



## تأثیر قیود کیفی در بهینه سازی شبکه های توزیع آب

مسعود تابش<sup>۱</sup> و محمد ذبیحی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌ها، دانشگاه تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب، دانشگاه تهران

mohammadzabih@yahoo.com

### خلاصه

بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب از مسائل مهمی است که همواره مورد توجه محققان بسیاری بوده است. تابع هدف رایج در بهینه‌سازی معمولاً عبارت است از مینیمم کردن هزینه‌ها که آن نیز تابعی است از قطر لوله‌ها. قیودی که به طور متداول در نظر گرفته می‌شوند نیز عبارتند از قیود مربوط به قطر، فشار و سرعت. از آنجا که کیفیت آب در شبکه‌های توزیع مسأله‌ای است که با سلامت کل جامعه در ارتباط می‌باشد، لذا توجه به آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، اما این مسأله معمولاً در هنگام بهره‌برداری و با نمونه‌گیری از مکان‌های مختلف شبکه مورد توجه قرار می‌گیرد. در این مقاله سعی شده است که این امر قبل از بهره‌برداری و در مرحله طراحی مد نظر قرار گیرد، لذا علاوه بر قیود بالا قید جدیدی نیز به مسأله اضافه شده است که در ارتباط با کیفیت آب شبکه می‌باشد. میزان کلر آزاد باقیمانده در گره‌ها معیار خوبی برای این کار است؛ زیرا اگر میزان کلر کمتر از حد استاندارد باشد، آب به خوبی ضدعفونی نمی‌شود و میکروارگانیسم‌های بیماریزا همچنان در آب وجود خواهند داشت. اگر هم میزان کلر بیش از حد لازم باشد، موجب تشکیل مواد جانبی سرطان‌زا مانند تری‌هالومتان‌ها می‌گردد. اضافه شدن قیود کیفی باعث می‌شود که علاوه بر تحلیل هیدرولیکی به تحلیل کیفی شبکه نیز پرداخته شود که این امر بار محاسباتی مسأله را زیاده‌تر می‌کند. برای بهینه‌سازی از روش الگوریتم ژنتیک که روشی نوین و پر قدرت و کارآمد است، استفاده شده است. برای تحلیل کیفی نیز از روش TDM استفاده شده است. در این مقاله با ذکر مثال سعی شده است که اثر در نظر گرفتن قیود کیفی با حالتی که این قیود در نظر گرفته نمی‌شود، مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد.

کلمات کلیدی: شبکه های توزیع آب، بهینه سازی، قیود کیفی، الگوریتم ژنتیک

### مقدمه

زیرساخت‌ها در هر کشوری از اهمیت خاصی برخوردار هستند. هم از نظر خدماتی که ارائه می‌دهند و هم از نظر هزینه‌هایی که برای طراحی، اجرا و نگهداری آنها صرف می‌گردد. یکی از این زیرساخت‌ها، شبکه‌های توزیع آب می‌باشند که وظیفه توزیع آب را با کمیت و کیفیت مناسب در طول دوران بهره‌برداری و در شرایط مختلف بر عهده دارند. از آنجا که آب ماده‌ای حیاتی برای زندگی روزمره انسانهاست، وقفه‌ای هر چند کوتاه مدت در سرویس‌دهی یک شبکه آبرسانی، می‌تواند نارضایتی‌های زیادی را ایجاد نماید.

شبکه‌های توزیع آب علاوه بر اینکه از نظر نوع سرویسی که ارائه می‌دهند حائز اهمیت می‌باشند، از نظر هزینه‌های هنگفتی که برای طراحی، ساخت و اجرا، بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری و بهسازی و نوسازی آنها انجام می‌گیرد، نیز شایان توجه هستند. با توجه به اینکه پروژه‌ها معمولاً با محدودیت‌های مالی مواجه هستند، مسائل اقتصادی به عنوان یکی از مهمترین و تعیین‌کننده‌ترین پارامترها در کارها مطرح می‌شود و طراحی که دارای کمترین هزینه طراحی، اجرا و بهره‌برداری باشد، در اولویت قرار خواهد گرفت. بنابراین در طراحی، اجرا و بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع آب نیز باید به دنبال طرح‌های بهینه‌ای بود که هزینه کمتری را تحمیل می‌کنند. این تفکر بحث بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب را پیش می‌آورد. در بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب، تابع هدف معمولاً عبارت است از مینیمم کردن هزینه لوله‌ها. قیودی که معمولاً در نظر گرفته می‌شوند عبارتند از: قطر لوله‌ها، فشار در گره‌ها، سرعت در لوله‌ها.

کیفیت آب در شبکه‌های توزیع جزء موارد مهمی است که مقامات مسئول همواره به آن توجه دارند؛ زیرا کیفیت آب با سلامت عده زیادی از مصرف‌کنندگان ارتباط دارد و کوچک‌ترین بی‌توجهی در این زمینه، مشکلات و وقایع غیرقابل جبرانی را پیش خواهد آورد. قیود مربوط به پارامترهای

<sup>۱</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب



کیفی کمتر در مرحله طراحی در نظر گرفته شده‌اند. علت این امر هم آن است که کیفیت آب در مرحله بهره‌برداری اهمیت خود را نشان می‌دهد و لذا کنترل کیفیت آب در مرحله بهره‌برداری و با نمونه‌گیری از نقاط مختلف شبکه و کنترل مقادیر کلر در آزمایشگاه صورت می‌گیرد. اما چنانچه این قید با توجه به اهمیت آن در مرحله طراحی مد نظر قرار گیرد، می‌توان انتظار داشت که شبکه در مرحله بهره‌برداری، از نظر کیفیت آب با مشکلات کمتری مواجه شود. در این مقاله با ذکر مثال سعی شده است که اثر در نظر گرفتن قیود کیفی با حالتی که این قیود در نظر گرفته نمی‌شود، مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد.

## مرور کارهای گذشته

تاکنون روش‌های متعدد و متفاوتی برای بهینه‌سازی مسائل مهندسی ابداع شده‌اند. این مطلب در بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب شهری نیز برقرار است. طراحی شبکه‌های آب در ابتدا بیشتر بر مبنای تجربه و سعی و خطا استوار بود. سپس روش‌هایی چون برنامه‌ریزی خطی [1]، برنامه‌ریزی غیرخطی [2]، برنامه‌ریزی پویا [3] و روش ارزیابی تک به تک [4] توسعه پیدا کردند که همگی روش‌هایی قطعی می‌باشند. به مرور زمان این روش‌ها جای خود را به روش‌های الهام گرفته از طبیعت و مبتنی بر عدم قطعیت می‌دهند. از جمله این روش‌های نوین می‌توان به الگوریتم ژنتیک (GA) اشاره کرد که بیش از سایر روش‌ها مورد توجه قرار گرفته است. این روش با جمعیتی از جواب‌ها در هر لحظه سروکار دارد و از آنجا که این جواب‌ها در همه جای فضای جواب پخش شده‌اند، لذا شانس رسیدن به بهینه عمومی به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. همچنین این روش در مقایسه با روش‌های دیگر نیازی به پیوستگی و مشتق‌پذیری تابع هدف ندارد و با مسائلی که دارای تعداد متغیر زیاد هستند، نیز به راحتی کار می‌کند. تئوری این الگوریتم ابتدا در دانشگاه میشیگان آمریکا توسط Holland مطرح گردید [5]. ایده اصلی این روش از فرآیندهای بیولوژیکی بقاء و تکامل در میان موجودات زنده سرچشمه گرفته است. این روش شامل سه عملگر انتخاب، تزویج و جهش می‌باشد که در قسمت بعد با تفصیل بیشتری درباره آنها بحث خواهد شد.

در طی ۱۵ سال اخیر محققان زیادی از این روش برای بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب استفاده کرده‌اند. Simpson et al. از الگوریتم ژنتیک ساده با کدگذاری باینری (دودویی) با سه عملگر انتخاب، تزویج و جهش برای بهینه‌سازی یک شبکه نمونه استفاده کردند [6]. آنها نشان دادند که فقط با ارزیابی ۰/۳ درصد از کل جواب‌های ممکن به جواب بهینه رسیده‌اند. Savic & Walters برای بهینه‌سازی به جای کدگذاری معمول باینری از کدگذاری موسوم به Gray استفاده کردند [7]. این کدگذاری شبیه کدگذاری معمول و با ارقام صفر و یک است، با این تفاوت که هر رشته با رشته قبل و بعد از خود فقط در یک رقم تفاوت دارند. Dandy et al. برای بهبودی استفاده از الگوریتم ژنتیک علاوه بر استفاده از کدگذاری Gray دو پیشنهاد دیگر را نیز مطرح کردند [8]: ۱- استفاده از عملگر جهش مجاورت یا جهش خزشی، با اعمال این عملگر هر زیررشته معرف یک لوله به یک قطر بالاتر یا پایین‌تر از خود، جهش پیدا می‌کند. (البته کمترین قطرها و بزرگ‌ترین قطرها فقط از یک طرف می‌توانند جهش داشته باشند). ۲- استفاده از تابع ارزش‌ای که توان آن متغیر است. در ابتدا این توان برابر یک فرض می‌شود (مانند حالت‌های متداول). توان‌های کوچک‌تر در ابتدا برای این است که تنوعی که در جواب‌های اولیه است، حفظ گردد. به مرور زمان و طی نسل‌های بعدی به علت اینکه جواب‌های بهتری حاصل شده‌اند، این توان افزایش می‌یابد تا سرعت همگرایی نیز افزایش یابد. از آنجا که تعداد شبکه‌هایی که در فرآیند الگوریتم ژنتیک باید تحلیل هیدرولیکی شوند، بسیار زیاد است، لذا بار محاسباتی سنگینی به مسأله تحمیل می‌شود که وقت زیادی را صرف خود می‌کند. برای رفع این مشکل Broad et al. از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) استفاده کردند [9]. بدین ترتیب که پس از آموزش شبکه عصبی، با دادن مشخصات شبکه به عنوان ورودی، هدگرها به عنوان خروجی دریافت می‌شود. آنها برای آموزش شبکه از نتایج نرم‌افزار EPANET استفاده کردند. هر چند که آموزش شبکه عصبی زمان زیادی می‌برد؛ اما در کل زمان محاسباتی کاهش می‌یابد. آنها نشان دادند که اگر زمان آموزش شبکه در نظر گرفته نشود، زمان بهینه‌سازی مطالعه موردی موجود در مقاله حدود ۷۰۰ برابر سریع‌تر خواهد بود.

Vairavamoorthy & Ali به جای کدگذاری معمول باینری از کدگذاری اعداد حقیقی استفاده کردند [10]. به الگوریتم ژنتیک در حالت استفاده از کدگذاری اعداد حقیقی RCGA می‌گویند. با این کدگذاری دیگر نیازی به رمزگذاری و رمزگشایی جواب‌ها نمی‌باشد. آنها همچنین از تزویجی به نام Arithmetical و جهشی به نام Gaussian استفاده کردند. آنها متذکر شده‌اند که دو عملگر مذکور بهتر از بقیه عملگرهای مربوط به کدگذاری اعداد حقیقی می‌باشند. Vairavamoorthy & Ali روشی را برای تولید جمعیت اولیه پیشنهاد کردند که در نوع خود بدیع و ابتکاری بود [11]. آنها از این مطلب استفاده کردند که همه لوله‌ها در یک شبکه به یک اندازه دارای اهمیت نیستند؛ مثلاً تغییر در اندازه لوله‌هایی که به منبع نزدیک‌تر هستند، نسبت به لوله‌هایی که دورتر هستند، اثر بزرگ‌تری بر روی عملکرد هیدرولیکی شبکه دارند. آنها با اعمال این روش بر روی دو مطالعه موردی به این نتیجه رسیدند که این روش در مقایسه با GA معمولی هم سریع‌تر است و هم به جواب بهتری خواهد رسید. در ضمن جواب‌های امکان‌پذیری که در طول فرآیند وجود دارند به مراتب بیشتر از حالتی است که از GA معمولی استفاده می‌شود.

برای وارد کردن قیود کیفی لازم است که شبکه تحلیل کیفی گردد. برای این کار روش‌های مختلفی مانند تفاضل محدود [12]، حجم گسسته [13]، زمان‌مند [14] و واقع‌مند [15] وجود دارد که دو روش اول اوپلری و دو روش بعدی لاگرانژی می‌باشند. در روش‌های اوپلری لوله‌های شبکه به بخش‌های ثابتی تقسیم می‌شوند؛ سپس تغییرات غلظت در این حجم‌های کنترل محاسبه می‌گردد؛ ولی در روش‌های لاگرانژی لوله‌های شبکه به قطعات گسسته‌ای تقسیم می‌شوند و تغییرات غلظت در زمان‌های متوالی ثابت یا وقتی که یکی از قطعات آب به انتهای لوله برسد، بهنگام می‌گردند. برای تحلیل کیفی از نرم‌افزار EPANET2 استفاده می‌شود که از روش زمان‌مند لاگرانژی (TDM) استفاده می‌کند [16].



## تشریح روش

برای هر مسأله بهینه‌سازی در ابتدا باید تابع هدف و قیود را مشخص کرد. تابع هدف در طراحی شبکه‌های توزیع آب معمولاً حداقل کردن هزینه می‌باشد. در مرحله طراحی هزینه لوله‌های شبکه عمده‌ترین و گاهی تنها عامل برای ارزیابی تابع هدف است. در این مقاله نیز تابع هدف به صورت هزینه لوله‌ها و به شکل زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$f_{\text{cost}}(D) = \sum_{i=1}^{NP} KL_i D_i^n \quad (1)$$

که در آن  $L_i$  طول لوله  $i$  و  $D_i$  قطر آن و  $NP$  تعداد لوله‌ها می‌باشد.  $K$  و  $n$  ثابت‌هایی هستند که بسته به شرایط محلی مقدار آنها متفاوت است.  $n$  معمولاً بین یک تا دو تغییر می‌کند [10]. قیود در طراحی شبکه‌های توزیع آب شامل دو دسته می‌گردد. دسته اول قیودی هستند که به شکل تساوی می‌باشند. این قیود در واقع همان روابط پیوستگی جریان در گره‌ها و رابطه افت هد-دبی در لوله‌ها می‌باشند. دسته دوم آنهایی هستند که به شکل نامساوی خود را نشان می‌دهند و معمولاً شامل قطر، سرعت و فشار می‌باشند.

همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد برای بهینه‌سازی از روش الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده می‌شود. در این روش هر جواب ممکن و یا غیر ممکن برای شبکه به صورت یک رشته نشان داده می‌شود. به این رشته‌ها که معمولاً به صورت کدگذاری شده هستند، کروموزوم گفته می‌شود. هر کروموزوم از یک سری ژن تشکیل شده است که هر ژن مبین یک متغیر تصمیم می‌باشد. متغیرهای تصمیم در طراحی شبکه‌های توزیع آب همان اقطار لوله‌ها می‌باشند. در این مقاله از کدگذاری اعداد حقیقی برای نمایش کروموزوم‌ها استفاده می‌شود. بعد از اینکه نوع کدگذاری مشخص شد، باید یک مجموعه جواب برای شروع کار ایجاد شود. به مجموعه کل جواب‌هایی که در هر مرحله در نظر گرفته می‌شود، جمعیت یا نسل گفته می‌شود. تعداد جواب‌هایی که در هر نسل در نظر گرفته می‌شود، اندازه جمعیت نام دارد. برای شبکه‌های توزیع آب اندازه جمعیت معمولاً بین ۳۰ تا ۲۰۰ در نظر گرفته می‌شود [6]. همان‌طور که ذکر شد باید برای شروع کار یک جمعیت اولیه ایجاد شود. این جمعیت اولیه معمولاً به صورت تصادفی تولید می‌گردد. البته می‌توان با ارایه راهکارهایی، جمعیت اولیه را به گونه‌ای انتخاب نمود که سرعت همگرایی افزایش یابد. به عنوان مثال در این مقاله از روش ارایه شده توسط Vairavamoorthy & Ali استفاده شده است [11].

بعد از اینکه جمعیت اولیه تولید گردید، باید از میان جمعیت اولیه، تعدادی از کروموزوم‌ها برای تولید نسل بعد انتخاب شوند. این فرآیند انتخاب نام دارد. فرآیند انتخاب باید به گونه‌ای باشد که احتمال برگزیده شدن کروموزوم‌هایی که ارزش بالاتری هستند، بیشتر باشد. چون هر چه کروموزوم‌های با ارزش بالاتر برای تولید نسل بعد انتخاب شوند، احتمال اینکه در نسل‌های بعد به جواب‌های بهتری برسیم، بیشتر خواهد شد. ملاک ارزش‌گذاری کروموزوم‌ها به تابع برازندگی موسوم می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\text{fitness function} = \frac{1}{f_{\text{cost}}(D) + \sum \text{Penalty Term}} \quad (2)$$

که در آن Penalty Term توابع جریمه می‌باشند. بدین معنی که وقتی به ازای یک کروموزوم برخی قیود ارضاء نمی‌شوند، به تابع هدف اصلی، مقادیری دیگر به عنوان جریمه اضافه می‌شود تا هزینه‌های متناظر با آن کروموزوم افزایش یابد و در مراحل بعد احتمال برگزیده شدن آن کمتر گردد. با این کار الگوریتم به نوعی به دنبال جواب‌های امکان‌پذیر می‌گردد که قیود را هم ارضاء می‌کنند. توابع جریمه معمولاً از ضرب یک عدد بسیار بزرگ در میزان انحراف از قیود تشکیل می‌شود. هر کروموزومی که در فرآیند انتخاب برگزیده می‌شود، به عنوان والد برای تولید فرزندان نسل بعد مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای تولید فرزندان از والدین دو عملگر به نام‌های تزیویج و جهش به کار می‌رود. تزیویج در واقع مبادله قسمت‌های متناظر دو والد با یکدیگر است. تزیویجی که در این مقاله استفاده شده است، تزیویج Arithmetical نام دارد و برای شبکه‌های توزیع آب در حالتی که از کدگذاری اعداد حقیقی استفاده می‌شود، مناسب‌ترین نوع تزیویج می‌باشد [10]. برای توضیح این تزیویج باید گفت که اگر  $D_1 = (d_1^1, \dots, d_{NP}^1)$  و  $D_2 = (d_1^2, \dots, d_{NP}^2)$  دو کروموزوم والد باشند، آنگاه دو کروموزوم فرزند به شکل زیر خواهند بود:

$$\begin{cases} J_k = (j_1^k, \dots, j_{NP}^k) \quad k = 1, 2 \\ j_i^1 = \lambda d_i^1 + (1 - \lambda) d_i^2 \\ j_i^2 = (1 - \lambda) d_i^1 + \lambda d_i^2 \end{cases} \quad (3)$$

که  $\lambda$  ثابتی است بین صفر و یک. Vairavamoorthy & Ali پس از سعی و خطا مقدار مناسب آن را ۰/۷۵ در نظر گرفته‌اند، ولی برای مطالعات موردی این مقاله با سعی و خطا مقدار مناسب آن ۰/۵ در نظر گرفته شده است. برای تعیین اینکه چند درصد از کروموزوم‌های هر نسل باید از تزیویج حاصل شوند، احتمالی به نام احتمال تزیویج تعیین می‌گردد که برای شبکه‌های توزیع آب مقدار آن مابین ۰/۷ تا ۱ در نظر گرفته می‌شود [6]. بعد از انجام عملگر تزیویج نوبت به عملگر جهش می‌رسد. این عملگر به تغییر بخشی از کروموزوم می‌پردازد که این بخش به طور تصادفی انتخاب می‌شود. جهش اساساً برای ایجاد تنوع در نسل جدید به کار می‌رود. برای جهش نیز احتمالی با عنوان احتمال جهش باید تعیین گردد که برای شبکه‌های توزیع آب مقدار آن مابین ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ متغیر است [6]. مشاهده می‌شود که احتمال جهش در مقایسه با احتمال تزیویج عدد بسیار کوچک‌تری است. احتمال جهش ۰/۰۱ بدین معناست که از هر ۱۰۰ قسمت در کروموزوم‌ها یک قسمت به طور تصادفی انتخاب می‌شود و مقدار آن تغییر می‌کند. در این مقاله از



جهش Gaussian استفاده می‌شود که برای شبکه‌های توزیع آب در حالتی که از کدگذاری اعداد حقیقی استفاده می‌شود، مناسب می‌باشد [10]. اگر فرض شود که  $D = (d_1, \dots, d_{NP})$  یک کروموزوم باشد و  $d_i$  ژنی باشد که به طور تصادفی انتخاب شده باشد، فرم جهش یافته آن به صورت زیر می‌باشد:

$$d_i^* = d_i + N(0, \sigma) \quad (4)$$

که در آن  $N(0, \sigma)$  یک عدد تصادفی از توزیع گوسین با میانگین صفر و انحراف از معیار  $\sigma$  می‌باشد. Vairavamoorthy & Ali مقدار مناسب  $\sigma$  را  $0.1 \times d^{\max}$  در نظر گرفته‌اند که حداکثر قطری است که یک لوله می‌تواند دارا باشد. برای بهینه‌سازی از نرم‌افزار MATLAB 7.1 که برای کارهای محاسباتی بسیار پر قدرت می‌باشد، استفاده شده است.

از آنجا که برای تحلیل کیفی از نرم‌افزار EPANET2 استفاده شده است و این نرم‌افزار برای تحلیل کیفی از روش زمان‌مند لاگرانژی (TDM) استفاده می‌کند، لذا در ادامه به تشریح این روش پرداخته خواهد شد. این روش غلظت و اندازه مجموعه‌ای از المان‌های بدون تداخل را ردیابی می‌کند که طول هر لوله را پر کرده‌اند. با گذشت زمان، اندازه بالادست‌ترین المان در یک لوله افزایش می‌یابد، در حالی که به همان اندازه طول پایین‌دست‌ترین المان کاهش می‌یابد. اندازه المان‌های بین این دو المان ثابت باقی می‌ماند. در هر گام زمانی کیفی مراحل زیر انجام می‌شود:

- غلظت در هر المان با توجه به سینتیک واکنش تعیین می‌شود.
- المان‌ها به سمت پایین دست حرکت داده می‌شوند.
- جرم و دبی ورودی به هر گره، به جرم و دبی موجود گره اضافه می‌شود.
- غلظت گره‌ها با توجه به جرم و دبی ورودی بهنگام می‌شود.
- اگر غلظت گره از غلظت لوله‌های خروجی از گره از مقدار توالرانس مشخصی بیشتر باشد، المان جدیدی با این غلظت در بالادست لوله‌های خروجی از گره ایجاد خواهد شد، در غیر این صورت بالادست‌ترین المان لوله‌های خروجی از گره با همان غلظت قبلی خود، افزایش طول خواهند داشت.

غلظت کلر آزاد باقیمانده در آب نمونه‌ای از پارامترهای کیفی است که معمولاً به عنوان یک معیار خوب برای اطمینان از سلامت آب یک شبکه مورد توجه قرار می‌گیرد. اگر غلظت کلر آزاد باقیمانده از یک حدی کمتر باشد، عملیات ضدعفونی کردن آب به خوبی انجام نمی‌گیرد و امکان رشد میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا وجود خواهد داشت. همچنین غلظت بیش از حد کلر آزاد باقیمانده منجر به تغییر مزه آب و به وجود آمدن محصولات جانبی سرطان‌زا از جمله تری‌هالومتان‌ها می‌گردد. حداقل کلر آزاد باقیمانده طبق استاندارد شماره ۱۰۵۳ ایران [17] پس از زمان تماس کافی برای PH بین ۶ تا ۸ برابر  $0.2$  میلی‌گرم در لیتر در نظر گرفته می‌شود. همچنین مقدار حداقل و حداکثر مجاز کلر در آب آشامیدنی طبق نشریه شماره ۳-۱۱۶ بر حسب میلی‌گرم در لیتر به ترتیب برابر  $0.2$  تا  $0.5$  توصیه شده است [18]. سازمان بهداشت جهانی (WHO) نیز مقدار مطلوب و حداکثر کلر آزاد را در آب آشامیدنی  $0.3$  و  $0.5$  میلی‌گرم در لیتر توصیه کرده است [19]. با توجه به این توضیحات برای قید کیفی، حداقل و حداکثر مجاز کلر در شبکه‌های توزیع آب به ترتیب  $0.2$  و  $0.5$  در نظر گرفته می‌شود.

در هنگام حرکت ماده‌ای نظیر کلر در امتداد یک لوله، آن ماده با مواد موجود در حجم آب واکنش می‌دهد که به آن واکنش‌های حجمی می‌گویند. معمولاً این واکنش‌های حجمی را می‌توان به صورت اضمحلال از مرتبه اول به صورت زیر نشان داد [16,20,21,22]:

$$r(C) = k_b C \quad (5)$$

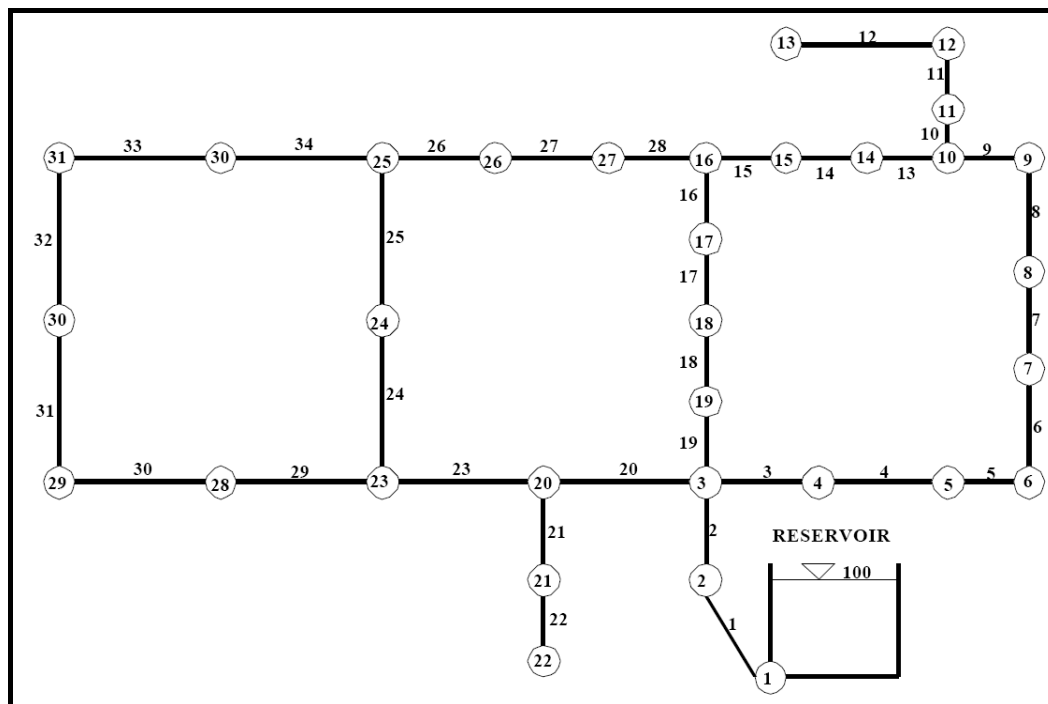
که در آن  $k_b$  ثابت واکنش حجمی (یک بر زمان)،  $C$  غلظت (جرم بر حجم) و  $r$  نرخ واکنش حجمی (جرم بر حجم بر زمان) می‌باشد. فاکتورهایی از قبیل غلظت اولیه کلر، کربن آلی کل (TOC)، دما و تعداد کلر زنی مجدد در  $k_b$  تأثیر می‌گذارند [23]. در هنگام جریان آب در لوله‌ها، مواد غیر قابل حل می‌توانند به سمت جداره لوله انتقال یافته و با مصالح آن واکنش دهند. به این واکنش‌ها، واکنش‌های جدار لوله می‌گویند. برای سینتیک از مرتبه اول، نرخ واکنش جداره لوله را به صورت زیر می‌توان بیان نمود [16,22]:

$$r = \frac{2k_w k_f C}{R(k_w + k_f)} \quad (6)$$

که در آن  $k_w$  ثابت نرخ واکنش جداره (طول بر زمان)،  $k_f$  ضریب انتقال جرمی (طول بر زمان) (این ضریب به پخشیدگی مولکولی ذرات واکنش‌زا و عدد رینولدز جریان بستگی دارد)،  $R$  شعاع لوله (طول)،  $C$  غلظت (جرم بر حجم) و  $r$  نرخ واکنش جدار لوله (جرم بر حجم بر زمان) می‌باشد. عواملی که بر روی ثابت واکنش جدار لوله مؤثرند، عبارتند از [24]: مواد تشکیل‌دهنده لوله، سرعت حرکت در لوله، غلظت اولیه کلر، خوردگی و بیوفیلیم. در قسمت بعد سعی شده است با ارائه مثال تأثیر در نظر گرفتن قیود کیفی مورد بررسی قرار گیرد.

### مطالعه موردی (ارزیابی روش)

شبکه‌ای که برای مطالعه موردی در نظر گرفته شده است، در شهر Hanoi در ویتنام واقع گردیده است و توسط محققان زیادی به عنوان شبکه نمونه مورد استفاده قرار گرفته است. پیکربندی این شبکه در شکل ۱ نشان داده شده است. این شبکه که اولین بار توسط Fujiwara & Khang مورد بررسی قرار گرفت [25]، از ۳۲ گره، ۳۴ لوله و یک مخزن ذخیره تشکیل شده است و شامل سه حلقه می‌باشد. ارتفاع آب درون مخزن ۱۰۰ متر و ارتفاع گره‌ها برابر صفر فرض می‌شود. ضریب هیزن-وليامز همه لوله‌ها نیز برابر ۱۳۰ در نظر گرفته می‌شود. سایر مشخصات مربوط به گره‌ها و لوله‌ها در [25] آمده است.



شکل ۱- شبکه توزیع آب شهر Hanoi

تابع هدف این شبکه فقط شامل هزینه لوله‌ها می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$f_{\text{cost}}(D) = 1.1 \sum_{i=1}^{NP} L_i D_i^{1.5} \quad (7)$$

لازم به ذکر است که در این رابطه طول لوله‌ها بر حسب فوت و قطر آنها بر حسب اینچ باید باشد. قیود مسأله نیز بدین صورت است که هد گره‌ای برای همه گره‌ها باید حداقل ۳۰ متر باشد. مجموعه اقطار تجاری بر حسب متر نیز به صورت  $\{0.16, 0.1762, 0.191, 0.206, 0.221, 0.236, 0.251, 0.266, 0.281, 0.296, 0.311, 0.326, 0.341, 0.356, 0.371, 0.386, 0.401, 0.416, 0.431, 0.446, 0.461, 0.476, 0.491, 0.506, 0.521, 0.536, 0.551, 0.566, 0.581, 0.596, 0.611, 0.626, 0.641, 0.656, 0.671, 0.686, 0.701, 0.716, 0.731, 0.746, 0.761, 0.776, 0.791, 0.806, 0.821, 0.836, 0.851, 0.866, 0.881, 0.896, 0.911, 0.926, 0.941, 0.956, 0.971, 0.986, 1.001\}$  در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب با توجه به اینکه این شبکه ۳۴ لوله دارد و برای هر لوله ۶ قطر تجاری موجود است، تعداد کل جواب‌هایی که می‌تواند در نظر گرفته شود، برابر  $6^{34} = 2.87 \times 10^{26}$  خواهد بود.

برای بهینه‌سازی این شبکه به کمک الگوریتم ژنتیک، ابتدا باید پارامترهای آن تعیین گردند. در این مقاله با سعی و خطا و همچنین با کمک کارهای قبلی [7,10] تعداد جمعیت برابر ۱۰۰، احتمال تقاطع ۱/۰ و احتمال جهش  $\frac{1}{34}$  در نظر گرفته شده است. تعداد بهترین جواب‌هایی که بدون تغییر به نسل بعد منتقل می‌شوند، نیز برابر ۵ تعیین می‌گردد. برای تولید جمعیت اولیه نیز از روش گفته شده در [10] استفاده می‌شود. با توجه به اینکه با این جمعیت اولیه مسأله به سرعت به جواب بهینه نزدیک می‌گردد، لذا تعداد جمعیت در هر نسل کمتر از کارهای گذشته و برابر ۳۰۰ در نظر گرفته می‌شود (این عدد در کارهای گذشته ۱۰۰۰ می‌باشد). البته برای حفظ تنوع، ۱۰ درصد جمعیت اولیه به صورت تصادفی تولید می‌گردد. برای تقاطع از روش Arithmetic و برای جهش از روش Gaussian که در قسمت قبل توضیح داده شدند، استفاده می‌شود.

ابتدا مسأله در حالت عادی بهینه می‌گردد؛ یعنی فقط قید فشار در گره‌ها مد نظر قرار می‌گیرد. در مرحله بعد قیود کیفی وارد می‌گردند. در ابتدا فقط ثابت واکنش حجمی در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که ثابت واکنش حجمی یک شبکه قبل از طراحی نمی‌تواند به درستی تعیین گردد، لذا باید مقداری فرضی برای آن در نظر گرفته شود. با توجه به کارهای محققین قبلی (جدول ۱) محدوده تغییرات این ثابت نسبتاً وسیع می‌باشد.



جدول ۱- محدوده تغییرات ثابت واکنش حجمی

نام محقق	$k_b (day^{-1})$
Zhang et al. [26]	۱/۶۸-۲/۶۴
Chambers et al. [27]	۰/۷۲-۵/۰۴
Hallam et al. [28]	۰/۴۸-۱۷/۷۶

Ghimire et al. (2005) متذکر شده‌اند برای شبکه‌ای که مقدار در دسترس نیست، مقدار  $k_b$  به طور متوسط  $۲/۵ day^{-1}$  در نظر گرفته شود. با توجه به بسیاری از شبکه‌های واقعی که در مقالات استفاده شده است و نتایج جدول ۱ می‌توان گفت که این مقدار نیز تا حدودی سخت‌گیرانه می‌باشد. لذا برای این شبکه نیز ثابت واکنش حجمی برابر همین مقدار در نظر گرفته می‌شود. در مرحله بعد ثابت واکنش جداره نیز باید در نظر گرفته شود. این ثابت که مابین ۰ تا ۵ متر بر روز متغیر است [16]، در بسیاری از موارد در نظر گرفته نمی‌شود، اما از آنجا که روی نتایج تأثیرگذار است، لذا باید آن را نیز در نظر گرفت. برای این ثابت نیز مقدار متوسط آن یعنی  $۲/۵$  در نظر گرفته می‌شود. ضریب جریمه مربوط به قید کلر  $۱۰^{۱۲}$  و برای فشار چهار بازه در نظر گرفته شده است؛ بدین ترتیب که اگر فشار بیش از ۳۰ متر انحراف از قیود داشته باشد، ضریب  $۱۰^۸$  و اگر بین ۲۰ تا ۳۰ متر انحراف داشته باشد، نصف این مقدار و اگر بین ۱۰ تا ۲۰ متر انحراف داشته باشد، یک سوم این مقدار و در نهایت اگر کمتر از ۱۰ متر انحراف داشته باشد، یک چهارم این مقدار در نظر گرفته می‌شود. نتایج حالتی که قبلاً ذکر شد، در جدول ۲ آمده است. حالت ۱، حالتی است که فقط قید فشار وجود دارد. در حالت ۲ و ۳ قیود کیفی هم اضافه شده‌اند. در حالت ۲ فقط واکنش حجمی و در حالت ۳ واکنش حجمی به همراه واکنش جدار لوله مد نظر قرار گرفته است.

جدول ۲- نتایج بهینه‌سازی در ۳ حالت

شماره لوله	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳
1	1.016	1.016	1.016
2	1.016	1.016	1.016
3	1.016	1.016	1.016
4	1.016	1.016	1.016
5	1.016	1.016	1.016
6	1.016	1.016	1.016
7	0.762	1.016	1.016
8	0.762	0.762	0.762
9	1.016	0.762	0.762
10	0.762	0.762	0.762
11	0.762	0.6096	0.6096
12	0.6096	0.6096	0.6096
13	0.3048	0.3048	0.3048
14	0.3048	0.3048	0.6096
15	0.3048	0.4064	0.508
16	0.762	0.762	0.4064
17	0.762	0.762	0.6096
18	0.762	0.762	0.762
19	0.762	0.762	0.762
20	1.016	1.016	1.016
21	0.508	0.508	0.508
22	0.3048	0.3048	0.3048
23	0.762	0.762	1.016
24	0.6096	0.508	0.762
25	0.6096	0.4064	0.762
26	0.4064	0.508	1.016
27	0.508	0.508	1.016
28	0.6096	0.6096	0.6096
29	0.4064	0.508	0.6096
30	0.4064	0.508	0.6096
31	0.3048	0.4064	0.508
32	0.4064	0.3048	0.6096
33	0.4064	0.3048	0.4064
34	0.6096	0.6096	0.3048
هزینه شبکه (میلیون دلار)	6.274	6.252	6.736
درصد اختلاف هزینه با حالت بهینه	3.6	3.2	11.2
تعداد نسل‌هایی که جواب بهینه تغییر نکرده است	71	193	79



با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که مسأله در حالت ۱ با  $\frac{3}{2}$  درصد خطا به جواب بهینه رسیده است (بهترین جوابی که برای این شبکه تا به حال به دست آمده است، دارای هزینه‌ای معادل ۶/۰۵۶ میلیون دلار است [11]). البته این درصد ممکن است بالاتر یا پایین‌تر گردد، ولی معمولاً میزان خطا زیر ۵ درصد است. این امر نشان می‌دهد که برنامه کامپیوتری نوشته شده به درستی کار می‌کند. لازم به ذکر است که مقدار کلر در مخزن جزء متغیرهای تصمیم قرار نگرفته است و میزان آن از قبل و برابر  $\frac{0}{5}$  میلی‌گرم در لیتر در نظر گرفته می‌شود تا از قید مربوط به حداکثر کلر در گره‌ها اطمینان حاصل گردد.

هنگامی که قیود کیفی وارد می‌گردند، باید به یک نکته توجه داشت و آن این است که برای ارضاء قیود فشار در گره‌ها قطر لوله‌ها در طول فرآیند بهینه‌سازی افزایش می‌یابد. زیرا با قطرهای خیلی کوچک نمی‌توان فشارهای گره‌ای را تأمین نمود. در حالی که برای ارضاء قیود کیفی، مسأله به سمتی پیش می‌رود که سرعت در لوله‌ها افزایش یابد و این امر موجب کاهش قطر لوله‌ها در طول فرآیند می‌گردد. بنابراین اینگونه می‌توان نتیجه گرفت که قیود فشار و قیود کیفی در طول فرآیند بهینه‌سازی باهم در تقابل می‌باشند.

همان‌طور که از جدول پیداست نتایج در حالت ۲ تفاوت چشمگیری با حالت ۱ ندارند. این امر نشان می‌دهد که جواب بهینه حالت ۱، قیود کیفی مربوط به حالت ۲ را ارضاء می‌نماید. البته این امر برای این شبکه افتاده است و اگر شبکه‌های بیشتری مد نظر قرار می‌گرفتند، شاید نتایج تفاوت قابل ملاحظه‌ای می‌داشت. اگر جواب‌های بهینه سه حالت بررسی شود، مشاهده خواهد شد که تنها در حالات ۱ و ۲ مسأله به جواب امکان‌پذیر می‌رسد و همه قیود ارضاء می‌گردند؛ ولی در حالت ۳ مسأله به جواب امکان‌پذیر نمی‌رسد. به طوری که قید فشار در گره ۳۲ و قید کیفی در گره‌های ۱۳، ۳۰، ۳۱ و ۳۲ از حدود مجاز تجاوز می‌نماید. با توجه به شکل ۱ مشاهده می‌شود که این نقاط عموماً نقاط دور از منبع و یا به صورت شاخه‌ای هستند. به طور کلی هر چه تعداد قیودی که برای بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب در نظر گرفته می‌شود، بیشتر باشد، احتمال اینکه جواب نهایی امکان‌پذیر باشد، کمتر می‌گردد. از آنجا که در حالت ۳ ثابت واکنش جداره نیز اضافه می‌گردد، میزان کلر در گره‌ها کمتر از حالت ۲ می‌گردد و لذا ارضاء قیود کیفی سخت‌تر از حالت ۲ انجام می‌پذیرد. این امر اهمیت در نظر گرفتن ثابت واکنش جداره لوله را علاوه بر ثابت واکنش حجمی نشان می‌دهد؛ در حالی که این امر در بسیاری از مدل‌سازی‌ها در شبکه‌های توزیع آب مد نظر قرار نمی‌گیرد و فقط به ثابت واکنش حجمی بسنده می‌شود. زمان اجرای برنامه برای حالت ۱ در حدود ۳۰ دقیقه و در حالات ۲ و ۳ حدود ۶۵ دقیقه (بیش از دو برابر) می‌باشد. علت این امر این است که در حالات ۲ و ۳ علاوه بر تحلیل هیدرولیکی به تحلیل کیفی نیز باید پرداخته شود. برای اینکه مسأله دارای جواب امکان‌پذیر باشد، دو راه حل موجود است. راه حل اول این است که مجموعه اقطار تجاری توسعه داده شود تا اقطار کوچک‌تر و بزرگ‌تر نیز وارد این مجموعه شوند. راه حل دوم این است که اندکی در مرزهای قیود کیفی تسامح به خرج داد، زیرا ممکن است در جواب بهینه نهایی تعدادی از گره‌ها و آن هم به میزانی اندک از قیود کیفی تجاوز کرده باشند. تعداد نسل‌هایی که در آنها جواب بهینه نهایی تغییری نکرده است، در سه حالت اعداد قابل توجهی است که نشان می‌دهد احتمال رسیدن به جوابی بهتر بسیار کم می‌باشد. با توجه به موارد گفته شده می‌توان گفت در نظر گرفتن قیود کیفی در بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب، می‌تواند در هزینه نهایی شبکه تأثیر داشته باشد و همچنین می‌تواند باعث شود که مسأله اصلاً به جوابی که همه قیود ارضاء شوند، نرسد.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله به موضوع بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب و تأثیر در نظر گرفتن قیود کیفی در نتایج آن پرداخته شد. برای بهینه‌سازی از روش الگوریتم ژنتیک و برای تحلیل کیفی از نرم‌افزار EPANET2 که از روش زمان‌مند لاگرانژی (TDM) بهره می‌برد، استفاده شده است. نتایج در سه حالت با یکدیگر مقایسه گردید. حالت ۱ که فقط قید فشار وجود داشت و در حالت ۲ و ۳ قیود کیفی هم اضافه شده بودند. در حالت ۲ فقط واکنش حجمی و در حالت ۳ واکنش حجمی به همراه واکنش جدار لوله مد نظر قرار گرفته بود. زمان اجرای برنامه در حالتی که تحلیل کیفی هم منظور می‌گردد، بیشتر می‌شود (در مطالعه موردی این مقاله تا بیش از دو برابر). با مقایسه سه حالت این نتیجه به دست آمد که در نظر گرفتن قیود کیفی در حالت ۲ تفاوت چندانی با نتایج حالت ۱ ندارد. البته این امر ممکن است فقط برای مطالعه موردی این مقاله باشد. در حالت ۳ اصلاً مسأله به جواب امکان‌پذیری که همه قیود ارضاء شوند، نرسید که این امر اهمیت در نظر گرفتن ثابت واکنش جداره را بیان می‌نماید. ارائه راه حلی مناسب برای رفع این حالت کاری است که می‌تواند مورد بررسی بیشتر قرار بگیرد. در هر حال در نظر گرفتن قیود کیفی در مرحله طراحی می‌تواند منجر به طراحی‌های کارآمدتری شود که هم قیود معمول و هم قیود کیفی را ارضاء می‌نمایند و همچنین می‌تواند بیانگر این باشد که شبکه در موقع بهره‌برداری در چه نقاطی از نظر کیفی احتمال دارد با مشکلات بیشتری روبه‌رو شود.

### مراجع

1. Gupta, I., Hussan, M. and Cook, J. (1969) Linear programming analysis of a water supply system. *Transactions of the American Institute of Industrial Engineering*, 9 (1), 56-61.
2. Kher, L., Agarwal, S. and Khanna, P. (1979) Non-linear optimization of water supply systems. *Environmental Engineering*, ASCE, 150 (EE4), 781-784.
3. Kalliy, E. (1969) Pipeline planning by dynamic computer programming. *American Water Works Association*, 61 (3), 114-118.



4. Koh, E. and Maidment, D. (1984) Microcomputer programs for designing water systems. *American Water Works Association*, **76** (7), 62-65.
5. Holland, J.H. (1975) *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, USA.
6. Simpson, A.R., Dandy, G.C. and Murphy, L.J. (1994) Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. *Water Resources Planning and Management*, ASCE, **120** (4), 423-443.
7. Savic, D.A. and Walters, G.A. (1997) Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. *Water Resources Planning and Management*, ASCE, **123** (2), 67-77.
8. Dandy, G.C., Simpson, A.R. and Murphy, L.J. (1996) An improved genetic algorithm for pipe network optimization. *Water Resources Research*, **32** (2), 449-458.
9. Broad, D.R., Dandy, G.C. and Maier, H.R. (2005) Water distribution system optimization using metamodels. *Water Resources Planning and Management*, ASCE, **131** (3), 172-180.
10. Vairavamoorthy, K. and Ali, M. (2000) Optimal Design of Water Distribution Systems Using Genetic Algorithms. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **15**, 374-382.
11. Vairavamoorthy, K. and Ali, M. (2005) Pipe Index Vector: A Method to Improve Genetic-Algorithm-Based Pipe Optimization. *Water Resources Planning and Management*, ASCE, **131** (12), 1117-1125.
12. Chaudhry, M.H. and Islam, M.R. (1994) Water quality modeling in pipe networks. *Proc. Conf. on Improving Efficiency and Reliability in Water Distribution Systems, UIMP*, Valencia, Spain.
13. Rossman, L.A., Boulos, P.F. and Altman, T. (1993) Discrete volume-element method for network water quality models. *Water Resources Planning and Management*, ASCE, **119** (5), 505-517.
14. Liou, C.P. and Kroon, J.R. (1987) Modeling the propagation of waterborne substances in distribution networks. *American Water Works Association*, **79** (11), 54-58.
15. Boulos, P.F., Altman, T., Jarrige, P.A. and Collevati, F. (1994) An event-driven method for modeling contaminant propagation in water networks. *Applied Mathematical Modeling*, **18** (2), 84-92.
16. Rossman, L.A. (2000), *EPANET2: user's manual*. U. S. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, Ohio, USA.
۱۷. استاندارد شماره ۱۰۵۳ ایران. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب آشامیدنی، مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، چاپ پنجم، ۱۳۷۶.
۱۸. نشریه شماره ۳-۱۱۶. دفتر تحقیقات و معیارهای فنی سازمان برنامه و بودجه و استانداردهای مهندسی آب وزارت نیرو، ۱۳۷۱.
۱۹. منزوی، م.ت. (۱۳۸۱) *آبرسانی شهری*. چاپ یازدهم، مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، تهران.
20. Clark, R.M., Grayman, W.M., Males, R.M. and Hess, A.F. (1993) Modeling contaminant propagation in drinking-water distribution systems. *Environmental Engineering*, ASCE, **119** (2), 349-363.
21. Grayman, W.M. and Clark, R.M. (1994) Measure and modeling chlorine propagation in water distribution systems. *Water Resources Planning and Management*, ASCE, **120** (6), 871-885.
22. Xin, L., Da-ming, G., Jing-yao, Q., Ukita, M. and Hong-bin, Z., (2003) Modeling of residual chlorine in water distribution system. *Environmental Sciences*, **15** (1), 136-144.
23. Powell, J.C., Hallam, N.B., West, J.R., Forster, C.F. and Simms, J. (2000) Factors which control bulk chlorine decay rates. *Water Research*, **34** (1), 117-126.
24. Hallam, N.B., West, J.R., Forster, C.F., Powell, J.C. and Spencer, I. (2002) The decay of chlorine associated with the pipe wall in water distribution systems. *Water Research*, **36**, 3479-3488.
25. Fujiwara, O. and Khang, D.B. (1990) A two phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks. *Water Resources Research*, **26** (4), 572-581.
26. Zhang, G.R., Kiene, L., Wable, O., Chan, U.S. and Duguet, J.P. (1992) Modeling of chlorine residual in the water distribution network of Macao. *Environmental Technology*, **13** (10), 937-946.
27. Chambers, V.K., Creasey, J.D. and Joy, J.S. (1995) Modeling free and total chlorine decay in potable water distribution systems. *Water Supply, Research and Technology: Aqua*, **44** (2), 60-69.
28. Hallam, N.B., Hau, F., West, J.R., Forster, C.F. and Simms, J. (2003) Bulk decay of chlorine in water distribution systems. *Water Resources Planning and Management*, ASCE, **129** (1), 78-81.