

بهینه‌سازی میزان تزریق کلر در شبکه‌های آبرسانی توسط الگوریتم ژنتیک

عباس روزبهانی^۲

بهراد آزادی^۲

مسعود تابش^۱

(دریافت ۸۸/۱/۲۸ پذیرش ۸۹/۲/۱۷)

چکیده

با افزایش جمعیت و گسترش تنوع فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی، تأمین آب از لحاظ کیفی و کمی روز به روز با دشواری بیشتری همراه می‌شود. گندزدایی و کشتن باکتری‌های موجود در آب که ممکن است به صورت شیمیایی و یا فیزیکی انجام گیرد، کمترین تصفیه‌ای است که در هر شبکه آبرسانی شهری باید به اجرا در آید. آب آشامیدنی به روش‌های مختلفی گندزدایی می‌شود که متداول‌ترین و ارزان‌ترین روش آن، کلرزنی است. یکی از مهم‌ترین مسائل در زمینه کلرزنی، مکان و میزان تزریق کلر است که باید به گونه‌ای انتخاب شود که میزان کلر باقیمانده در کلیه نقاط یک شبکه توزیع آب شهری در محدوده استاندارد بوده و همچنین هزینه‌های مربوطه حداقل گردد. مقدار حداقل کلر باقیمانده به منظور کنترل کیفیت میکروبی آب و مقدار حداکثر آن به منظور کنترل مشکلات مربوط به مزه و بوی آب و همچنین جلوگیری از تولید فراورده‌های جانبی سمی باید رعایت شود. متأسفانه به دلیل عدم مدیریت صحیح در شبکه‌های توزیع آب کشور این مسئله گهگاه باعث بروز بحران‌های شدید می‌گردد. در این مقاله میزان تزریق کلر در محله‌های تزریق با تلفیق یک مدل تحلیل هیدرولیکی و مدل‌سازی کیفی EPANET و یک مدل بهینه‌سازی غیر خطی الگوریتم ژنتیک، بهینه شد. با حل دو مثال کاربردی از شبکه‌های آبرسانی نمونه، کارایی مدل در جهت تعیین میزان بهینه تزریق کلر نشان داده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که تزریق کلر در بیش از یک منبع و انتخاب صحیح این منابع، در رساندن مقادیر کلر باقیمانده در گره‌ها به مقدار استاندارد مؤثر است. همچنین نتایج مدل ارائه شده حاکی از کاهش کلر مصرفی در شبکه و افزایش درصد قرار گرفتن مقادیر کلر باقیمانده شبکه در محدوده استاندارد بود.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های توزیع آب، میزان کلر باقیمانده، تحلیل کیفی، EPANET، الگوریتم ژنتیک

Optimization of Chlorine Injection Dosage in Water Distribution Networks Using a Genetic Algorithm

Masoud Tabesh¹

Behrad Azadi²

Abbas Rouzbahani³

(Received Apr. 18, 2009 Accepted May 7, 2010)

Abstract

Water supply management, both in terms of quality and quantity, is facing serious problems due to growing municipal, industrial, and agricultural demands. Disinfection and bacterial removal from water by chemical and/or physical treatment processes are the minimum requirements in any water distribution system. Disinfection can be performed in a variety of ways, the most common and cheapest being chlorination. Selecting proper injection points in the network and determining chlorine dosages are basic considerations in maintaining chlorine residual at standard levels at nodes across the network and minimizing operation costs. Minimum chlorine residual levels must be determined so as to prevent bacterial growth in water and maximum levels should not be exceeded in order to avoid customer complaints about taste and smell or to inhibit the formation of potentially toxic by-products. Improper water quality management with respect to chlorine residual levels has at times led to serious problems to occur in many parts of the world. In this paper, the EPANET software package capable of water quality and hydraulic simulations has been integrated with a Genetic Algorithm nonlinear optimization

1. Assoc. Prof., Center of Excellence for Infrastructure Eng. and Management, Dept. of Civil Eng., University of Tehran, Tehran (Corresponding Author) (+98 21) 66498981 mtabesh@ut.ac.ir
2. M.Sc. Student of Water Eng., Dept. of Civil Eng., University of Tehran, Tehran
3. Ph.D. Student of Water Eng., Dept. of Civil Eng., University of Tehran, Tehran

- ۱- دانشیار و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌ها، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) ۶۶۴۹۸۹۸۱ (۰۲۱) mtabesh@ut.ac.ir
- ۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران - آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران
- ۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران - آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

model to derive a combined model for optimizing chlorine dosage. Two real-life examples adapted from water distribution networks have been used to verify the efficiency of the proposed model in determining optimal chlorine dosage. The results indicate that chlorine residual at nodes in water supply networks can be maintained at standard levels if chlorine injection is accomplished in more than one reservoir and if these reservoirs as injection points are properly selected. Application of the model led to a decrease in the total chlorine consumption and to an increase in the number of nodes where chlorine residual met the standard.

Keywords: Water Distribution Networks, Residual Chlorine, Quality Analysis, EPANET, Genetic Algorithm.

۱- مقدمه

کمترین تصفیه‌ای که برای منابع آب شرب در نظر گرفته می‌شود، گندزدایی آب است. از بین گندزدهای مختلف، کلر و مشتقات آن به دلیل پایین بودن هزینه نسبی، سهولت کاربرد و قابلیت مناسب از بین بردن میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا در شبکه‌های توزیع آب آشامیدنی، به‌طور گسترده به‌کار می‌رود. همان‌طور که آب حاوی کلر در داخل لوله‌های سیستم شبکه توزیع حرکت می‌کند، همزمان با مواد مختلف موجود در حجم آب و دیواره لوله واکنش داده و مقدار آن در شبکه کاهش می‌یابد [۱]. واکنش‌های کلر عبارت‌اند از واکنش با عناصر موجود در جریان حجمی و واکنش با رسوبات موجود روی جداره لوله‌ها که در کل شبکه موجوداند. بنابر تعریف، میزان کلر آزاد باقیمانده، مقدار کلر مؤثری است که باید در هر نقطه از شبکه آب آشامیدنی موجود باشد. مسئله مهم در مدیریت کیفی شبکه‌های آبرسانی، کنترل کردن این میزان کلر باقیمانده در یک بازه استاندارد در کلیه نقاط شبکه است. مقدار حداقل غلظت کلر باقیمانده 0.2 میلی‌گرم در لیتر است که باید به‌منظور کنترل رشد میکروب‌های پاتوژنیک رعایت شود و مقدار حداکثر آن بسته به pH بین $0.8-0.5$ میلی‌گرم در لیتر متغیر است و باید بو و مزه و از آن مهم‌تر سُمی بودن آن کنترل شود [۲].

در بسیاری از سیستم‌های آب، تزریق کلر در تصفیه‌خانه‌ها و منابع آب آشامیدنی قبل از ورود آب به شبکه صورت می‌گیرد که این امر باعث وجود غلظت بیش از اندازه کلر باقیمانده در گره‌های نزدیک به مخازن ذخیره و عدم وجود میزان کلر باقیمانده مناسب در گره‌های انتهایی شبکه در برخی از ساعات می‌شود. برای رفع این مشکل می‌توان از بوستر پمپ‌های تزریق کلر در مکان‌های مورد نیاز استفاده نمود. میزان تزریق کلر می‌تواند به‌صورت غلظت کلر بر حسب میلی‌گرم در لیتر و یا به‌صورت نرخ جرمی بر حسب میلی‌گرم بر دقیقه از طریق مخازن ذخیره ذکر شده وارد سیستم شوند. برای مدیریت کیفی آب در شبکه‌های آبرسانی، تعیین مکان و میزان تزریق در شبکه به‌طوری‌که غلظت در تمامی نقاط شبکه در بازه مشخص شده باشد، لازم و ضروری به نظر می‌رسد. برای این‌کار می‌توان با روش سعی و خطا به‌میزان تزریق مناسب رسید که به‌خصوص در شبکه‌های بزرگ، بسیار خسته‌کننده و وقت‌گیر بوده و همچنین احتمال رسیدن به جواب بهینه بسیار ناچیز است. بنابراین

استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی کاملاً لازم و ضروری است. مطالعات دیگری در سالهای قبل در این راستا صورت گرفته است. به‌عنوان مثال بوسلی و همکاران^۱ با تابع هدف خطی و اعمال محدودیتهای مناسب به‌منظور قرار گرفتن غلظت در کلیه نقاط شبکه در بازه مشخص با استفاده از تزریق در بوستر پمپ‌ها، میزان کلر مصرفی تزریق شده را به‌روش بهینه‌سازی خطی بهینه کردند [۳]. روحیان و همکاران^۲ توسط تابع هدف دوگانه، بهینه‌سازی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام داده‌اند. تابع هدف دوگانه یکی به‌منظور کنترل گندزدایی کلر (بزرگ‌تر بودن غلظتها از مقدار حداقل) و دیگری به‌منظور کنترل بو و مزه برای زمانی که غلظت کلر باقیمانده از مقدار حداکثر استاندارد بیشتر شود، مورد استفاده قرار گرفته است [۴]. موناوالی^۳ و موهان کومار^۴ با استفاده از تابع هدف غیر خطی توسط الگوریتم ژنتیک، میزان تزریق کلر را در شبکه‌های دارای چند مخزن ذخیره بهینه کرده‌اند. همچنین ایشان با استفاده از روش سعی و خطا به انتخاب مکان مناسب برای تزریق کلر در شبکه نیز پرداختند [۵]. برود و همکاران^۵ طرح توسعه سیستم توزیع آب شهر نیویورک را به‌عنوان مطالعه موردی بررسی کردند. در این مطالعه سعی شده است تا تزریق کیفی تنها از نقطه ورودی به شبکه انجام شود و عمل بهینه‌سازی بر روی مقدار این تزریق صورت گیرد [۶]. گیبس و همکاران^۶ برای تعیین میزان مناسب تزریق کلر در شبکه‌های آبرسانی به بررسی میزان اضمحلال کلر در شبکه پرداختند. به این ترتیب که با استفاده از روشهای رگرسیون خطی ساده، شبکه‌های عصبی چند لایه و همچنین روش رگرسیون شبکه عصبی و به‌کارگیری پارامترهای هیدرولیکی شبکه، میزان غلظت کلر باقیمانده را در شبکه آبرسانی پیش‌بینی نمودند [۷].

مقاله حاضر دارای ویژگی‌های خاصی در مقایسه با مطالعات گذشته است. در این مقاله از بهینه‌سازی غیرخطی استفاده شد و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، میزان تزریق در مخازن که به‌عنوان

¹ Boccelli et al.

² Rouhianian et al.

³ Munavalli

⁴ Mohan Kumar

⁵ Broad

⁶ Gibbs et al.

غلظت یک ماده در آب خروجی از انشعاب برابر است با مجموع وزنی غلظت جریان لوله‌های ورودی به آن. در نتیجه غلظت کلر ناشی از اختلاط کامل در گره j در زمان k به صورت زیر به دست می‌آید

$$C_{jk} = \left(\frac{\sum_{i=1}^I Q_i c_i | (x = L_i) + Q_E C_E}{\sum_{i=1}^I Q_i + Q_E} \right) \quad (2)$$

که در آن

N ، i ، تعداد لوله‌های ورودی به گره j ، L_i طول لوله i ، m^3/s تعداد کل گره‌های موجود در شبکه، Q_i دبی در لوله i بر حسب m^3/s و Q_E دبی ورودی به شبکه در گره j بر حسب m^3/s و C_E غلظت کلر ورودی به شبکه در گره j بر حسب mg/L است. مدل کیفی شبکه آب به صورت عددی توسط روش زمانمند لاگرانژی (LTDM) لیو^۳ و کروون^۴ حل می‌شود [۹]. این روش، شیوه‌ای قوی و بسیار مناسب برای محاسبه تغییرات غلظت کلر و بازه‌های زمانی کیفی است. در نهایت این مدل تلفیقی آنالیز دینامیکی کیفی آب، مدل‌های هیدرولیکی و کیفی مذکور را با هم ترکیب می‌کند.

۴- مدل بهینه‌سازی

روش بهینه‌سازی به کار رفته در این تحقیق، الگوریتم ژنتیک بود. این روش در مسائل بهینه‌سازی بسیاری از شبکه‌های توزیع آب توسط محققان گوناگون همچون ساویچ^۵ و والتز^۶، ریس و همکاران^۷، دندی و همکاران^۸، موناوالی و موهان کومار، روحیان و همکاران و بهزادیان و اردشیر به کار گرفته شده است [۴، ۵، ۱۰-۱۳]. الگوریتم ژنتیک، ابزاری قوی و بسیار جامع به منظور بهینه‌سازی است که در مقایسه با بسیاری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر، کاهش قابل ملاحظه‌ای در زمان محاسبه مسائل بهینه‌سازی ایجاد کرده است. در اینجا متغیر تصمیم، میزان تزریق در مخازن ذخیره است. مقدار تابع برازندگی بر اساس مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود و قیود بر اساس قرار گرفتن غلظت کلر باقیمانده در بازه بین بیشترین و کمترین مقدار استاندارد، تنظیم می‌شود. در تشکیل تابع هدف دو نکته مد نظر قرار گرفت: یکی نزدیک شدن مقدار کلر باقیمانده در تمامی گره‌ها به غلظت مینیمم و دیگری وزن دادن به هر گره بر اساس میزان مصرف آن گره در تمامی ساعات شبانه روز. در این مدل، تحلیل هیدرولیکی شبکه به صورت

مخازن ذخیره در نظر گرفته شده‌اند، به نحوی بهینه شد که غلظت کلر در کلیه گره‌های شبکه در تمامی ساعات شبانه روز از مقدار حداقل استاندارد (0.2 میلی‌گرم در لیتر) کمتر نشود. در واقع کلیه مخازن و گره‌های شبکه از نظر تزریق کلر مورد ارزیابی قرار گرفتند. همچنین در تابع هدف به کار رفته در الگوریتم ژنتیک، تغییراتی در جهت اعمال وزن دهی به گره‌ها بر اساس میزان مصرف آنها در مقایسه با توابع به کار گرفته شده در گذشته، اعمال شد. به علاوه محل و میزان تزریق به طور توأم از بین منابع موجود مشخص گردید. برای بررسی روشهای ارائه شده در این تحقیق، دو نمونه از شبکه‌های آبرسانی مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مدل هیدرولیکی شبکه

مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی، بار آبی انشعابات و دبی لوله‌ها را برای یک سری ثابت از سطوح آب مخزن، سطوح آب تانک و مصارف آب در نقاط متوالی بر حسب زمان محاسبه می‌کند. از یک گام زمانی به گام زمانی دیگر، سطوح آب مخزن و مصارف گره‌ای مطابق با الگوهای زمانی از پیش تعیین شده آنها به هنگام می‌شوند. مقادیر بارها و دبی‌ها در یک نقطه خاص بر حسب زمان، متضمن حل همزمان معادله بقای جریان برای هر انشعاب و رابطه افت اصطکاک در طول هر لوله موجود در شبکه است. این فرایند که تعادل هیدرولیکی نامیده می‌شود، نیاز به استفاده از یک تکنیک تکراری برای حل معادلات خطی غیر حاکم دارد. روش مورد استفاده برای حل معادلات پیوستگی و افت اصطکاک که حالت هیدرولیکی شبکه را در یک نقطه نسبت به زمان مشخص می‌کند، می‌توان روش دوگانه^۱ گره-حلقه یا روش گرادیان نامید که امروزه این روش مبنای شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه‌های جریان در بسیاری از نرم افزارهای معتبر، موجود است.

۳- مدل دینامیکی کیفی شبکه

معادله انتقال همرفتی مواد گندزدایی کننده در طول لوله i در یک شبکه توزیع آب به صورت معادله انتقال کلاسیک در زیر آمده است

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

که در آن c_i غلظت کلر در لوله، i تابعی از زمان و مکان بر حسب mg/L ، u_i سرعت جریان در لوله i بر حسب m/s و $R(c_i)$ بیانگر نرخ واکنش است که $R(c_i)$ برای کلر توسط راسمن^۲ معین گردید [۸].

در انشعابات دریافت کننده جریان ورودی از دو یا چند لوله، اختلاط سیال به صورت کامل و آنی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین

³ Liou

⁴ Kroon

⁵ Savic

⁶ Walters

⁷ Reis et al.

⁸ Dandy et al.

¹ Hybrid

² Rossman

مقدار حداکثر غلظت مجاز در شبکه بر حسب mg/L و Q_{jk} مقدار مصرف در گره j و در زمان k است.

۴-۲- معرفی قیود در قالب توابع جریمه

در روش الگوریتم ژنتیک، قیود، به صورت توابعی به نام جریمه در محاسبات مربوط به تابع هدف دخالت داده می‌شوند. شکل کلی به کار بردن این توابع بر حسب نوع متغیرها و شرایط هر سیستم متفاوت است. رابطه ۵، صورت جدید تابع هدف و توابع جریمه را نشان می‌دهد

(۵)

$$\begin{aligned} \text{Min } E = & \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{N_j} \left[\left(\left| Q_{jk} \right| / \sum \left| Q_{jk} \right| \right) \left(\frac{C_{jk} - C_{\min}}{C_{\max}} \right)^2 \right] \\ & + \frac{\left| \text{Max}(C_{jk}) - \text{Min}(C_{jk}) \right|}{\left(\frac{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{N_j} C_{jk}}{M} \right)} \\ & + \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{N_j} \left[\frac{P_1 [\max(0, C_{\min} - C_{n_{jk}})]^2}{C_{\max}} \right] \\ & + \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{N_j} \left[\frac{P_2 [\max(0, C_{jk} - C_{\max})]^2}{C_{\max}} \right] \end{aligned}$$

که در آن P_1 و P_2 ضرایب جریمه برای تجاوز از قیود مربوطه است و سایر متغیرها هم در تابع هدف معرفی گردیده‌اند. جمله دوم نشان دهنده دامنه تغییرات کلر باقیمانده در شبکه به میانگین کلر باقیمانده در شبکه است و ویرایش‌های مختلف این عبارت با نام ضریب تغییرات در تحلیلهای آماری مورد استفاده قرار می‌گیرد. این عبارت به یکسان‌سازی غلظت کلر باقیمانده در شبکه کمک می‌کند، به عبارت دیگر این جمله باعث می‌شود که غلظت کلر باقیمانده به یک مقدار میانگین میل کرده و یا در یک فاصله مشخصی از میانگین قرار بگیرد. به هر صورت در نظر گرفتن چنین عبارتی در تابع هدف به قرار گرفتن مقادیر کلر باقیمانده در دامنه مجاز کمک می‌کند. جملات سوم و چهارم باعث می‌شوند که غلظت کلر باقیمانده تا حد امکان در دامنه مجاز قرار گرفته و ترکیب این جملات با جمله دوم در یک تابع هدف به قرار گرفتن غلظت کلر باقیمانده در دامنه مجاز کمک می‌کنند. جمله اول نیز شامل ضریبی

به صورت $\left(\frac{\left| Q_{jk} \right|}{\sum \left| Q_{jk} \right|} \right)$ است که نشان دهنده اهمیت گره مورد نظر در شبکه از نظر میزان مصرف می‌باشد و به هر گره بر حسب تعداد

دینامیکی در بازه زمانی مورد نظر انجام می‌گردد. میزان تزریق در مخازن ذخیره شبکه به دو صورت در نظر گرفته می‌شود: ابتدا تزریق با نرخ ثابت در مخازن ذخیره برای تمامی ساعات و در مرحله بعد تزریق به صورت پریودیک در شبکه.

بوسلی و همکاران عملکرد پریودیک کیفی آب را به صورت کامل شرح داده‌اند. مدت دوره زمانی در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی، بستگی به زمان شروع به تکرار الگوی زمانی تزریق در گره‌های کنترل شونده در شبکه دارد. هدف از این مدل بهینه‌سازی به دست آوردن میزان تزریق‌های پریودیک مناسب برای تمامی منابع تزریق کیفی در شبکه است. اگر $N(s)$ تعداد منابع تزریق کیفی آب باشد و $N(s)$ تعداد میزان تزریق‌های پریودیک در منبع تزریق کیفی s باشد، S_s^{ks} ، k_s امین میزان تزریق در منبع تزریق کیفی s و $N_{cl} = \sum_{s=1}^{N_s} N(s)$ تعداد کل میزان تزریق‌های همه منابع است. متغیرهای تصمیم، مقادیر تزریق در هر کدام از مخازن ذخیره در دوره‌های زمانی مشخص هستند که میزان بهینه آنها مربوط به زمانی می‌شود که غلظت کلر باقیمانده در گره‌های شبکه در بازه استاندارد بوده و تا حد ممکن کمترین اختلاف را با میثیم غلظت استاندارد داشته باشد.

۴-۱- تابع هدف و ساختار آن

از آنجایی که وجود بیش از حد مجاز کلر باقیمانده در شبکه سمی است، ضرورت کنترل میزان کلر باقیمانده در تمامی نقاط شبکه، نزدیک به حد مینیمم مجاز بدون آنکه از این حد کمتر شود مشخص شد. تابع هدف در اینجا به گونه‌ای تدوین شد که مربع تفاضل بین غلظت محاسبه شده برای هر کدام از گره‌های کنترل شونده و مقدار حداقل مجاز میزان کلر باقیمانده در تمامی ساعات کمینه شود. همچنین در این تابع، میزان اهمیت هر کدام از گره‌های موجود در شبکه بر حسب میزان مصرف آنها از طریق وزن دادن به آنها تأثیر داده شد. همانطور که اشاره شد متغیرهای تصمیم، میزان بهینه دزهای تزریق در مخازن ذخیره هستند. به این ترتیب تابع هدف مسئله عبارت است از

$$\text{Min } E = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{N_j} \left[\left(\left| Q_{jk} \right| / \sum \left| Q_{jk} \right| \right) \left(\frac{C_{jk} - C_{\min}}{C_{\max}} \right)^2 \right] \quad (۳)$$

Subject to:

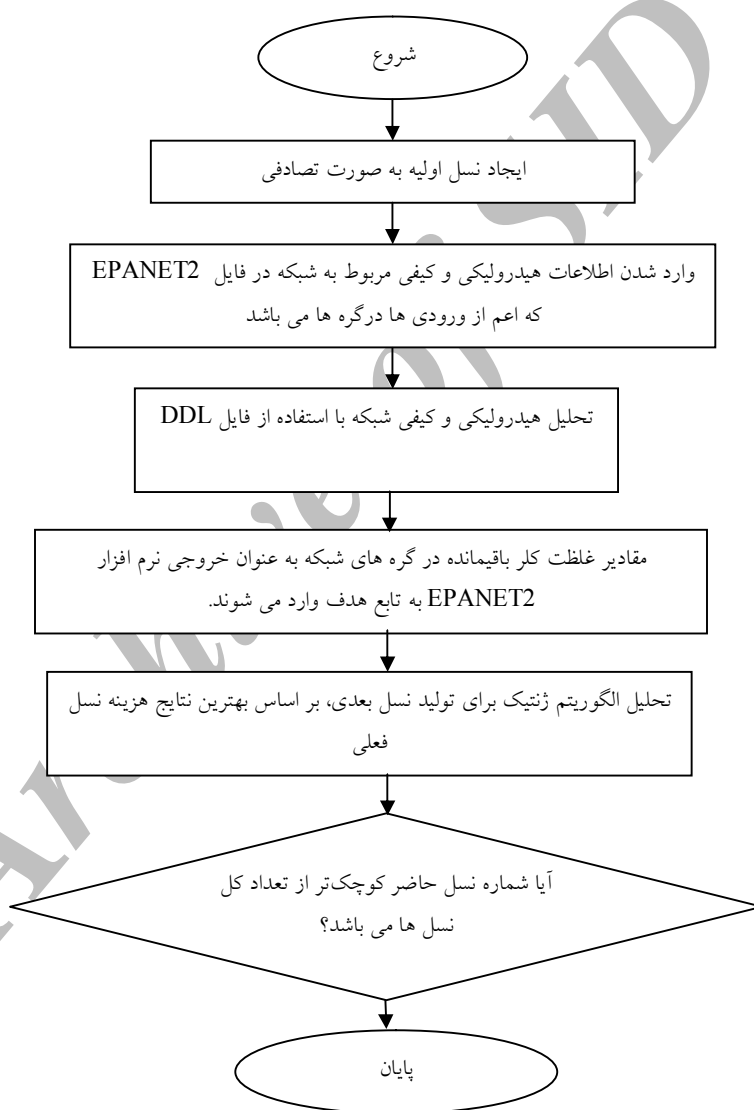
$$\begin{aligned} C_{\min} & \leq C_{jk} \leq C_{\max} \\ j & = 1, \dots, M; \quad k = 1, \dots, N_j \end{aligned} \quad (۴)$$

که در آن

M تعداد گره‌های کنترل شونده، N_j تعداد زمان‌های کنترل در گره j ، C_{\min} مقدار حداقل غلظت مجاز در شبکه بر حسب mg/L ، C_{\max}

می‌شوند. همچنین ارتباط بین این دو نرم افزار توسط برنامه‌ای است که در نرم‌افزار MATLAB7 نوشته شده است که مقادیر مصرف و غلظت‌های کلر در گره‌های کنترل شونده را از نرم‌افزار EPANET2 دریافت کرده و وارد الگوریتم ژنتیک می‌کند و خروجی‌های الگوریتم ژنتیک که همان مقادیر تزریق در مخازن ذخیره هستند را به EPANET2 وارد می‌کند که این کار تا پیدا شدن و همگرا شدن به جواب بهینه به‌طور مرتب تکرار می‌شود. شکل ۱ الگوریتم این کار را نشان می‌دهد.

جمعیت مصرف کننده وزن می‌دهد. در حقیقت میزان مصرف به‌صورت ضمنی نشان دهنده چگالی جمعیت در آن گره و به‌دنبال آن، اهمیت آن گره از دید ملاحظات اجتماعی است. به این ترتیب محدودیتها در تابع هدف ادغام شده و این تابع هدف جدید باید توسط الگوریتم ژنتیک بهینه شود. برای محاسبه این تابع هدف و اعمال محدودیت‌های ذکر شده، مدل دینامیکی کیفی آب باید برای هر کدام از اعضای جمعیت یکبار تحلیل شود که اینکار به‌وسیله نرم‌افزار EPANET2 انجام می‌شود و نتایج به‌وسیله الگوریتم ژنتیکی که در نرم‌افزار MATLAB7 نوشته شده است بررسی

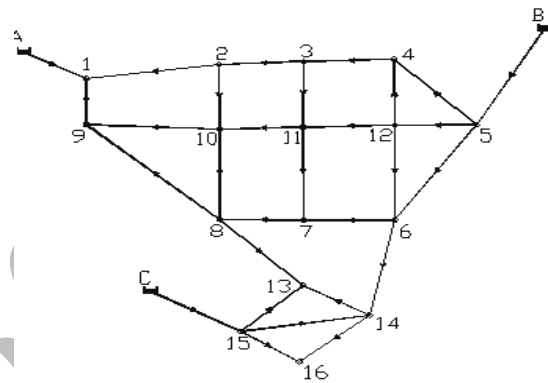


شکل ۱- الگوریتم بهینه سازی میزان تزریق

۵- شبکه‌های مورد بررسی

۱-۵- مثال اول

اولین شبکه‌ای که در این مقاله به آن اشاره شد، یک شبکه کوچک با سه مخزن توزیع آب بود که تزریق کلر به صورت تغلیظی بر حسب میلی‌گرم در لیتر در مخازن آن در حالت‌های مختلف انجام شد و در ادامه نتایج حاصله بررسی گردید (شکل ۲). در این شبکه ضریب واکنش حجمی از درجه اول برابر با $1 d^{-1}$ و ضریب واکنش از درجه اول با جداره لوله برابر با صفر در نظر گرفته شد. همچنین مشخصات شبکه نمونه در جدول‌های ۱ تا ۴ مشخص شده‌اند.



شکل ۲- شبکه آبرسانی مثال اول

جدول ۲- مشخصات مخازن مثال اول

مخزن	ارتفاع (متر)
A	۳۸۸/۶۲
B	۳۹۶/۲۴
C	۳۹۰/۱۴

جدول ۳- الگوی زمانی مصرف در مثال اول

ساعت	الگوی زمانی مصرف
۰	۰/۶۳
۱	۰/۵۹
۲	۰/۵۵
۳	۰/۶
۴	۰/۷۱
۵	۰/۸۱
۶	۱/۰۲
۷	۱/۲۳
۸	۱/۳۲
۹	۱/۳
۱۰	۱/۱۹
۱۱	۱/۰۸
۱۲	۰/۹۸
۱۳	۰/۸۷
۱۴	۰/۸۵
۱۵	۱/۰۴
۱۶	۱/۱۵
۱۷	۱/۲۵
۱۸	۱/۵
۱۹	۱/۴۶
۲۰	۱/۳۴
۲۱	۱/۲۷
۲۲	۱/۱۱
۲۳	۰/۷۴

جدول ۱- مشخصات گره‌های مثال اول

شماره گره	ارتفاع (متر)	مصرف (سانتی‌متر)
۱	۳۴۰/۳۷	۰
۲	۳۳۵/۲۸	۰
۳	۳۲۹/۱۸	۰
۴	۳۳۰/۱	۰/۰۳۱
۵	۳۵۰/۵۲	۰
۶	۳۲۹/۱۸	۰/۰۲۵
۷	۳۳۰/۷	۰
۸	۳۲۷/۹۶	۰
۹	۳۳۵/۲۸	۰/۰۳۸
۱۰	۳۲۹/۱۸	۰
۱۱	۳۲۹/۱۸	۰/۰۴۴
۱۲	۳۳۵/۲۸	۰
۱۳	۳۳۱	۰/۰۳۱
۱۴	۳۲۹/۱۸	۰/۰۳۸
۱۵	۳۳۸/۳۲	۰/۰۲۵
۱۶	۳۲۷/۳۵	۰/۰۳۱

۵-۱-۱- بررسی حالت‌های مختلف تزریق در مخازن ذخیره

همانگونه که گفته شد، هدف نهایی این تحقیق قرار گرفتن غلظت کلر باقیمانده در کلیه نقاط شبکه در بازه استاندارد بود. در این شبکه با فرض اینکه تزریق کلر فقط در مخازن آب صورت می‌گیرد با بررسی حالات مختلف در نهایت میزان تزریق بهینه به دست آمد. این حالتها عبارت‌اند از: الف- تزریق در یک مخزن ذخیره، ب- دو مخزن ذخیره، ج- سه مخزن ذخیره.

الف- تزریق در یک مخزن ذخیره: در بسیاری از شبکه‌های موجود، تزریق کلر فقط در یک نقطه قبل از ورود آب به شبکه صورت می‌گیرد. در نتیجه در بسیاری از موارد مشاهده می‌شود که در برخی از ساعات شبانه روز گره‌هایی که در اول شبکه قرار دارند دارای غلظت‌های بیش از اندازه مجاز کلر می‌شوند و گره‌های انتهایی شبکه دچار کمبود میزان کلر هستند. در این قسمت، تزریق با دز ثابت برای تمامی ساعات فقط در مخزن B که به دلیل شرایط هیدرولیکی

جدول ۴- مشخصات لوله‌های شبکه مثال اول

شماره لوله	گره ۱	گره ۲	طول (متر)	قطر (سانتی‌متر)	ضریب زبری
۱	۱	۲	۲۷۴۳/۲	۲۵/۴	۱۳۰
۲	۲	۳	۱۸۲۸/۸	۲۰/۳	۱۳۰
۳	۳	۴	۲۱۹۴/۵۶	۲۵/۴	۱۲۰
۴	۴	۵	۳۵۷۶/۶	۲۵/۴	۱۲۰
۵	۵	۶	۵۱۲۰/۶۴	۲۵/۴	۱۲۰
۶	۶	۷	۲۰۱۱/۶۸	۱۵/۲	۱۲۰
۷	۷	۸	۱۸۲۸/۸	۲۰/۳	۱۲۰
۸	۸	۹	۴۵۷۲	۱۰/۲	۱۲۰
۹	۹	۱۰	۱۵۲۴	۲۵/۴	۱۰۰
۱۰	۹	۱۰	۲۳۷۷/۴۴	۱۵/۲	۱۰۰
۱۱	۱۰	۱۱	۲۳۷۷/۴۴	۱۵/۲	۱۰۰
۱۳	۱۲	۵	۱۸۲۸/۸	۳۰/۵	۱۳۰
۱۴	۱۰	۸	۲۹۲۶/۰۸	۱۵/۲	۱۲۰
۱۵	۲	۱۰	۲۰۱۱/۶۸	۱۵/۲	۱۲۰
۱۶	۱۱	۷	۲۹۲۶/۰۸	۱۵/۲	۱۲۰
۱۸	۶	۱۲	۲۹۲۶/۰۸	۱۵/۲	۱۲۰
۱۹	۱۲	۴	۲۳۷۷/۴۴	۱۵/۲	۱۲۰
۲۰	۱۳	۱۴	۱۸۲۸/۸	۱۰/۲	۱۳۰
۲۱	۱۳	۱۵	۲۱۹۴/۵۶	۲۰/۳	۱۲۰
۲۲	۱۴	۱۶	۱۸۸۹/۷۶	۲۰/۳	۱۲۰
۲۳	۱۶	۱۵	۲۰۱۱/۶۸	۲۰/۳	۱۲۰
۲۴	۱۵	۱۴	۳۲۹۱/۸۴	۲۵/۴	۱۲۰
۲۸	۱۴	۶	۲۰۱۱/۶۸	۳۰/۵	۱۲۰
۱۷	۳	۱۱	۲۱۹۴/۵۶	۱۵/۲	۱۳۰
۱۲	۱۱	۱۲	۲۰۱۱/۶۸	۲۵/۴	۱۳۰
۲۹	۱۳	۸	۳۰۴/۸	۲۰/۳	۱۰۰
۲۶	۱	۱۷	۳۰۷/۸۵	۳۰/۵	۱۰۰
۲۷	۵	۱۸	۶۱۲/۶۵	۴۰/۶	۱۰۰
۳۰	۱۵	۱۵	۳۰۴/۸	۴۰/۶	۱۰۰

از نظر انتشار کلر در شبکه از دو مخزن دیگر مناسب‌تر است، صورت گرفت که نتایج در جدول ۵ نشان داده شده است. همانطور که جدول نشان می‌دهد، میزان تزریق در این مخزن به‌گونه‌ای بود که غلظت اولین گره بعد از مخزن B (گره ۵) برابر با بیشترین مقدار مجاز (۰/۵ mg/L) شود. همانگونه که مشاهده می‌شود در گره‌های ۱، ۲، ۹، ۱۰، ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶ به‌علت شرایط هیدرولیکی شبکه و دوری از منبع تزریق کیفی، غلظت کلر باقیمانده کمتر از حداقل غلظت مجاز (۰/۲ mg/L) بود. در نتیجه نیاز به مخزن یا مخازن ذخیره بیشتر برای تزریق کلر به‌منظور رسیدن کلر باقیمانده گره‌ها به میزان استاندارد کاملاً مشهود است. بنابراین تزریق کلر با دز ثابت تنها در یک نقطه، وجود غلظت کلر باقیمانده در گره‌ها را در محدوده مجاز تضمین نمی‌کند.

ب- تزریق در دو مخزن ذخیره: در اینجا تزریق با نرخ ثابت در تمامی ساعات در دو مخازن ذخیره (A,B) و (C,B) به‌گونه‌ای که با توجه به جدولهای ۶ و ۷، غلظت اولین گره بعد از مخازن ذخیره برابر با بیشترین مقدار مجاز (۰/۵ mg/L) شود، صورت گرفت اما با این وجود مشاهده می‌شود که در حالت تزریق در مخازن ذخیره (B,A)، غلظت در گره‌های ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶ و در حالت تزریق در مخازن ذخیره (C,B)، غلظت در گره‌های ۱، ۲، ۹، ۱۰ کمتر از حداقل مجاز یعنی ۰/۲ میلی‌گرم در لیتر است (جدولهای ۶ و ۷). در این حالت نیز مانند حالت تغذیه در یک مخزن ذخیره مشاهده می‌شود که با وجود میزان تزریق حداکثر در دو مخزن ذخیره، باز هم برخی از گره‌ها در بازه مورد نظر قرار نمی‌گیرند.

جدول ۵- تزریق در مخزن ذخیره A

شماره گره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
غلظت (میلی‌گرم در لیتر)	۰	۰	۰/۲۸	۰/۴۷	۰/۵	۰/۴۶	۰/۳۲	۰/۲۲	۰	۰	۰/۴۳	۰/۴۸	۰/۰۷	۰/۱۹	۰	۰/۰۳

جدول ۶- تزریق در مخازن ذخیره B, A

شماره گره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
غلظت (میلی‌گرم در لیتر)	۰/۴۹	۰/۴۲	۰/۲۸	۰/۴۶	۰/۵	۰/۴۶	۰/۳۵	۰/۳۴	۰/۴۶	۰/۴۱	۰/۴۶	۰/۴۸	۰/۱۱	۰/۱۹	۰	۰/۰۳

جدول ۷- تزریق در مخازن ذخیره C, B

شماره گره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
غلظت (میلی‌گرم در لیتر)	۰	۰	۰/۲۸	۰/۴۶	۰/۵	۰/۴۶	۰/۴۳	۰/۳۲	۰/۲۱	۰	۰	۰/۴۸	۰/۳۸	۰/۴۴	۰/۴۹	۰/۴۵

جدول ۱۰- میزان تزریق بهینه در سه مخزن با نرخ متغیر برای چهار دوره زمانی شش ساعته (mg/L)

شماره مخزن ذخیره	A	B	C
میزان تزریق در دوره زمانی اول (۱۲-۱۸)	۰/۲۳۱	۰/۴۵۹	۰/۲۲۴
میزان تزریق در دوره زمانی دوم (۱۸-۲۴)	۰/۲۷۴	۰/۴۵	۰/۲۳۱
میزان تزریق در دوره زمانی سوم (۲۴-۶)	۰/۲۴۲	۰/۴۵۹	۰/۲۰۸
میزان تزریق در دوره زمانی چهارم (۶-۱۲)	۰/۲۷۴	۰/۴۳۶	۰/۲۱

جدول ۱۱- پارامترهای الگوریتم ژنتیک برای تزریق پریودیک

پارامترهای الگوریتم ژنتیک	مقدار
اندازه جمعیت	۷۰
تعداد نسل	۶۰۰
احتمال تزیوج	۰/۸
احتمال جهش	۰/۰۰۱۵

شده‌اند. با بررسی میزان دزهای تزریق پریودیک به‌دست آمده از الگوریتم ژنتیک در این سناریو در مقایسه با تزریق به‌صورت ثابت مشخص می‌شود که میزان کلر مصرفی کل شبکه در حالت تزریق با میزان متغیر کاهش یافته است. نکته دیگر اینکه در شبکه‌های بزرگ اگر تزریق با میزان ثابت انجام شود در بعضی ساعات در بعضی از گره‌ها میزان کلر باقیمانده خارج از بازه استاندارد می‌شود که این مسئله تا حد زیادی با تزریق با میزان متغیر می‌تواند برطرف شود.

۵-۲- مثال دوم

در این قسمت برای نشان دادن قابلیت مدل تلفیقی ارائه شده در این مقاله مطالعه‌ای بر روی شبکه آبرسانی واقع در منطقه جنوب ایالت کانکتیکوت مرکزی^۱ در ناحیه Cherry Hill/Brushy در شهر برندفورد^۲ صورت گرفته است که مشخصات هیدرولیکی این شبکه در تحقیقات قبلی مانند تحقیق بوسلی و همکاران نشان داده است [۳] (شکل ۳). این شبکه دارای ۳۶ گره بود که گره‌های شماره ۱ و ۳۶ به ترتیب ایستگاه پمپاژ واقع در اول شبکه و تانک ذخیره موجود در شبکه بودند. تانک ذخیره از نوع استوانه‌ای با قطر ۵۰ فوت و سطح آب آن حداقل ۵۰ و حداکثر ۷۰ فوت از کف تانک بود. همچنین تزریق کلر در این شبکه فقط توسط بوستر پمپ‌های تزریق کلر و به‌صورت تزریق جرمی^۳ بر حسب گرم بر دقیقه در شبکه صورت می‌گرفت. بوسلی و همکاران و موناوالی و موهان کومار در تحقیقاتشان به‌منظور بهینه‌سازی کیفی این شبکه، نحوه چیدمان بوستر پمپ‌ها را با روش سعی و خطایی به‌صورت دستی انجام

¹ South Central Connecticut (SCC)

² Branford

³ Mass Booster

ج- تزریق در سه مخزن ذخیره: در این سناریو، تزریق در هر سه مخزن ذخیره A, B, C به دو صورت انجام گرفته و مقایسه می‌شوند:

۱- کلر با دز ثابت برای تمامی ساعات در سه مخزن ذخیره تزریق می‌شود که میزان تزریق توسط الگوریتم ژنتیک بهینه می‌گردد. این‌گونه تزریق به این معنی است که الگوی زمانی (Time Pattern) مربوط به تزریق ماده شیمیایی در شبکه برای تمامی ساعات ثابت است. میزان تزریق مناسب در هر سه مخزن ذخیره و پارامترهای الگوریتم ژنتیک مربوطه، در جدولهای ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند.

جدول ۸- میزان تزریق بهینه در سه مخزن با نرخ ثابت برای کلیه ساعات

شماره مخزن ذخیره	میزان تزریق (میلی‌گرم در لیتر)
A	۰/۲۸۱
B	۰/۴۶۷
C	۰/۲۳۹

جدول ۹- پارامترهای الگوریتم ژنتیک برای تزریق ثابت در سه مخزن

پارامترهای الگوریتم ژنتیک	مقدار
اندازه جمعیت	۵۰
تعداد نسل	۴۵۰
احتمال تزیوج	۰/۷
احتمال جهش	۰/۰۰۲

۲- در این مرحله تزریق به‌صورت پریودیک در شبکه در نظر گرفته می‌شود. همانطور که گفته شد، مدت دوره زمانی در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی، بستگی به زمان شروع به تکرار الگوی زمانی تزریق در گره‌های کنترل شونده در شبکه دارد. هدف از این حالت، به‌دست آوردن میزان تزریق‌های پریودیک مناسب برای تمامی منابع تزریق کیفی در شبکه به‌گونه‌ای است که در تمامی ساعات میزان کلر باقیمانده در بازه استاندارد قرار گیرد.

در این سناریو هر شبانه روز به چهار دوره زمانی شش ساعته برای تزریق تقسیم‌بندی شده است. مشاهده می‌شود که وجود مخزن ذخیره A برای کنترل میزان کلر باقیمانده در گره‌های ۱، ۲، ۹ و ۱۰ و وجود مخزن ذخیره C به‌منظور کنترل میزان غلظت کلر در گره‌های ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶ ضروری است. میزان تزریق‌های بهینه در شبکه در تمامی دوره‌های زمانی در جدول ۱۰ مشخص شده‌اند. همچنین پارامترهای الگوریتم ژنتیک در این حالت در جدول ۱۱ نشان داده شده است. همچنین به‌عنوان مثال با توجه به اینکه در این حالت تعداد متغیرهای تصمیم برای میزان تزریق کلر در ۳ مخزن و در طول ۴ دوره زمانی ۱۲ عدد است، در نتیجه کروموزوم‌ها در این حالت دارای ۱۲ ژن هستند که به‌صورت اعداد واقعی کدگذاری

جدول ۱۲- مقایسه میزان کلر مصرفی در شبکه در یک شبانه روز

میزان کلر مصرفی در تحقیق موناوالی و موهان کومار [۵] (gr/day)	میزان کلر مصرفی در این تحقیق (gr/day)
۲۱۶۱/۷	۱۳۷۰/۶۱

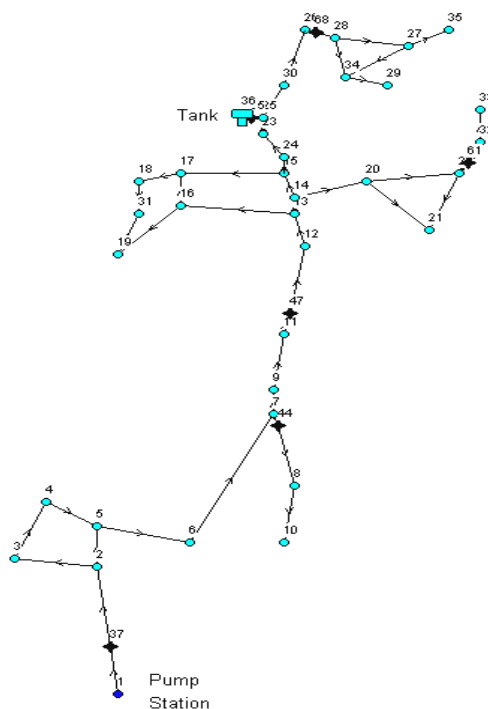
جدول ۱۳- مقایسه درصد گره‌ها با غلظت‌های کلر باقیمانده به دست آمده از اجراهای مختلف در شبکه

درصد گره‌های با غلظت های کلر باقیمانده کمتر از ۰/۸ (mg/L) در شبکه	درصد گره‌های با غلظت‌های کلر باقیمانده کمتر از ۰/۵ (mg/L) در شبکه	نوع تحقیق
۹۲	۶۶/۳	نتایج تحقیق موناوالی و موهان کومار [۵]
۱۰۰	۹۳/۱	نتایج حاصل از این تحقیق

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از تلفیق مدل شبیه ساز هیدرولیکی- کیفی با مدل بهینه سازی تدوین شده، راهکاری برای تعیین میزان بهینه تزریق کلر ارائه گردید. برای بررسی نتایج این روش، دو مثال کاربردی مطرح گردید. در مثال اول با بررسی تزریق کلر به صورت نرخ ثابت و متغیر در حالت‌های مختلف تک مخزنه، دو مخزنه و سه مخزنه این نتیجه حاصل شد که با افزایش تعداد نقاط تزریق کلر و انتخاب مناسب آنها در حالت تزریق با نرخ متغیر در طول شبانه روز، می‌توان درصد اطمینان قرار گرفتن میزان کلر باقیمانده در گره‌ها در محدوده استاندارد را افزایش داد. همچنین در شبکه ذکر شده در مثال دوم، شش بوستر پمپ برای تزریق کلر تعیین و عمل بهینه‌سازی صورت گرفت که با بررسی مقادیر به دست آمده مربوط به غلظت‌های کلر باقیمانده در شبکه و مقایسه آن با تحقیق صورت گرفته در گذشته بر روی همین شبکه، مشاهده شد که در مطالعه حاضر و در حالت تزریق کلر در شش بوستر پمپ تزریق، ۹۳/۱ درصد غلظت‌های کلر باقیمانده در بازه بین ۰/۲ تا ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر و ۱۰۰ درصد آنها پایین‌تر از ۰/۸ میلی‌گرم در لیتر قرار گرفته‌اند در حالی که در تحقیق گذشته، ۶۶/۳ درصد از مقادیر غلظت‌های کلر باقیمانده پایین‌تر از ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر و ۹۲ درصد کمتر از ۰/۸ میلی‌گرم در لیتر بوده است. همچنین مشاهده شد که میزان کلر مصرف شده در این تحقیق ۳۷ درصد کمتر از نتایج تحقیقات گذشته بود که این بهبودها ناشی از عواملی چون تغییر پارامترهای الگوریتم ژنتیک و همچنین تغییر قیود مسئله و

داده‌اند. این امر در نهایت به دو چیدمان مختلف منجر گردیده است که یکی از علت‌های تفاوت جواب‌های این دو تحقیق همین مورد است. روش سعی و خطا شاید در شبکه‌های کوچک بتواند تا حدی راهکار مناسبی باشد اما در شبکه‌های بزرگ به علت طولانی بودن زمان اجرا و تعداد حالت‌های زیاد سعی و خطا، این امر امکان پذیر نیست. همانطور که ملاحظه شد در مثال اول با تغییر تعداد منابع تزریق کلر این نتیجه حاصل شد که با افزایش تعداد مکان‌های تزریق، برآورده شدن هدف که قرار گرفتن کلر باقیمانده گره‌ها در بازه استاندارد است امکان پذیرتر می‌شود. در این مقاله تعداد ۶ گره ۳۷، ۴۴، ۴۷، ۶۱، ۶۵، ۶۸ برای تزریق کلر به صورت پر یودیک در نظر گرفته شد که این گره‌ها در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. در واقع با توجه به میزان تزریق در ۶ گره در طول ۴ دوره زمانی، تعداد متغیرهای تصمیم و در نتیجه تعداد ژن‌های هر کروموزوم در الگوریتم ژنتیک تدوین شده ۲۴ عدد بود. نتایج این تحقیق با مقادیر متناظر در تحقیق صورت گرفته توسط موناوالی و موهان کومار مقایسه شد [۵]. همانطور که جدول‌های ۱۲ و ۱۳ نشان می‌دهند، میزان کلر مصرفی در تحقیق حاضر به‌طور قابل توجهی کمتر و درصد گره‌های با غلظت کلر باقیمانده استاندارد نیز در طول دوره شبیه‌سازی بیشتر از مقادیر متناظر آن در مطالعه موناوالی و موهان کومار بر روی همین شبکه است [۵].



شکل ۳- گره‌های تزریق کلر در مثال دوم

طریق تعیین میزان تزریق کلر در شبکه برای حفظ بهداشت و کاهش هزینه‌ها و برآورده شدن قیود و محدودیت‌های کیفی شبکه کمک شایانی نماید.

تأثیر دادن ضریب اهمیت به گره‌ها بر اساس مقدار مصرف آنها در تابع هدف بود. به‌طور کلی نتایج این تحقیق می‌تواند به مدیریت کیفی شبکه از

۷- مراجع

- 1- Haghghi, M.R., and Alian Koupae, T. (2003). "Investigating the effects of temperature on chlorine decay coefficients in water distribution networks using a dynamic quality model." *J. Water and Wastewater*, 47, 21-29. (in Persian)
- 2- The Standard and Industrial Research Organization. (1997). *Physical and chemical characteristics of potable water*, Standard No. 1053, Tehran, Iran, (In Persian).
- 3- Boccelli, D.L., Rossman, L.A., Tryby, M.E., Uber, J.G, Zierolf, M.L., and Polycarpou, M. M. (1998). "Optimal scheduling of booster disinfection in water distribution system." *J. Water Res. Plan. Manage.* 124 (2), 99-111.
- 4- Rouhiainen, C.J., Tade, C., and West, G. (2003). "Multi-objective genetic algorithm for optimal scheduling of chlorine dosing in water distribution systems." Maksimovic, C., Butler, D., and Memon, F. A. (Eds.) *Advances in Water Supply and Management*, Swets and Zeitlinger Pub., Lisse.
- 5- Munavalli, G. R., and Mohan Kumar, M.S. (2003). "Optimal scheduling of multiple Chlorine sources in water distribution systems" *J. of Water Res. Plan. and Manage.*, 129 (6), 493-504.
- 6- Broad, D. R., Dandy, G. C., and Maier, H.R. (2005). "Water distribution system optimization using metamodels." *J. Water Res. Planning and Management*, 131(3), 172-180.
- 7- Gibbs, M.S., Morgan, N., Maier, H.R., Dandy, G.C., Nixon, J.B., and Holmes, M. (2006). "Investigation into the relationship between chlorine decay and water distribution parameters using data driven methods." *J. Mathematical and Computer Modeling*, 44(5-6), 458-498.
- 8- Rossman, L.A. (2000). *EPANET 2 users manual*, Risk Reduction Engineering Laboratory, U.S.EPA., Cincinnati, Ohio.
- 9- Liou, C.P., and Kroon, J.R. (1987). "Modeling the propagation of waterborne substances in water distribution networks." *J. Am. Water Works Assoc.*, 79(11), 54-58.
- 10- Savic, D.A., and Walters, G.A. (1997). "Genetic algorithms for least cost design of water distribution networks." *J. Water Res. Plan. Manage.*, 123(2), 67-77.
- 11- Reis, L.F.R., Porto, R.M., and Chaudhry, F.H. (1997). "Optimal location of control valves in pipe networks by genetic algorithm." *J. Water Res. Plan. Manage.*, 123(6), 317-326.
- 12- Dandy, G.C., Simpson, A. R., and Murphy, L. J. (1996). "An improved genetic algorithm for pipe network optimization." *Water Res. Res.*, 32(2), 449-458.
- 13- Behzadian, K., and Ardeshir, A. (2009). "Multi-objective sampling design for calibration of water distribution networks using GA and ANN." *J. Water and Wastewater*, 65, 13-22. (in Persian)