آمیزش (Crossover) و جهش

از حداکثر و نزول از حداقل استاندارد دارای آثار زیانباریست بدین منظور در این مقاله تابع هدف بر مبنای بهینه‌سازی تک هدفه به نحوی تدوین شد که مربع تفاضل بین غلظت کلر محاسبه شده از حداقل مجاز میزان کلر باقیمانده در شبکه برای هر کدام از گره‌های کنترل شونده برای تمامی گام‌های زمانی مورد نظر کمینه شود. متغیرهای تصمیم میزان بهینه دوزهای مختلف تزریق در مکان‌های نصب بوسترها است. بنابراین تابع هدف در این مطالعه مانند مطالعه کومار (Kumar) به شکل زیر نوشته شد (معادله ۶):

(۶)

$$\text{minimize } E = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{N_j} [C_{n_{jk}} - C_{min}]^2$$

subject to

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

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

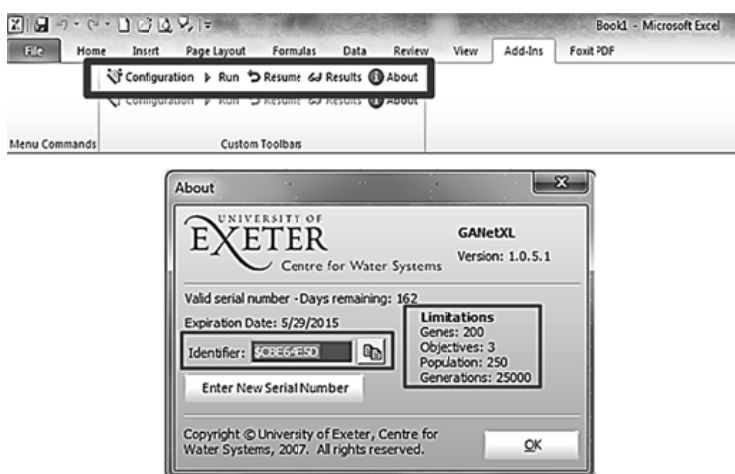
$$j = 1, \dots, M; \quad k = 1, \dots, N_j$$

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

می‌دهد تا یک مسئله بهینه‌سازی را تعریف، پیکربندی و اجرا نمایند و نتایج آن را در صفحات مجزا مشاهده کنند (۱۶). پارامترهای الگوریتم‌های فوق به آسانی می‌تواند با استفاده از یک پنجره گرافیکی که مرحله به مرحله کاربر مبتدی را برای انتخاب گزینه‌های مربوطه هدایت می‌کند تعیین شود. یکی از خصوصیات GANetXL توانایی ارتباط آسان آن با نرم افزارهای شبیه‌سازی است که می‌تواند برازندگی راه‌حل‌ها را به کمک این نرم افزارها ارزیابی نماید. همچنین این امکان وجود دارد تابعی که در محیط ویژوال بیسیک (Visual Basic) توسط کاربر تعریف شده است برای ارزیابی توسط GANetXL فراخوانی شود شکل ۲ قسمت‌هایی از محیط کاری GANetXL را نمایش می‌دهند. GANetXL با تحلیل‌گر هیدرولیکی شبکه EPANET2 و مدل‌های توسعه یافته در محیط برنامه نویسی ویژوال بیسیک که بصورت توابع کتابخانه‌ای پویا (Dynamic-Link Libraries (DLL)) هستند با موفقیت لینک می‌گردد (۹). Piratla (۱۷) و Goverdhanam (۱۸) و سایر محققین (۲۱-۱۹) در مطالعات خود از GANetXL استفاده نمودند.

۳-۳ تابع هدف

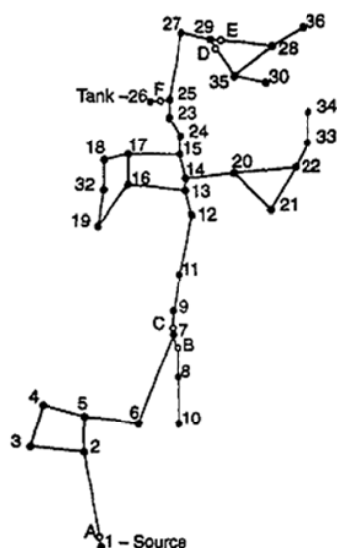
همانطور که در مقدمه بیان شد همواره میزان کلر باقیمانده در شبکه توزیع آب باید در بازه استاندارد قرار گیرد. تجاوز غلظت



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

تزریق کلر در مطالعات قبلی مانند Boccelli و همکاران (۶)، Munavalli و همکار (۴) و Gibbs و همکاران (۲۲) بیان شده است. ضریب واکنش جریان ۰/۵- بر روز و جداره لوله صفر متر در روز در نظر گرفته شد.

در انتخاب محل بوسترها سعی شده است تا هر یک از آنها بتوانند غلظت کلر را در نقاط دور از دسترس شبکه تامین کنند. تزریق در این محل‌ها به صورت جرمی و در بازه ۰ تا ۸۰۰ mg/min و با چهار الگوی تزریق متفاوت در ۲۴ ساعت شبانه روز صورت می‌گرفت. بنابراین با توجه به محل‌های تزریق (۶ گره) در بازه‌های زمانی (۴ دوره) تعداد متغیرهای تصمیم در الگوریتم ژنتیک مدل GANetXL برابر ۲۴ عدد بود. کل زمان در نظر گرفته شده برای اجرای مدل کیفی EPANET2، ۱۴ روز در نظر گرفته شد.



شکل ۳- نمای شبکه مورد استفاده

### یافته‌ها

در این مقاله ۲۴ ساعت انتهایی بازه زمانی انتخابی تحلیل کیفی شبکه (۱۴ روز) مورد بررسی و مبنای 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

و ارتباط پویای آن با GANetXL در محیط ویزوال بیسیک محاسبه می‌شود. بدین منظور ابتدا هر یک از عضوهای جمعیت (متغیرهای تصمیم) ایجاد شده توسط GA موجود در GANetXL برای تحلیل وارد مدل EPANET2 می‌شود و سپس مقادیر غلظت کلر باقیمانده در گره‌های کنترل‌شونده شبکه 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.

۳-۴ تابع جریمه

در روش الگوریتم ژنتیک، قیدها به شکل توابع جریمه در محاسبات تابع هدف اعمال می‌شوند. تابع جریمه افزوده شده به تابع هدف براساس معادله ۷ تعریف می‌شود:

(۷)

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

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

### ۴- کاربرد مدل

در این مقاله عملکرد مدل GANetXL در بهینه‌سازی 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 ۳ نمای این شبکه و ایستگاه‌های بوستر پمپ‌های تزریق کلر را به ترتیب با حروف A تا F نشان می‌دهد. سایر اطلاعات این شبکه از قبیل مشخصات هیدرولیکی و موقعیت بوستر پمپ‌های

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

جدول ۱- میزان‌های بهینه شده تزریق کلر

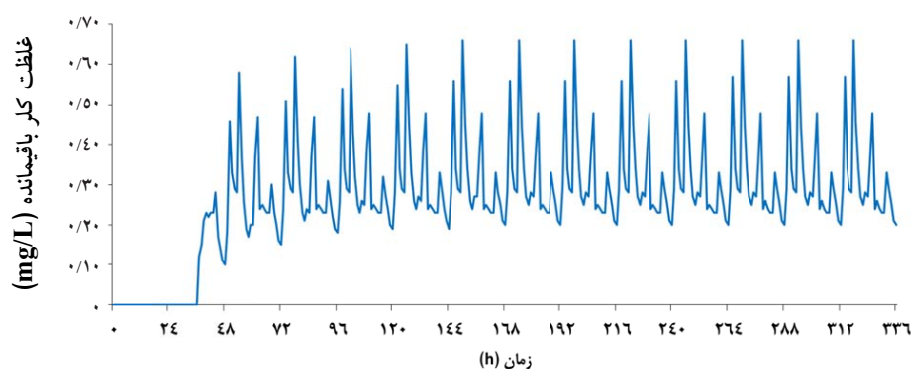
نام ایستگاه						زمان
F	E	D	C	B	A	
۷۴۸/۵۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۶۰۰/۱۳	۶/۳۱	۶۵۰/۰۳	۱
۷۴۸/۵۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۶۰۰/۱۳	۶/۳۱	۶۵۰/۰۳	۲
۷۴۸/۵۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۶۰۰/۱۳	۶/۳۱	۶۵۰/۰۳	۳
۷۴۸/۵۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۶۰۰/۱۳	۶/۳۱	۶۵۰/۰۳	۴
۷۴۸/۵۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۶۰۰/۱۳	۶/۳۱	۶۵۰/۰۳	۵
۷۴۸/۵۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۶۰۰/۱۳	۶/۳۱	۶۵۰/۰۳	۶
۲۷۳/۴۵	۰/۰۱	۰	۰/۱۳	۰	۳۸/۴۴	۷
۲۷۳/۴۵	۰/۰۱	۰	۰/۱۳	۰	۳۸/۴۴	۸
۲۷۳/۴۵	۰/۰۱	۰	۰/۱۳	۰	۳۸/۴۴	۹
۲۷۳/۴۵	۰/۰۱	۰	۰/۱۳	۰	۳۸/۴۴	۱۰
۲۷۳/۴۵	۰/۰۱	۰	۰/۱۳	۰	۳۸/۴۴	۱۱
۲۷۳/۴۵	۰/۰۱	۰	۰/۱۳	۰	۳۸/۴۴	۱۲
۴۰۰/۲۶	۰/۱	۰/۸۴	۳۰۰/۰۹	۱۲/۵۱	۷۷۶/۵۷	۱۳
۴۰۰/۲۶	۰/۱	۰/۸۴	۳۰۰/۰۹	۱۲/۵۱	۷۷۶/۵۷	۱۴
۴۰۰/۲۶	۰/۱	۰/۸۴	۳۰۰/۰۹	۱۲/۵۱	۷۷۶/۵۷	۱۵
۴۰۰/۲۶	۰/۱	۰/۸۴	۳۰۰/۰۹	۱۲/۵۱	۷۷۶/۵۷	۱۶
۴۰۰/۲۶	۰/۱	۰/۸۴	۳۰۰/۰۹	۱۲/۵۱	۷۷۶/۵۷	۱۷
۴۰۰/۲۶	۰/۱	۰/۸۴	۳۰۰/۰۹	۱۲/۵۱	۷۷۶/۵۷	۱۸
۴۰۰	۱/۵۷	۰/۵۷	۰/۰۱	۰/۰۵	۲۰۳/۲۳	۱۹
۴۰۰	۱/۵۷	۰/۵۷	۰/۰۱	۰/۰۵	۲۰۳/۲۳	۲۰
۴۰۰	۱/۵۷	۰/۵۷	۰/۰۱	۰/۰۵	۲۰۳/۲۳	۲۱
۴۰۰	۱/۵۷	۰/۵۷	۰/۰۱	۰/۰۵	۲۰۳/۲۳	۲۲
۴۰۰	۱/۵۷	۰/۵۷	۰/۰۱	۰/۰۵	۲۰۳/۲۳	۲۳
۴۰۰	۱/۵۷	۰/۵۷	۰/۰۱	۰/۰۵	۲۰۳/۲۳	۲۴

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

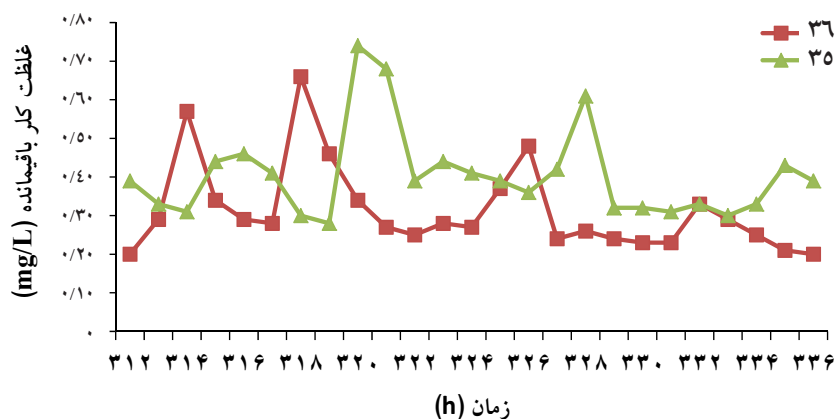
پارامترهای الگوریتم ژنتیک	اندازه جمعیت	تعداد نسل	نوع عملگر تقاطع	احتمال تقاطع	احتمال جهش
مقدار	۱۰۰	۲۰۰	یکنواخت	۰/۹۵	۰/۷

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 ۲۴ ساعته در دو گره ۳۵ و ۳۶ نشان می‌دهد. از آنجایی‌که بالاترین غلظت کلر باقیمانده در گره‌ها با حداکثر مجاز تعریف شده ( $4 \text{ mg/L}$ ) 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 ۶۰ درصد شبانه روز) دارای غلظت بین

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 به طوری که حداقل غلظت در گره‌ها ۰/۲، حداکثر آن ۱/۵۷ و متوسط غلظت در گره‌ها  $0/45 \text{ mg/L}$  بوده است. نمودار ۱ تغییرات غلظت کلر باقیمانده در گره ۳۶ در کل بازه مورد مطالعه را نشان می‌دهد



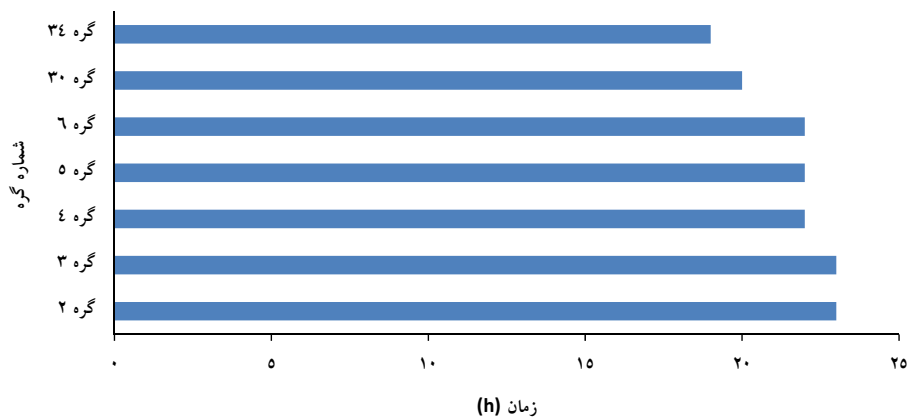
نمودار ۱- تغییرات غلظت کلر باقیمانده در گره ۳۶ در کل بازه مورد مطالعه



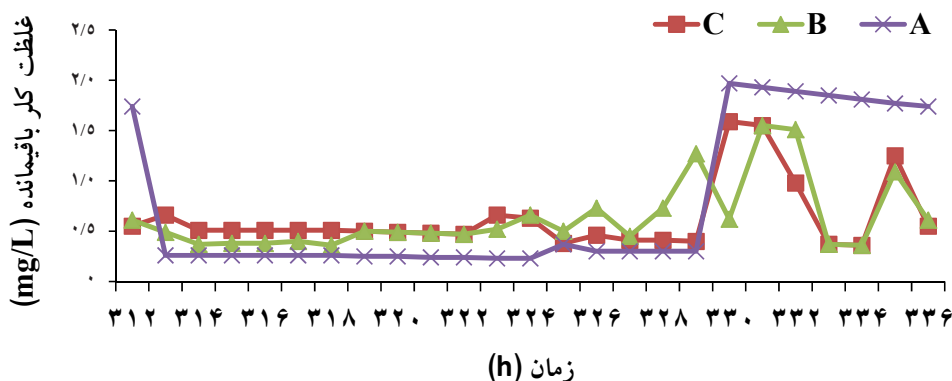
نمودار ۲- تغییرات غلظت کلر باقیمانده در دو گره ۳۵ (منحنی سبز) و ۳۶ (منحنی قرمز)

از حداقل مطلوب هستند (نمودار ۳). نمودار ۴ و ۵ به ترتیب تغییرات غلظت کلر باقیمانده در ۲۴ ساعت انتهایی بازه در گره‌های تزریق A-B-C و D-E-F را نشان می‌دهد.

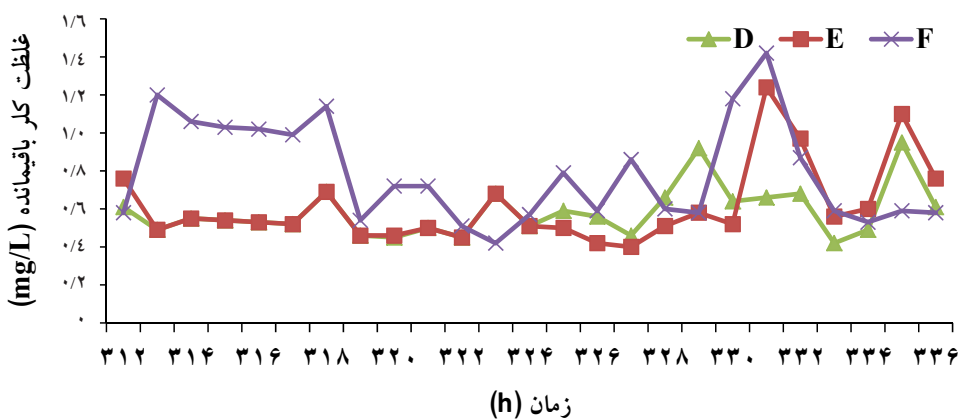
۰/۲ تا ۰/۳ mg/L بودند به‌عنوان گره بحرانی انتخاب شدند. با توجه به موقعیت گره‌های بحرانی در شبکه که در نقاط انتهایی قرار دارند، در صورت نبود بوستر قطعا دارای غلظتی پایین‌تر



نمودار ۳- گره‌های بحرانی در شبکه مورد مطالعه



نمودار ۴- تغییرات غلظت کلر باقیمانده در ۲۴ ساعت انتهایی بازه زمانی تحلیل کیفی در گره‌های A, B, و C



نمودار ۵- تغییرات غلظت کلر باقیمانده در ۲۴ ساعت انتهایی بازه زمانی تحلیل کیفی در گره‌های D, E, و F

## بحث

غلظت بین ۰/۲ تا ۰/۵ بودند (۴، ۵). کاربرد روش‌های نوین بهینه‌سازی در حوزه‌های 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 که در آن تصمیم‌گیری صحیح در مدت زمان کم امری بسیار دشوار است چه بسا که یک تصمیم اشتباه هزینه‌های جانی و مالی جبران ناپذیری بر بیکره یک جامعه شهری وارد نماید. در گذشته روش‌های سعی و خطا برای تصمیم‌گیری بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر بوده و همچنین روش‌های آزمایشگاهی نیز با توجه به لزوم نمونه‌برداری از سراسر شبکه 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

با توجه به نتایج به‌دست آمده از مطالعه براساس تابع هدف، کمینه‌سازی میزان کلر مصرفی در عین رعایت میزان حداقل نیاز باقیمانده از آن در شبکه علاوه بر اثرات مثبت بر سلامتی از جنبه‌های مختلف مانند غلظت پایین‌تر محصولات جانبی گندزدایی و عدم دریافت کلر اضافی در آب مصرفی دارای آثار مثبت اقتصادی نیز است؛ بدین ترتیب که با کاهش میزان کلر مصرفی ناشی از بهینه‌کردن غلظت آن در سراسر شبکه طی چند سال هزینه‌های نصب بوسترها جبران خواهد شد. 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.

## 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

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 ۷۷۶/۵۷، متوسط میزان تزریق ۱۸۳/۸۷ و مجموع تزریق در طی یک شبانه روز برابر با ۴۴۱۲/۸۴ mg/min است. در مطالعه Boccelli و همکاران در حالتی که هر شش بوستر در شبکه وارد مدل خطی شدند، دوز کل مصرفی برابر با ۱۱۲۰ g/day بوده است (۶) و مطالعه Munavalli و همکار (۴) که این عدد برابر با ۶ و مطالعه Tabesh (۵) برابر با ۱۳۷۰/۶۱ g/day که در مقایسه با ۴/۴۱۲ g/day در این مطالعه، از اختلاف چشمگیری برخوردار است. البته لازم به ذکر است که Boccelli با نرم افزار EPANET 1.0 مطالعه خود را انجام داده در حالی که مطالعه کنونی و دو مطالعه دیگر با نسخه ۲ این نرم افزار انجام شده‌اند و مبنای حل معادلات کیفی در این دو نسخه متفاوت است. Munavalli و همکار در مطالعه خود با جمعیت اولیه ۱۰۰ و تعداد نسل ۱۲۰۰ و Tabesh و همکاران با اندازه جمعیت ۷۰ و تعداد نسل ۶۰۰ به کمینه کردن میزان کلر پرداختند؛ در حالی که 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 بحرانی در مجموع ۲۰ درصد از کل گره‌های شبکه را تشکیل می‌دهند، که با درصد گره‌های کمتر از ۰/۳ mg/L در مطالعه Munavalli و همکار (۲۵ درصد) نزدیکی دارد. در مطالعه Tabesh و همکاران ۹۳/۱ درصد از گره‌ها دارای

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).

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, SMP SO and HGAPSO in optimal reservoirs operation. *Journal of Water and Soil*. 2016;30(4):1102-13 (in Persian).
12. Savić 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.



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

Original Article



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

A Moghaddam<sup>1</sup>, M Mokhtari<sup>2</sup>, R Peirovi<sup>2,3,\*</sup>

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

### 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.

**Key words:** Optimization, Chlorine, Genetic algorithm

**\*Corresponding Author:**

rpeirovi@yahoo.com