مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های تزریق کلر با نرخ زوال غیر خطی در شبکه توزیع آب شهری

صابر صبوریان سرودی[1] عبداله اردشیر[2] کورش بهزادیان[3] فاطمه جلیل ثانی[4]

(دریافت ۹۲/٤/۸ پذیرش ۹۲/۱۰/۱۲)

چکیده

در روش‌های متداول مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های بوستر پمپ کلرزنی برای افزایش سرعت دستیابی به جواب نهایی، از فرض خطی بودن نرخ زوال کلر استفاده شده است. بررسی میزان خطای ناشی از این فرض، نشان دهنده خطای غیرقابل اغماض آن به‌ویژه در حالت نرخ واقعی زوال با مرتبه بیشتر از یک است. این پژوهش، یک متامدل نوین برای حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه مکان‌یابی ایستگاه‌های تزریق کلر با نرخ زوال غیرخطی ارائه می‌نماید. در مدل پیشنهادی، متامدل عبارت است از شبیه‌سازی مدل کیفی شبکه توزیع آب با فرض برقرار بودن اصل برهم نهی، برای نرخ واکنش غیرخطی زوال کلر. برای این منظور، ابتدا غلظت کلر باقیمانده در شبکه حاصل از تزریق واحد کلر، برای کلیه نقاط جداگانه خارج از حلقه بهینه‌سازی، محاسبه شد. سپس در داخل حلقه بهینه‌سازی، غلظت کلر باقیمانده در شبکه برای جواب‌های مسئله بهینه‌سازی که به‌صورت ترکیب کلرزنی از نقاط و مقادیر تزریق مختلف بود، از رویکرد متامدل مذکور به‌صورت ترکیب وزنی بخش ابتدایی محاسبه شد. مقادیر توابع هدف جواب‌های مسئله بهینه‌سازی چندهدفه ابتدا توسط این متامدل به سرعت برآورد شدند. با توجه به خطای برآورد متامدل، برای کاهش خطای زیاد ناشی از تقریب متامدل پیشنهادی، توابع هدف جواب‌های برتر، مجدداً با استفاده از مدل کیفی واقعی (بدون استفاده از اصل برهم‌نهی) ارزیابی شده و جایگزین مقادیر محاسبه شده توسط متامدل شدند. نتایج مدل پیشنهادی نشان دهنده سرعت بسیار زیاد اجرای مدل بهینه‌سازی در عین دقت مناسب این روش نسبت به روش‌های متداول پیشین بود.

واژه‌های کلیدی: مکان یابی بهینه بوسترهای کلرزنی، الگوریتم ژنتیک چندهدفه، نرخ زوال کلر غیر خطی، متامدل

Optimal Site Location for Booster Stations of Chlorine Injection with non-linear Decay Rate in Water Distribution System

S. Saboorian Sarroodi [1] A. Ardeshir [2`] K. Behzadian [3] F. Jalil Sani [4]

(Received June 29, 2013 Accepted Jan. 2, 2014)

Abstract

Conventional methods for solving the problem of site location for booster chlorination stations have assumed the use of linear superposition principle for first-order kinetics of chlorine decay in water distribution systems in order to speed up the process of evolutionary algorithms. However, examination of this assumption in this paper shows that it causes a non-trivial error, especially when the order of chlorine decay rate is more than one. This paper presents a novel meta-model for solving the multi-objective optimization problem of optimal locations for booster chlorination stations for the nonlinear order of chlorine decay rate. In the proposed model, the meta-model is the water quality simulation model quantified by the principle of linear superposition for nonlinear kinetics of chlorine decay. To do so, residual chlorine concentration is calculated from the injection unit chlorine concentration at each node in the network as offline outside the optimisation loop. Then, within the optimization

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- دانشیار، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۳- استادیار، پژوهشکده محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران (نویسنده مسئول) (۰۲۱) ۶۴۵۴۲۶۴۸ behzadian@aut.ac.ir

۴- مربی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

1. Grad. M.Sc. of Civil and Environmental, Amir Kabir Univerisity of Tech., Tehran
2. Assoc. Prof., Dept of Civil and Environmental, Amir Kabir University of Tech., Tehran
3. Assist. Prof. of Environmental Research Center, Amir Kabir University of Tech., Terhan (Corresponding Author) (+98 21)64542648 behzadian@aut.ac.ir
4. Instructor, Dept. of Mechanic, Amir Kabir Univerisity of Tech., Tehran

Archive of SID
www.SID.ir

loop, the residual chlorine concentration in the network obtained for the optimal solutions is calculated as the combined chlorine injected from different locations and at different concentrations based on the linear superposition meta-model of the previous part. Objective functions of the optimisation solutions are quickly evaluated by this meta-model. In order to mitigate the significant error due to the estimation of this meta-model, the fitness of the best solutions are again evaluated using the real water quality simulation model (nonlinear chlorine decay rate) and replaced with the evaluations previously approximated by the meta-model. The results show the desirable accuracy of the proposed model and the high speed in the run time of the hybrid optimisation model.

Keywords: Booster Chlorination Station Optimal Location, Multi-Objective Genetic Algorithm, Non-Linear Chlorine Decay, Meta-Model.

۱- مقدمه

کلرزنی از جمله مراحل تصفیه شیمیایی است که برای گندزدایی (ضد عفونی) در مخازن ذخیره آب در بدو ورود به سیستم توزیع آب[1] انجام می‌شود.

کلر و ترکیبات آن پر مصرف‌ترین ماده برای گندزدایی آب شرب است که از اوایل سال ۱۹۰۰ میلادی مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. کلر به موازات حرکت آب در شبکه با مواد موجود در آب داخل لوله و همچنین با مواد جدار لوله واکنش می‌دهد که این امر موجب کاهش غلظت کلر می‌شود که در اصطلاح آن را زوال[2] کلر می‌نامند. از طرف دیگر روند زوال کلر باعث تولید محصولات جانبی[3] می‌شود که میزان زیاد آنها در آب می‌تواند برای مصرف کنندگان خطرناک و سرطان‌زا باشد[۲]. در بسیاری از سیستم‌های توزیع 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 منابع کیفی و عدم وجود میزان کلر باقیمانده مناسب در گره‌های انتهایی شبکه در برخی از ساعات شبانه روز می‌شود[۳].

بنابراین سیستم گندزدایی باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که مقدار کمینه غلظت باقیمانده گندزدا به‌منظور کنترل کیفیت میکربی آب، مقدار بیشینه غلظت به‌منظور عدم بروز مشکلات مربوط به مزه و بوی آب و همچنین جلوگیری از تولید فراورده‌های جانبی سرطان‌زا را رعایت نماید. برای رفع این مشکلات، محققان استفاده از بوستر پمپ‌های تزریق گندزدا[4] در مکان‌های مورد نیاز شبکه را پیشنهاد نموده اند تا غلظت کلر باقیمانده در تمامی نقاط شبکه در بازه مورد نظر قرار گیرند [۳ و ۴]. از این رو یکی از مهم‌ترین مسائل در زمینه بوستر پمپ‌های تزریق، پیدا کردن مکان و میزان مناسب تزریق کلر است، به‌گونه‌ای که میزان غلظت باقیمانده کلر در کلیه نقاط شبکه توزیع آب در محدوده استاندارد بوده و همچنین هزینه‌های مربوطه به کمترین میزان برسد.

در سال‌های اخیر در زمینه مدل‌سازی کلر باقیمانده و مکان‌یابی ایستگاه‌های تزریق کلر با استفاده از بوستر پمپ‌ها در شبکه‌های توزیع آب، پژوهش‌های متعددی انجام شده است. مطالعات مربوط به نحوه نرخ زوال کلر، در تصفیه آب در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است. نرخ زوال کلر، عاملی است که به مشخصات شبکه توزیع، جنس لوله‌ها و نوع آب موجود در شبکه بستگی دارد. لذا برای محاسبه دقیق نرخ زوال و مرتبه (درجه) آن به نمونه‌گیری و اندازه‌گیری در نقاط مختلف شبکه نیاز است. در مطالعات اولیه، نتایج تحقیقات وبل و همکاران در سال ۱۹۹۱ روی نرخ زوال کلر نشان داد که میزان نرخ زوال کلر در لوله، چندین برابر بزرگ‌تر از این میزان در همان آب در یک ظرف شیشه‌ای در آزمایشگاه است [۵]. پژوهش هانت و کرون در سال ۱۹۹۱، مدل کلر باقیمانده را در شبکه آبرسانی با استفاده از نرخ زوال از درجه اول و با یک نرخ ثابت در سرتاسر شبکه برای تمام لوله‌ها و تسهیلات ذخیره، تشریح نمود [۶]. تحقیقات کلارک و همکاران در سال ۱۹۹۳ نشان داد که مقدار کلر باقیمانده در طول روز و در مکان‌های مختلف شبکه آب به مسیر جریان و دوره زمانی که آب از محل کلرزنی تا مقصد نهایی طی می‌کند، بستگی دارد [۷]. در مطالعات انجام شده توسط راسمن و همکاران در سال ۱۹۹۴، یک مدل بر پایه انتقال جرمی برای پیش‌بینی زوال کلر در شبکه آب توسعه داده شده که در آن، نرخ واکنش کلر هم در جریان حجمی و هم در دیواره لوله از درجه اول در نظر گرفته شده است [۸].

در پژوهش‌های انجام شده در دهه اخیر، مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های کلرزنی یا میزان تزریق بهینه کلر مورد توجه قرار گرفته است. از نمونه‌های اولیه این پژوهش‌ها، مطالعات ترای بای و همکاران در سال ۲۰۰۲ است که در آن مکان‌یابی محل بوستر پمپ‌ها به‌عنوان متغیر تصمیم، معرفی و در یک مدل بهینه‌سازی فرمول‌بندی و حل شده است. نتیجه تحقیقات آن‌ها نشان داد که بوستر پمپ‌های گندزدا نسبت به کلرزنی صرف در مخازن نگهداری در ابتدای شبکه دارای این پتانسیل است که در عین بهبود مقدار کلر باقیمانده در شبکه، میزان تشکیل محصولات جانبی گندزدایی را نیز کاهش می‌دهد [۹]. کومار و مناولی در سال ۲۰۰۳، مدل تعیین

---

[1] Water Distribution System
[2] Decay
[3] By-product
[4] Disinfection Booster Pump

Archive of SID
www.SID.ir

مقدار تزریق در ایستگاه‌های کلرزنی را به صورت مسئله بهینه‌سازی غیرخطی و با در نظر گرفتن محدودیت‌های کمینه و بیشینه کلر باقیمانده فرمول‌بندی نموده و از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفه استفاده کردند [۱۰]. چنین مدلی در مطالعات پراسد و همکاران در سال ۲۰۰۴ با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای مکان‌یابی ایستگاه‌های تزریق کلر و مقدار کلر باقیمانده حل شده است که در آن، اهداف شامل کمینه نمودن مقدار کل کلر و بیشینه کردن مقدار آب مصرفی با مقدار کلر در بازه استاندارد بوده است[۳]. اگرچه با کاهش میزان کلر مصرفی، میزان تولید محصولات جانبی سرطان‌زا نیز کاهش می‌یابد، اما در پژوهش‌های بعدی نیز، کمینه نمودن میزان تولید محصولات جانبی حاصل از کلرزنی در کنار بیشینه نمودن درصد تأمین آب آشامیدنی سالم به‌عنوان یکی از اهداف مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه مورد توجه قرار گرفت [۲].

در پژوهش‌های انجام شده توسط محققان قبلی، یکی از فرضیات اساسی برای اجرای مدل بهینه‌سازی تک‌هدفه و مخصوصاً چندهدفه به منظور افزایش سرعت شبیه‌سازی جواب‌ها در مدت زمان قابل قبول، فرض خطی در نظر گرفتن نرخ زوال کلر (مرتبه اول) و در نتیجه استفاده از اصل برهم نهی خطی بوده است[۲، ۳ و۹]. برای استفاده از این اصل، در ابتدا و پیش از ورود به حلقه بهینه‌سازی، شبیه‌سازی مدل کمّی و کیفی شبکه توزیع آب با در نظر گرفتن ایستگاه‌های تزریق کلر در هر یک از مکان‌های بالقوه نصب ایستگاه کلرزنی به‌صورت تک تک و با میزان تزریق کلر به اندازه غلظت واحد، انجام و نتایج آن (به‌صورت غلظت کلر باقیمانده در گره‌های پایش شبکه) محاسبه و ذخیره می‌شود. به این ترتیب کلیه شبیه‌سازی‌های مدل کمّی و کیفی شبکه توزیع آب پیش از ورود به حلقه بهینه‌سازی انجام می‌شود. سپس در داخل حلقه، مدل بهینه‌سازی برای هر ترکیب از ایستگاه‌های تزریق کلر با هر میزان تزریق کلر در ایستگاه‌ها (متناظر با هر جواب)، میزان غلظت کلر باقیمانده در گره‌های مورد نظر به‌صورت ترکیب خطی وزنی از نتایج به‌دست آمده از مدل شبیه‌سازی پیش از حلقه بهینه‌سازی، محاسبه می‌شود. این شیوهٔ محاسبه نمودن غلظت باقیمانده در یک جواب ترکیبی با استفاده از جواب‌های مستقل، اصل برهم نهی خطی[1] اطلاق می‌شود [۲و۹]. استفاده از این اصل زمانی صحیح است که جواب یک مسئله ترکیبی (در اینجا غلظت کلر باقیمانده برای حالتی که کلرزنی از چندین نقطه انجام شود)، برابر با ترکیب خطی همان جواب‌ها که به‌صورت مستقل برای تک تک نقاط و در واحد متغیرها محاسبه شده‌اند، برابر باشد. استفاده از اصل برهم نهی خطی در این رویکرد فقط با فرض خطی بودن نرخ زوال کلر برقرار است [۲ و۹]. در این حالت در حل مسائل بهینه‌سازی این امکان وجود دارد که پیش از حلقه بهینه‌سازی، شبیه‌سازی‌های زمان‌بر مدل هیدرولیکی و کیفی آب انجام شود. در داخل حلقه بهینه‌سازی که تعداد شبیه‌سازی‌های آن ممکن است بسیار زیاد باشد، با تکیه بر این اصل، محاسبه ترکیب وزنی خطی بدون نیاز به شبیه‌سازی هیدرولیکی و کیفی آب در زمان بسیار سریع‌تری انجام شده و در نتیجه سرعت مدل بهینه‌سازی افزایش قابل ملاحظه‌ای در پیدا کردن جواب بهینه نهایی خواهد داشت. استفاده از این اصل زمانی که نرخ زوال واقعی کلر به‌صورت غیرخطی باشد، باعث بروز نوعی خطا در نتایج مدل خواهد شد. چنانچه نرخ زوال کلر به‌صورت غیرخطی (مرتبه غیر از یک) باشد، حل مسئله بسیار زمان‌برخواهد بود زیرا برای حل مدل بهینه‌سازی مذکور لازم است در داخل حلقه بهینه‌سازی برای هر جواب، مدل کیفی شبکه توزیع آب برای هر ترکیب ایستگاه‌ها و میزان تزریق کلر در آنها شبیه‌سازی شود تا غلظت کلر باقیمانده در گره‌های پایش شبکه محاسبه شود.

در پژوهش حاضر، مکان‌یابی ایستگاه‌های بوستر پمپ کلرزنی با فرض مدل زوال کلر به‌صورت غیرخطی در شبکه توزیع آب بررسی شد. همچنین برای غلبه بر این محدودیت زمان اجرا، در مدل بهینه‌سازی مربوطه به‌منظور افزایش سرعت مدل در شبیه‌سازی جواب‌ها، از یک متامدل استفاده شد، به‌نحوی که مدل پیشنهادی در حالت نرخ زوال غیرخطی کلر با سرعت مشابه با مدل‌های پیشین حل شد.

۲- مبانی کیفی شبکه توزیع آب

کلر موجود در شبکه‌های توزیع آب (خطوط لوله، مخازن ذخیره و غیره) با مواد آلی طبیعی[2] در داخل آب و مصالح، در طول دیواره داخلی لوله واکنش داده و به تدریج زوال پیدا می‌کند. در مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه توزیع آب با استفاده از نرم‌افزار EPANET، به‌منظور محاسبه غلظت کلر باقیمانده در شبکه، واکنش‌های رخ دهنده در جریان حجمی[3] را با سینتیک از مرتبه n مدل می‌کنند. نرخ آنی واکنش به‌صورت تابعی از غلظت از رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۱۱]

$$R = k_b C^n \qquad (۱)$$

که در این رابطه

R نرخ آلی واکنش بر حسب جرم در زمان در حجم، k_b ضریب نرخ واکنش حجمی، C غلظت ماده واکنش دهنده مانند کلر (بر حسب

[1] Linear superposition

[2] Natural Organic Matter

[3] Bulk Flow

Archive of SID
www.SID.ir

جرم در حجم) و n مرتبه واکنش است. واحد ضریب نرخ واکنش حجمی، برابر است با واحد غلظت به توان (1-n) تقسیم بر زمان. به همین صورت، رابطه مشخصی برای مدل‌سازی واکنش کلر با دیواره وجود دارد اما مرتبه سینتیک معادله واکنش با دیواره به مرتبه صفر یا یک (خطی) محدود می‌شود [۱۱].

در شبکه‌های توزیع آب، موقعیت ایستگاه‌های تزریق کلر و همچنین نقاط کنترل و پایش غلظت کلر به‌صورت گره‌های مدل هیدرولیکی و کیفی شبکه توزیع آب فرض می‌شود [۱۲]. غلظت کلر در گره کنترلی و پایش j و در دوره کنترل زمانی m به‌صورت $C_j^m(u)$ نمایش داده می‌شود. غلظت کلر در گره‌های شبکه در حالت کلی به نرخ تزریق جرمی کلر در گره ایستگاه تزریق i و بازه زمانی k که به‌صورت u_i^k نمایش داده می‌شود، بستگی دارد که u بردار تمام نرخ تزریق‌های جرمی است. با فرض خطی بودن رفتار نرخ زوال کلر که برای مدل‌های شبیه‌سازی کیفی شبکه توزیع آب به‌کار می‌رود، اصل بر هم نهی خطی می‌تواند برای تعیین غلظت $C_j^m(u)$ به‌عنوان تابع خطی از نرخ تزریق جرمی u به‌کار برده شود. این رابطه خطی بین نرخ تزریق و غلظت، یک ابزار قدرتمند برای حل و بسط مسائل بهینه‌سازی کاربردی است [۲، ۳ و ۹].

کاربرد استفاده از اصل برهم نهی خطی برای برآورد غلظت کلر توسط مطالعات بوسیلی و همکاران در سال ۱۹۹۸ پایه گذاری شد. آنها نشان دادند چنانچه تزریق کلر متغیر با زمان در نقاط مختلف شبکه‌های هیدرولیکی توزیع آب به‌صورت یک سیستم دینامیکی خطی (با سینتیک زوال کلر از درجه اول) شرح داده شود، اصل بر هم نهی خطی برای برآورد غلظت کلر در نقاط پایش، قابل استفاده است. همچنین فرض کردند که مدل هیدرولیکی سیستم‌های توزیع آب که متغیر با زمان است، کاملاً در دسترس است. در نتیجه غلظت کلر باقیمانده در گره‌های کنترلی $C_j^m(u)$ می‌تواند از جمع خطی اثر تزریق در هر یک از ایستگاه‌ها به‌صورت زیر تعیین شود

$$c_j^m(u) = \sum_{i=1}^{n_b}\sum_{k=1}^{K} a_{ij}^{km} u_i^k \qquad (۲)$$

$$a_{ij}^{km} = \frac{\partial c_j^m}{\partial u_i^k} \qquad (۳)$$

که در این روابط

a_{ij}^{km} ضرایب پاسخ گسسته برای غلظت کلر باقیمانده در گره کنترلی j در بازه زمانی m در اثر تزریق غلظت واحد کلر در گره ایستگاه تزریق i و بازه زمانی k، u_i^k مقدار تزریق کلر در گره ایستگاه تزریق i و بازه زمانی k و $C_j^m(u)$ مقدار غلظت کلر باقیمانده در گره کنترلی j و بازه زمانی m، n_b تعداد ایستگاه‌های تزریق و K تعداد بازه‌های زمانی تزریق است [۱۳]. مطابق رابطه ۳ ضرایب پاسخ به‌وسیله شبیه‌سازی کیفی آب و اثر تغییرات u (هم مکان و هم مقدار تزریق در این ایستگاه‌ها) بر روی مقدار کلر باقیمانده محاسبه می‌شود که قابلیت توسعه به مدل‌های ریاضی کارآمد برای بهینه‌سازی مقدار تزریق و همچنین محل این ایستگاه‌ها را نیز دارد. به‌عبارت دیگر برای محاسبه غلظت گره کنترلی j ($c_j^m(u)$) ابتدا باید ماتریس ضرایب پاسخ گسسته (a_{ij}^{km}) محاسبه شود. هر درایه (a_{ij}^{km}) از ماتریس ضرایب پاسخ a عبارت است از میزان غلظت محاسبه شده در گره پایش j در شبکه توزیع آب بر اثر تزریق کلر به غلظت واحد در گره i. برای محاسبه ماتریس a ابتدا باید غلظت تزریقی واحد کلر برای هر گره با پتانسیل نصب ایستگاه کلرزنی به‌صورت یک به یک در نظر گرفته شود. سپس غلظت باقیمانده کلر برای تمامی گره‌های پایش و کنترلی شبکه محاسبه شده و ماتریس ضرایب تکمیل شود. سپس به‌منظور محاسبه غلظت گره کنترلی j بر اساس تزریق کلر با هر غلظت دلخواه در گره i، کافی است طبق رابطه ۲ غلظت کلر تزریقی در ایستگاه i در تمامی ضرایب پاسخ مربوطه ضرب شود.

در مدل‌های بهینه‌سازی تحلیل کیفی شبکه توزیع می‌توان کلیه شبیه‌سازی‌های مربوط به ماتریس ضرایب را پیش از ورود به حلقه بهینه‌سازی انجام داد. سپس در داخل حلقه بهینه‌سازی، از اصل برهم نهی استفاده نمود و بدون شبیه‌سازی مدل کمّی و کیفی، میزان غلظت کلر باقیمانده برای کلیه جواب‌ها و توابع هدف مدل را با سرعت و به‌راحتی محاسبه نمود. استفاده از این فرایند در مدل‌های بهینه‌سازی باعث کاهش چشمگیر حجم محاسبات و زمان حل مسئله می‌شود که در پژوهش‌های پیشین مورد توجه محققان بوده است. از آنجا که فرض خطی بودن نرخ زوال کلر، محدودیت اصلی این رویکرد است، در این مقاله مدل بهینه‌سازی مکان‌یابی ایستگاه‌های کلرزنی در حالت کلی نرخ زوال کلر مورد توجه قرار گرفت و تعمیم داده شد.

۳- روش تحقیق

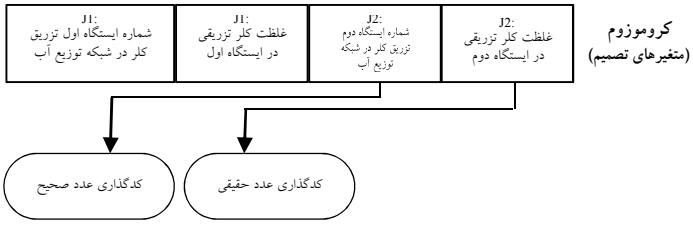
چنانچه نرخ زوال کلر به‌صورت غیرخطی در نظر گرفته شود، امکان استفاده از اصل برهم نهی و در نتیجه امکان انجام شبیه‌سازی پیش از ورود به حلقه بهینه‌سازی میّسر نیست و باید مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی و کیفی شبکه توزیع آب برای برآورد میزان غلظت کلر برای جواب‌های مسئله، در داخل حلقه بهینه‌سازی انجام شود که این رویکرد بسیار زمان‌بر خواهد بود. در رویکرد پیشنهادی از اصل برهم نهی خطی برای برآورد میزان غلظت کلر باقیمانده به‌عنوان یک مدل جایگزین (متامدل) استفاده شد. به این ترتیب که با پذیرش خطای استفاده از این اصل، ابتدا در داخل حلقه مدل

Archive of SID
www.SID.ir

بهینه‌سازی پیشنهادی، از این اصل برای برآورد سریع غلظت کلر باقیمانده استفاده شد و سپس با ارائه روش ابتکاری، خطای ایجاد شده ناشی از فرض خطی بودن نرخ زوال برای جواب‌های برتر اصلاح شد. به این ترتیب، سرعت حل مدل بهینه‌سازی در این روش همانند مدل‌های با فرض خطی بودن نرخ زوال بسیار سریع و چشمگیر است. در ادامه ضمن ارائه فرضیات مدل بهینه‌سازی، مکان‌یابی ایستگاه‌های تزریق کلر به بررسی بیشتر جزئیات این روش پرداخته می‌شود.

از مسائل مهم مدیریت کیفی شبکه‌های آبرسانی، رعایت میزان کلر باقیمانده در بازه استاندارد در کلیه نقاط شبکه است. در این راستا بنابر توصیه سازمان‌های حفاظت محیط زیست آمریکا[1]، مقدار کمینه غلظت کلر باقیمانده برابر ۰/۲ میلی‌گرم در لیتر به‌منظور جلوگیری از رشد میکرب‌های پاتوژنیک و مقدار بیشینه کلر باقیمانده برای کلرین و کلرامین به میزان ۴ میلی‌گرم در لیتر و برای دی‌اکسید کلر ۰/۸ میلی‌گرم در لیتر به‌منظور جلوگیری از تغییر بو و طعم آب در نظر گرفته می‌شود[۱۴]. البته نشریه ۳-۱۱۷ میزان کلر حداکثر را به ۱/۲ میلی‌گرم در لیتر محدود نموده است. برای شبیه‌سازی مدل هیدرولیکی و کیفی شبکه توزیع آب از نرم افزار EPANET استفاده می‌شود که در این پژوهش، شبیه‌سازی با این روش، شبیه‌سازی با مدل کامل[2] نامیده می‌شود [۱۱]. روش‌های بهینه‌سازی مورد استفاده در این پژوهش بر اساس الگوریتم ژنتیک[3] بود. این روش‌ها برای حل مسئله مکان‌یابی بهینه چندهدفه ایستگاه‌های کلرزنی و میزان بهینه تزریق کلر در هر ایستگاه با نرخ زوال غیرخطی کلر استفاده می‌شوند. مدل پیشنهادی به‌عنوان مدل الگوریتم ژنتیک چندهدفه و اصل برهم نهی[4] نامیده می‌شود که برای حل مدل بهینه‌سازی کیفی شبکه توزیع آب با استفاده از اصل برهم نهی برای نرخ زوال غیرخطی کلر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش به‌منظور مقایسه عملکرد مدل پیشنهادی با روش‌های بهینه‌سازی استاندارد، از الگوریتم ژنتیک چندهدفه[5] بر اساس روش NSGA-II به‌عنوان روش مرجع استفاده شد [۱۵]. الگوریتم حل مدل MOGA با استفاده از روش بهینه‌سازی استاندارد NSGA-II به این گونه است که از یک مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی و کیفی برای نرخ زوال غیرخطی کلر، در محیط نرم افزار EPANET (مدل کامل) در داخل حلقه بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک دوهدفه استفاده می‌شود.

در الگوریتم ژنتیک، ژن‌های هر کروموزوم (جواب) نشان دهنده متغیرهای تصمیم می‌باشند. در این پژوهش‌ها متغیرهای تصمیم مدل بهینه‌سازی کیفی شبکه توزیع از دو قسمت تشکیل شده است:۱) موقعیت ایستگاه‌های تزریق کلر و ۲) میزان تزریق کلر در هر ایستگاه، که تلفیقی از دو نوع کدگذاری است که عبارت‌اند از: ۱) کدگذاری عدد حقیقی و ۲) کدگذاری عدد صحیح. بنابراین در این مدل بهینه‌سازی، هر کروموزوم (جواب) دارای چهار ژن است که در آن دو ژن موقعیت نصب دو ایستگاه‌های کلرزنی در گره‌های شبکه را مشخص می‌نمایند (اعداد صحیح) و دو ژن غلظت کلر تزریقی در هر ایستگاه تزریق را تعیین می‌کنند (اعداد حقیقی بر حسب میلی‌گرم در لیتر). نمایش شماتیک ژنتیکی کروموزوم‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نمایش شماتیک کروموزوم در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

توابع هدف مشخص در مدل بهینه‌سازی مذکور به‌صورت ذیل تعریف می‌شوند: ۱) بیشینه نمودن درصد آب آشامیدنی سالم (SDW) و ۲) کمینه نمودن مقدار کل گندزدای مصرفی (M_t). توابع ریاضی کمی این اهداف که در پژوهش‌های پیشین مورد استفاده بوده و در اینجا نیز استفاده شدند، به‌صورت زیر است

$$F_1 = \text{Max SDW} = \frac{\sum Ds_i}{\sum Dt_j} \times 100 \qquad (۴)$$

$$F_2 = \text{Min } M_t = \sum m_i \qquad (۵)$$

که در آن

SDW درصد آب آشامیدنی سالم در شبکه، DS_i حجم دبی گره کنترل (پایش) i با آب آشامیدنی سالم (SDW) که در این پژوهش آب با غلظت کلر باقیمانده بین ۰/۲ تا ۴ میلی‌گرم در لیتر بود، Dt_j حجم کل دبی گره کنترل (پایش) i (صرف نظر از سالم یا نا سالم بودن)، M_t جرم کل گندزدای مصرف شده بر حسب کیلوگرم در روز و m_i میزان گندزدای تزریق شده در گره کنترل (پایش) i بر حسب کیلوگرم در روز است. تعداد ایستگاه‌های تزریق کلر در این مدل بهینه‌سازی به‌صورت ثابت و از پیش تعیین شده فرض می‌شود.

[1] U.S. Environmental Protction Agency (USEPA)
[2] Full Model
[3] Genetic Algorithm (GA)
[4] Multi-objective Genetic Algorithms Superposition Principle (MOGA-SP)
[5] Multi-objective genetic algorithms (MOGA)

Archive of SID

www.SID.ir

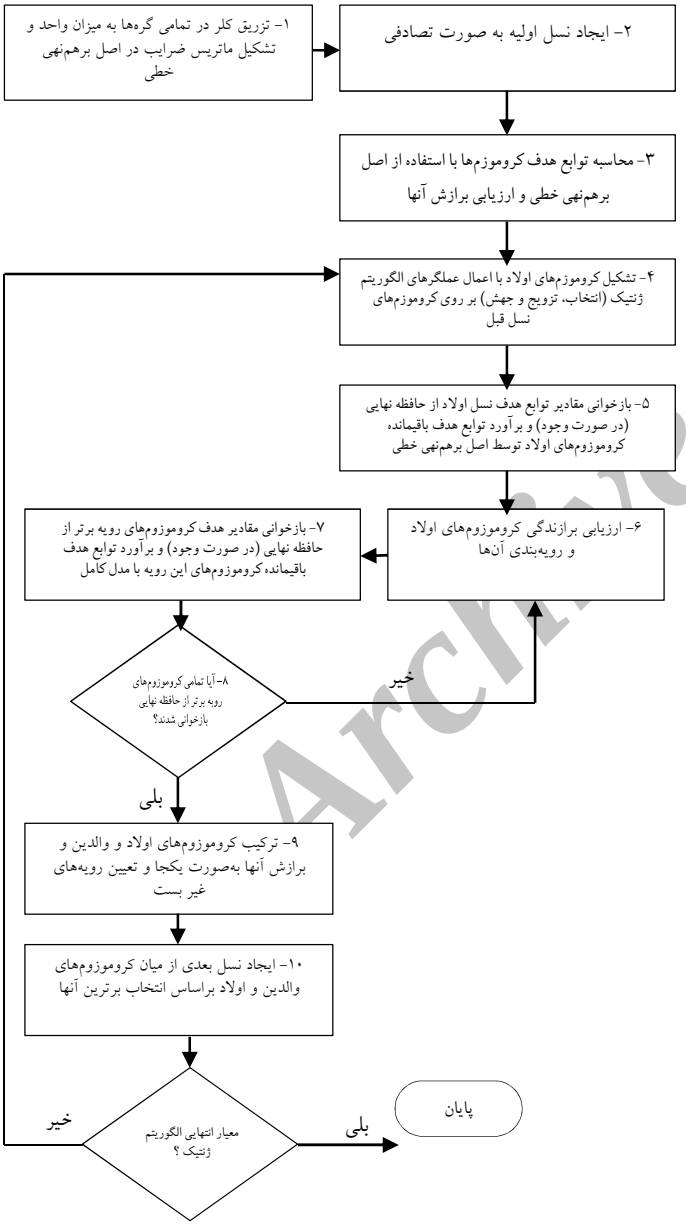
آب آشامیدنی سالم به آبی اطلاق می‌شود که میزان کلر باقیمانده آن در محدوده استاندارد باشد [۷]. محاسبه تابع هدف دوم به‌راحتی بر اساس مقادیر ژنتیکی (متغیرهای تصمیم) هر کروموزوم (جواب) قابل محاسبه است. اما برای محاسبه تابع هدف اول در مدل بهینه‌سازی بالا، لازم است شبیه‌سازی مدل هیدرولیکی و کیفی شبکه توزیع آب انجام شود. از آنجا که انجام این شبیه‌سازی در الگوریتم ژنتیک باید برای هر کروموزوم در همه نسل‌ها تا رسیدن به جواب بهینه پارتو در داخل حلقه بهینه‌سازی صورت گیرد، حل مسئله بسیار زمان گیر خواهد بود. در حالت فرض غیر خطی بودن مدل زوال کلر، امکان شبیه‌سازی مدل هیدرولیکی و کیفی، پیش از ورود به حلقه بهینه‌سازی به‌منظور استفاده از اصل برهم نهی خطی وجود ندارد. بنابراین در مدل MOGA (روش مرجع)، شبیه‌سازی مدل هیدرولیکی و کیفی شبکه توزیع با مدل کامل در داخل حلقه بهینه‌سازی انجام شد.

مدل پیشنهادی MOGA-SP بر پایه تلفیق الگوریتم ژنتیک چند هدفه و اصل بر هم نهی خطی برای حل مسئله مذکور در حالت نرخ زوال غیر خطی کلر بوده که در واقع به‌نوعی الهام گرفته از الگوریتم MOGA-ANN[1] است [۱۶]. اگرچه در این روش، استفاده از اصل برهم نهی خطی به‌دلیل نرخ غیرخطی زوال کلر برای محاسبه مقدار تابع هدف اول با خطا همراه است، اما به‌دلیل سرعت بالای آن به‌صورت یک متامدل (مدل جایگزین)، برای محاسبه سریع تابع هدف اول جواب‌ها (کروموزوم‌ها) به‌کار گرفته می شود.

برای اطمینان از صحت جواب‌های محاسبه شده با اصل برهم نهی خطی، با بهره‌جویی از روشی مناسب، از امکان انحراف مدل توسط این برآورد تقریبی جلوگیری می‌شود. برای این منظور همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در فلوچارت الگوریتم ژنتیک مدل MOGA-SP بعد از اعمال عملگرهای سه‌گانه انتخاب، جهش و تزویج و پس از اختصاص رتبه‌بندی به جواب‌ها بر اساس رویه‌های غیرپست با توجه به اهداف مدل بهینه‌سازی، مقادیر تابع هدف اول کروموزوم‌های (جواب‌های) واقع در رویه بهینه پارتو (بهترین یا اولین رویه) بار دیگر با استفاده از مدل کامل محاسبه شده و جایگزین مقادیر تقریبی اصل برهم نهی خطی شدند (گام ۷). محاسبه تابع هدف اول کروموزوم‌های برترین رویه توسط مدل کامل، به نوعی ضمانت عدم وجود خطا در مقادیر توابع هدف برترین کروموزوم‌های (جواب‌های) الگوریتم بهینه‌سازی است که قبلاً توسط روش تقریبی اصل برهم نهی محاسبه شده بودند.

با توجه به این که پس از اعمال مقادیر مدل کامل ممکن است جایگاه کروموزوم ها در رویه‌ها تغییر کند، از این رو مجدداً رویه‌بندی کروموزوم‌ها صورت می‌گیرد. در صورتی که تغییری در جایگاه کروموزوم‌ها اتفاق نیفتد، الگوریتم به مرحله بعدی می‌رود و در غیر این صورت، مجددا الگوریتم به مرحله قبلی باز می‌گردد و کروموزوم‌های رویه اول که در رویه‌بندی اخیر اضافه شدند، با مدل واقعی حساب می‌شوند (گام ۸).

در الگوریتم پیشنهادی همچنین به‌منظور ذخیره نمودن و حفظ محاسبات تابع هدف اول کروموزوم‌هایی که به وسیله مدل کامل به دست آمده‌اند، از حافظه نهانی استفاده شد. به این ترتیب در نسل‌های بعدی می‌توان مقادیر تابع هدف اول کروموزوم‌های تکراری با کمک حافظه نهایی را بازیابی نمود، به‌طوری که حافظه نهانی مقادیر کروموزوم‌های محاسبه شده توسط مدل کامل را همراه



شکل ۲- فلوچارت الگوریتم ژنتیک چندهدفه پیشنهادی

[1] Multi-Objective Genetic Algorithms- Artificial Neural Networks (MOGA-ANN)

Archive of SID
www.SID.ir

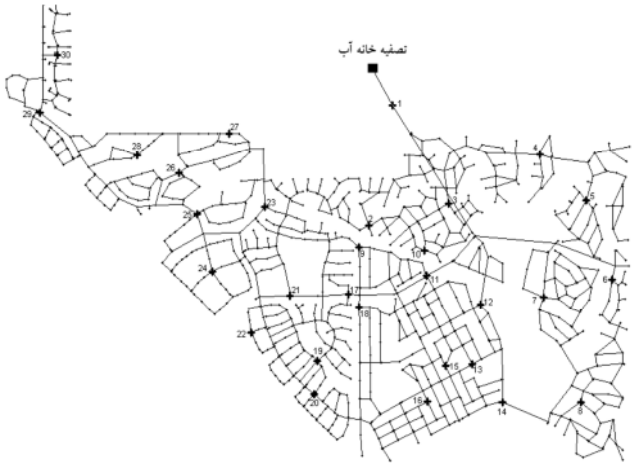
با مقدار تابع هدف اول آنها در خود جای می‌دهد و در روند بهینه‌سازی، در صورت مواجه شدن با کروموزوم تکراری، مقادیر تابع هدف اول به سرعت بازخوانی می‌شود. البته باید دقت شود که حجم نگهداری تعداد جوابهای ذخیره شده در حافظه نهانی به حدی باشد که متوسط زمان یافتن کروموزوم های تکراری از حافظ نهانی بیشتر از زمان محاسبه تابع هدف اول آنها توسط مدل کامل نشود زیرا در این صورت عملکرد حافظه نهایی معکوس خواهد بود. از طرف دیگر، میزان کوچک این حافظه نیز ممکن است کارایی زیادی نداشته باشد. لذا حد (ظرفیت) آن در این مسئله بر اساس چندین حل آزمایشی مسئله برابر ۱۰۰۰ جواب تعیین شد.

۴- نتایج و بحث

در این پژوهش، شبکه آبرسانی شهر ولف[1] که از مطالعات موردی پایه مرکز تحقیقات آبی دانشگاه اکستر گرفته شده بود، مورد بررسی قرار گرفت [۱۷]. در این مطالعه موردی تعداد ۱۱۲۶ گره و ۱۳۲۴ لوله با طول ۱۱۰/۹۸ کیلومتر وجود داشت. تأمین آب شهر از تصفیه‌خانه، هم به‌صورت پمپاژ و هم ثقلی در شبکه توزیع صورت می‌گرفت. هیدرولیک شبکه در یک دوره ۲۴ ساعته و به‌صورت پریودیک فرض شد. همچنین ضرایب ثابت دیواره‌ای و حجمی برای زوال کلر در شبکه به ترتیب برابر ($m.day^{-1}$) ۰/۰۹ و (day^{-1}) ۰/۵۵ فرض شد[۲].

مدل بهینه‌سازی دو هدفه مکان‌یابی ایستگاه‌های تزریق کلر و میزان تزریق برای شبکه توزیع آب شهر ولف به‌کار برده شد. در شبکه توزیع مورد مطالعه، یک ایستگاه کلرزنی در محل تصفیه‌خانه موجود بود. اگر تمام گره‌های شبکه به‌عنوان مکان‌های با نصب ایستگاه تزریق کلر در نظر گرفته شود، حجم فضای جواب مسئله بهینه‌سازی بسیار بزرگ می‌شود و در نتیجه دستیابی به جواب بهینه بسیار دشوار می‌شود. از طرف دیگر کلیه گره‌ها به‌دلیل مسائل اجرایی ممکن است برای نصب ایستگاه‌های کلرزنی مناسب نباشند. بنابراین با استفاده از روش‌های اسکلت‌بندی شبکه توزیع نظیر لوله‌های موازی و سری و عدم انتخاب نقاط انتهایی گره‌ها، در هر محدوده‌ای از مطالعه موردی یک نقطه انتخاب شد که در نهایت ۳۰ محل به‌عنوان نقاط با پتانسیل نصب ایستگاه کلرزنی انتخاب شدند. مطابق شکل ۳ از ۳۰ مکان (یکی موجود در محل تصفیه‌خانه و ۲۹ گره به‌عنوان نقاط با پتانسیل) با اثربخشی بیشتر در شبکه استفاده شد.

در بخش اول نتایج، ابتدا به‌منظور بررسی میزان خطای ناشی از استفاده از اصل برهم نهی خطی در حالت نرخ زوال کلر غیر خطی،



شکل ۳- جانمایی شبکه توزیع آب شهر ولف
(گره‌های با پتانسیل نصب ایستگاه‌های کلرزنی مشخص شده)

این رویکرد با استفاده از مدل بهینه‌سازی مکان‌یابی و تزریق بهینه توسعه داده شده توسط محققان پیشین بر روی مطالعه موردی ولف برای یافتن دو ایستگاه کلرزنی با فرض نرخ زوال غیرخطی کلر اجرا شد و جواب‌های مدل بهینه‌سازی مذکور (مکان‌ها و میزان تزریق بهینه متناظر با نقاط رویه بهینه پارتو) برای مطالعه موردی با نرخ زوال غیرخطی کلر شبیه‌سازی شد که این جواب‌های شبیه‌سازی شده به‌همراه رویه‌های بهینه پارتو در روش مرجع (مدل کامل) که فقط از روش بهینه‌سازی MOGA استفاده می‌نماید، در شکل ۴ ترسیم و مقایسه شد. این نکته قابل ذکر است که در روش مرجع، شبیه‌سازی جواب‌ها در داخل حلقه بهینه‌سازی و در حالت عمومی غیرخطی بودن نرخ زوال کلر محاسبه شده است و جواب‌های آن به‌عنوان مرجع مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرف دیگر، نتایج شبیه‌سازی جواب‌های بهینه از حاصل مطالعات قبلی (استفاده از اصل برهم نهی خطی) روی مدل شبکه توزیع با نرخ زوال غیرخطی، ممکن است لزوماً نظیر رویه‌های بهینه پارتو غیر پست نباشند. از مقایسه انجام شده در شکل ۴ بر پایه مدل‌های مذکور برای نرخ زوال کلر از مرتبه‌های ۰/۵ ، ۱ ، ۲ و ۳ استفاده می‌شود. همان‌گونه که انتظار می‌رفت نتایج مدل بر پایه استفاده از اصل برهم نهی خطی (پیشنهاد شده در مطالعات پیشین) برای حالت خطی (نرخ زوال کلر از مرتبه اول)، منطبق بر نتایج مدل مرجع (مدل MOGA) است (شکل ۴-الف). در این حالت استفاده از اصل برهم نهی خطی با کمترین خطای ممکن همراه است که این مهم صحت روش قبلی را در به کارگیری از این اصل تأیید می‌نماید. همچنین یادآور می‌شود به‌دلیل اهمیت جواب‌های با درصد بالاتر، میزان آب سالم در شبکه و مورد توجه بودن آنها برای شرکت های آب، و همچنین نمایش واضح‌تر جواب‌ها، رویه‌های بهینه پارتو فقط

[1] Wolf

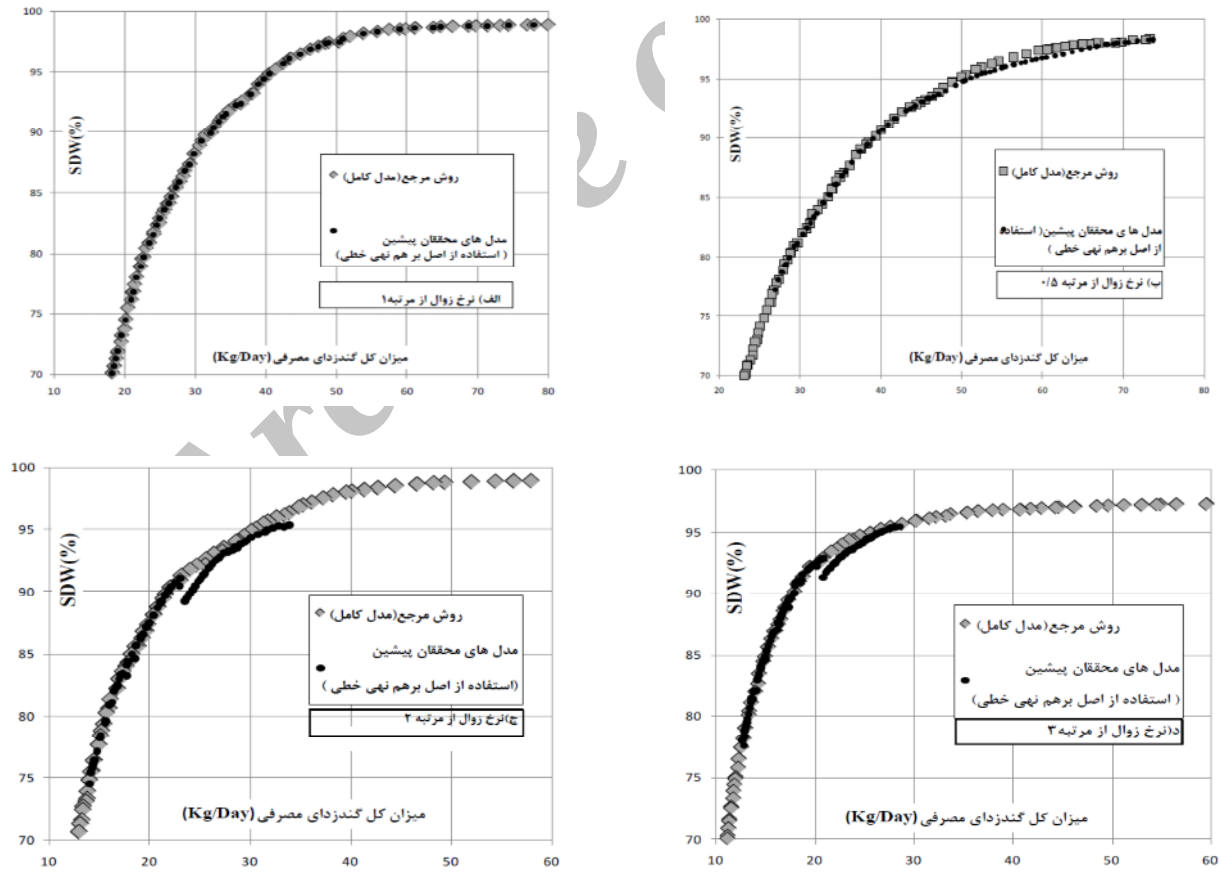
Archive of SID
www.SID.ir

برای درصد آب سالم بالای ۷۰ درصد در مدل بهینه‌سازی اجرا و نشان داده شد.

برای نرخ زوال کلر از مرتبه ۰/۵ (شکل۴-ب)، نتایج مدل اصل برهم نهی خطی در مقایسه با نتایج مدل کامل بنحو قابل قبولی بر هم منطبق است. این نتیجه حاصل می‌شود که اصل برهم‌نهی خطی برای حالات زوال کمتر از یک می‌تواند با تقریب قابل قبول برای این مدل‌های بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گیرد. با این وجود همان‌گونه که در شکل ۴-ب دیده می‌شود، مدل بر پایه اصل برهم نهی قادر به یافتن جواب‌های با میزان SDW پایین نیست که این امر می‌تواند به خطا در برآورد میزان تزریق کلر در دستیابی به درصدهای پایین تر آب سالم (SDW) با استفاده از اصل برهم نهی زمانی که ضریب زوال کمتر از ۱ باشد، نسبت داده شود. شکل‌های ۳-ج و ۳- د نشان می‌دهد که برای نرخ‌های زوال از مرتبه بزرگ‌تر از یک، استفاده از اصل برهم نهی خطی برای افزایش سرعت اجرای مدل بهینه‌سازی منجر به ایجاد خطای قابل توجهی می‌شود. همان‌گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود، مدل بهینه‌سازی بر پایه اصل برهم نهی قادر به یافتن دقیق محدوده کوچکی از رویه بهینه پارتو است (به‌عنوان مثال محدوده SDW بین ۷۵ تا ۹۰ درصد در شکل ۴-ج). دلیل این خطا می‌تواند به تقریب بیش از حد مقادیر واقعی[1] برای ضرایب زوال بزرگ‌تر از ۱ و کمتر از میزان واقعی[2] برای ضرایب زوال کوچک‌تر از یک نسبت داده شود. همین دلیل نیز می‌تواند برای اینکه مدل بهینه‌سازی برای مرتبه‌های بزرگ‌تر از ۱ توانایی جستجوی مقادیر SDW بزرگ را ندارد (مثلا برای SDW>96) صادق باشد. البته این نکته مهم است که برای تعمیم این دلیل به حالت عمومی لازم است این مورد روی مطالعات موردی دیگر نیز بررسی و صحت‌سنجی شود.

گرچه اصل برهم نهی خطی در محاسبه مقادیر توابع هدف در حالت غیرخطی با خطا ظاهر می‌شود، اما این اصل به‌طور نسبی می‌تواند ارزیابی برازندگی موفقی را ارائه نماید. به این صورت که به‌منظور رویه‌بندی کروموزوم‌های هر نسل می‌تواند کروموزوم‌های برتر را به نسل بعدی منتقل نماید. با توجه به همین ویژگی، این

[1] Overestimate
[2] Underestimate



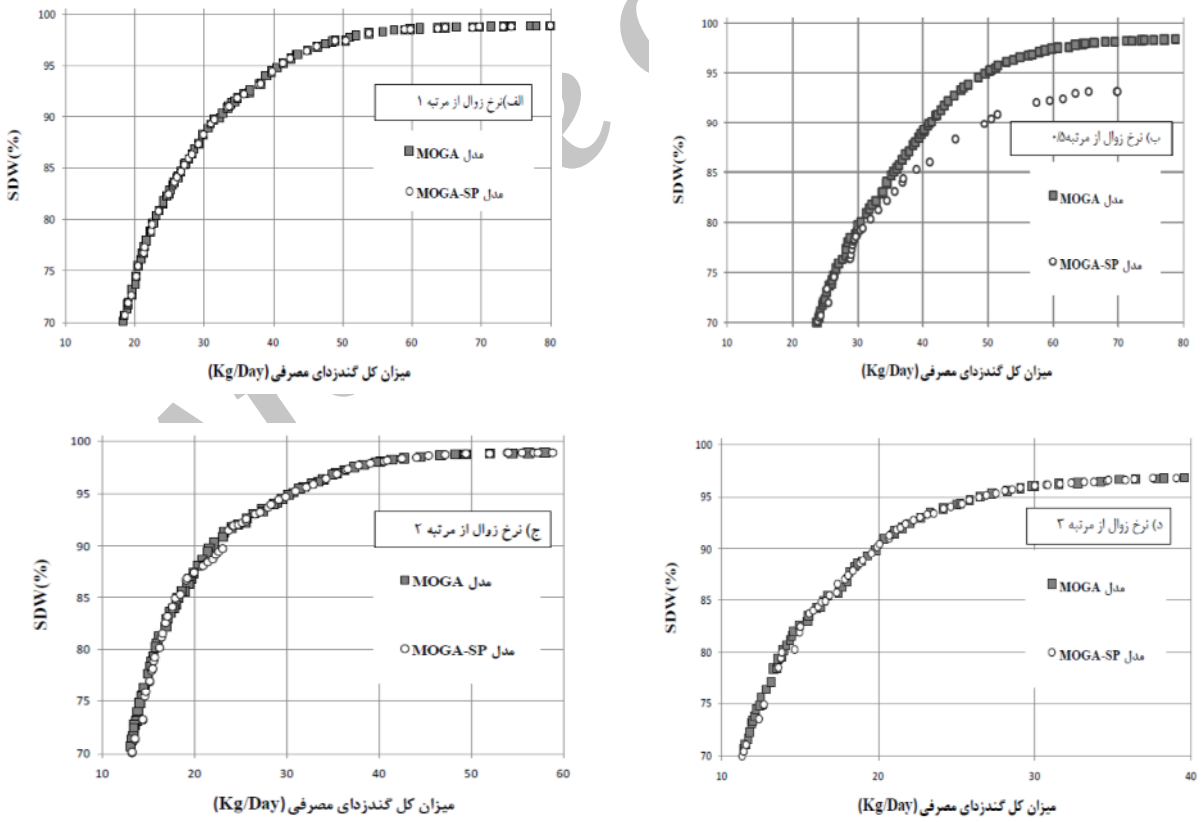
شکل ۴- میزان دقت جواب مدل‌های بهینه‌سازی محققان پیشین (استفاده از اصل برهم نهی خطی) با روش مرجع (مدل کامل) برای نرخ‌های زوال مختلف کلر

www.SID.ir

اصل در حالت نرخ زوال مرتبه ۰/۵ به‌طور موفقی در روند بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک موفق ظاهر شده است. برای مرتبه های ۲ و۳ نیز همین ویژگی سبب شد تا مدل الگوریتم ژنتیک بتواند قسمتی از جواب‌های بهینه را پیدا کند. از سوی دیگر اصل بر هم نهی خطی در محاسبه مقادیر توابع هدف برای مرتبه‌های زوال بزرگ‌تر از یک، برآوردی فراتر از مقادیر واقعی دارد. این ویژگی الگوریتم ژنتیک را در یافتن جواب‌های بهینه محدود می‌کند. بر اساس داده‌های فوق می‌توان نتیجه‌گیری نمود که مدل الگوریتم ژنتیک دو هدفه بر پایه اصل برهم نهی خطی که توسط محققان پیشین ارائه شده است، برای نرخ‌های زوال مرتبه بزرگ‌تر از یک مناسب نیست [۲، ۳ و۹].

در ادامه برای تعمیم روش مدل بهینه‌سازی مکان‌یابی ایستگاه‌های کلرزنی و میزان تزریق به‌طور عام برای کلیه ضرایب زوال کلر، مدل MOGA-SP به دفعات و هر بار برای پیدا کردن دو ایستگاه تزریق کلر، برای نرخ‌های متفاوت زوال کلر بر روی مطالعه موردی به‌کار رفت. در نتیجه منحنی تعامل بین جرم کلر و درصد آب آشامیدنی سالم (SDW)، با در نظر گرفتن تعداد ثابت و مشخصی از ایستگاه‌های تزریق کلر بین دو روش MOGA و MOGA-SP مطابق شکل۵ ارائه شد. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، برای نرخ‌های زوال کلر از مرتبه ۱، ۲ و ۳ پاسخ مدل MOGA-SP به‌طور قابل قبولی با پاسخ‌های مدل کامل مطابقت دارد. اما برای نرخ زوال از مرتبه ۰/۵، متامدل MOGA-SP پاسخ‌های نامناسبی را ارائه نموده است که این، نتیجه، استفاده از این مدل را به‌منظور بهینه‌سازی میزان گندزدای مصرفی در این حالت نامعتبر می‌سازد. دلیل ناکارآمدی مدل MOGA-SP در این حالت، به رفتار اصل بر هم نهی برای نرخ زوال از مرتبه‌های کمتر از یک مربوط می‌شود.

علت وجود خطای زیاد برای نرخ‌های زوال مرتبه کمتر از یک، برآورد ضعیف و با خطای زیاد استفاده از اصل برهم نهی است، به نحوی که منجر به برآورد مقادیر SDW بسیار کمتری نسبت به مقادیر مدل کامل می‌شود. البته این خطا در ادامه روند مدل MOGA-SP در گام صحت سنجی کروموزوم‌های بهترین رویه، با محاسبه مقادیر SDW توسط مدل کامل و جایگزینی آنها با مقادیر برآورد شده توسط اصل برهم نهی اصلاح می‌شود. اما در نسل بعدی برای محاسبه برازش کروموزوم‌ها، از آنجا که توابع هدف جایگزین شده توسط مدل کامل دارای مقادیر کوچک‌تری نسبت به مقادیر محاسبه شده با اصل برهم‌نهی هستند، لذا احتمال اینکه به نسل بعدی



شکل ۵- مقایسه عملکرد مدل MOGA-SP با مدل MOGA برای نرخ‌های زوال مختلف کلر

www.SID.ir

انتقال داده نشوند، زیاد است که این در روند یافتن جواب‌های بهینه تأثیرگذار است. اگرچه تصحیح توسط مدل کامل برای جواب‌های رویه بهینه در هر نسل انجام می‌شود، اما برآورد خیلی دست پایین با استفاده از اصل برهم نهی خطی باعث ایجاد ضعف شدید در روند بهینه‌سازی می‌شود و بسیاری از جواب‌های واقع در رویه برتر پس از محاسبه توابع هدف آنها با مدل کامل ممکن است جزء جواب‌های رویه برتر قرار نگیرند. بنابراین استفاده از مدل پیشنهادی برای نرخ‌های زوال از مرتبه کمتر از ۱، قابل قبول نیست.

در روش مرجع یعنی مدل MOGA با مدل کامل، لازم است مدل بهینه‌سازی در داخل حلقه بهینه‌سازی به دفعات به نرم افزار EPANET مراجعه نماید و مقادیر توابع هدف را محاسبه کند که این نوع حل بسیار زمان بر است. ولی در مدل MOGA-SP فقط برای به‌دست آوردن مقادیر توابع هدف جواب‌های واقع در رویه بهینه پارتو از مدل کامل استفاده می‌شود (که درصد کمتری نسبت به کل جواب‌های یک نسل است) و مقادیر رویه‌های دیگر طی زمان اندکی توسط ماتریس ضرایب مقادیری محاسبه می‌شود. مقایسه زمانی و تعداد فراخوانی‌های مدل کامل بین دو مدل مرجع و مدل پیشنهادی برای حل مسئله مکان‌یابی ایستگاه‌های کلرزنی روی مطالعه موردی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مقایسه زمان اجرای مدل‌ها

نوع مدل	تعداد فراخوانی مدل کامل	زمان اجرای برنامه (ساعت)
MOGA	۲۵۵۰۰	۲۲
MOGA-SP	۳۹۰۰	۳/۱

همانگونه که ملاحظه می‌شود، در عین اینکه مدل MOGA قادر به دستیابی به رویه بهینه پارتو در زمان ۲۲ ساعت است، مدل MOGA-SPدر زمان حدود ۳ ساعت به این رویه برتر دست پیدا می‌کند که در حدود ۷ برابر سریع‌تر از مدل مرجع است. این کاهش زمانی متناسب با کاهش میزان فراخوانی‌های مدل کامل به میزان تقریبی ۷ برابر است. لازم به ذکر است که حل این مسئله در هر دو حالت با استفاده از یک کامپیوتر شخصی لپ تاپ با سرعت پردازشگر ۱/۷۴ گیگاهرتز core i7 چهار هسته‌ای و حافظه جانبی ۴ گیگابایت انجام شد.

در نهایت در هر بار اجرای مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، از حیث زمان مورد نیاز برای دستیابی به یک رویه بهینه پارتو، الگوریتم ژنتیک چند هدفه MOGA-SP دارای برتری چمشگیری نسبت به الگوریتم ژنتیک مدل کامل در رسیدن به جواب بهینه است. همچنین تصمیم گیرنده می‌تواند بر اساس کمترین کیفیتی که از شبکه انتظار دارد (کمترین مورد انتظار تأمین آب سالم SDW) یا بیشترین میزان تزریق (بر اساس بودجه)، نقطه مورد نظر را روی منحنی بهینه به دست آورد. این نقطه متناظر با دو مکان برای نصب ایستگاه کلرزنی در شبکه آب است. به‌عنوان نمونه، در جدول ۲ در حالت فرض نرخ زوال از مرتبه ۲، برای چهار حالت انتخاب دستیابی به کیفیت استاندارد کلر باقیمانده در شبکه (۷۱، ۷۵، ۸۵ و ۹۶ درصد)، دو محل بهینه نصب ایستگاه‌های کلرزنی و میزان غلظت تزریق مربوطه ارائه شده است.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش بر اساس مشخصات شبکه توزیع، جنس لوله‌ها و نوع آب در شبکه نشان دهد که نرخ زوال کلر، از نرخ خطی (مرتبه اول) پیروی نمی‌نماید و امکان مکان‌یابی نقاط بهینه کلرزنی با روش‌های متداول دارای خطا است. برای این منظور، مدل الگوریتم ژنتیک چندهدفه با متامدل اصل برهم نهی خطی به‌منظور مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های تزریق کلر و میزان تزریق بهینه در شبکه توزیع آب با دو هدف کمینه نمودن مقدار کل کلر مصرفی و بیشینه نمودن درصد حجم آب تحویلی سالم با کلر باقیمانده در دامنه استاندارد با دو ایستگاه تزریق در حالت نرخ زوال غیرخطی کلر توسعه داده شد. بررسی استفاده از اصل برهم نهی خطی در این مدل بهینه‌سازی برای شبکه‌های توزیع آب با نرخ زوال غیرخطی کلر نشان داد که استفاده از این اصل علاوه بر ضریب خطی اضمحلال برای ضریب کمتر از یک نیز می‌تواند قابل قبول باشد. اما برای ضرایب زوال از مرتبه بیش از یک دارای خطای زیادی است. مدل MOGA-SP که برای ضرایب غیرخطی زوال کلر (از مرتبه ۲ و ۳) توسعه داده شد،

جدول ۲- نمونه‌های از متغیرهای تصمیم جواب های بهینه

ردیف	شماره گره ایستگاه تزریق	میزان غلظت کلر تزریقی (میلی گرم در لیتر)	شماره گره ایستگاه تزریق	میزان غلظت کلر تزریقی (میلی گرم در لیتر)	SDW	میزان کل کلر مصرفی (کیلوگرم)
۱	۲۲	۰/۷۴۰۹	۱	۱/۲۰۳۸۸۹	۷۱	۱۳/۴۷
۲	۲۲	۰/۷۳۹	۹	۲/۹۴۳۵	۷۵	۱۴/۵۷
۳	۲۲	۰/۰۱۷۸	۹	۳/۲۶۳۳۱	۸۵	۱۹/۷۵
۴	۲۲	۰/۳۷۱۷	۱۱	۳/۷۶۵۴	۹۶	۳۴/۱۸

Archive of SID
www.SID.ir

به‌خوبی توانست رویه بهینه پارتو را نسبت به مدل MOGA (مدل کامل) شناسایی نمایند. همچنین مدل MOGA-SP برای ضرایب زوال از مرتبه ۰/۵ مناسب تشخیص داده نشد که این امر به‌دلیل برآورد خیلی کمتر از میزان واقعی اصل برهم‌نهی در این مقدار ضرایب بود. همچنین سرعت اجرای برنامه برای دستیابی به رویه بهینه پارتو برای مدل MOGA-SP در مقایسه با مدل مرجع MOGA بسیار بالاتر است به‌نحوی که مدل پیشنهادی حدود هفت برابر سریع‌تر از مدل کامل به جواب‌های بهینه (رویه بهینه پارتو) دست پیدا نمود.

۶- قدردانی

نویسندگان مقاله لازم می‌دانند که از نظرات ارزشمند داوران که در بهبود کیفی مقاله کمک شایانی نمودند، کمال تشکر و سپاسگزاری را نمایند.

۷- مراجع

1. Hall, E. L., and Dietrich, A. M. (2000). "A brief history of drinking water." *Opflow*, 26(6), 46-51.
2. Behzadian, K., Alimohammadnejad, M., Ardeshir, A., Jalilsan, F., and Vasheghani, H. (2012). "A novel approach for water quality management in water distribution systems by multi-objective booster chlorination." *International Journal of Civil Engineering*, 10 (1), 51-60.
3. Prasad, T., Walters, G. A., and Savic, D. A. (2004). "Booster disinfection of water supply networks: Multiobjective approach." *J. of Water Resources Planning and Management*, 130, 367-376.
4. Ardeshir, A., Alimohammadnezhad M., Behzadian K., and Jalilsani, F. (2011). "Control of THM formation in multi-objective booster chlorination for water distribution systems." *Computing and Control for the Water Industry, CCWI Conference*, Urban Water Management-Challenges and Opportunities, Exeter, UK.
5. Wable, O., Dumoutier, N., Duguet, J. P., Gelas, G., and Depierre, J. F. (1991). "Modelling chlorine concentration in a network and applicationsto Paris distribution network." *Proc., Water Quality Modelling in Distribution Systems Conf.*, AWWA Research Fundation, Denver, Colo.
6. Hunt W. A., and Kroon, J. R. (1991). "Model calibration for chlorine residuals in distribution systems." *Proc., Water Quality Modeling in Distribution Systems Conf.*, AWWA Research Foundation, Denver, Colo.
7. Clark, R. M., Grayman, W. M., Males, R. M., and Hess, A. F. (1993). "Modeling contaminant propagation in drinking water distribution systems." *J. Envir. Engrg.*, 119(2), 349-364.
8. Rossman, L. A., Clark. R. M., and Grayman. W. M. (1994). "Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems." *J. Envir. Engrg.*, 120(4), 803-820.
9. Tryby, M. E., Boccelli D. L., Uber J. G., Lewis and Rossman, A. (2002). "Facility location model for booster disinfection of water supply networks." *J. of Water Resources Planning and Management*, 128 (5), 322-333.
10. Munavalli, G. R., and Kumar, M. S. M. (2003). "Optimal scheduling of multiple chlorine sources in water distribution systems." *J. Water Resour. Plann.Manage.*, 129(6), 493-504.
11. Rossman, L. A. (2000). EPANET 2: Users Manual, .pp. 43-44.
12. Rossman, L. A., Boulos, P. F., and Altman, T. (1993). ''Discrete volume element method for network water quality models.'' *J. Water Resour. Plan. Manage.*,119(5), 505-517.
13. Boccelli, D. L., Tryby, M. E., Uber, J. G., Rossman, L. A., Zierolf, M. L., and Polycarpou, M. M. (1998). ''Optimal scheduling of booster disinfection in water distribution systems.'' *J. Water Resour. Plan. Manage.*,124(2), 99-111.
14. USEPA. (2005). "National primary drinking water regulations: Stage 2 disinfectants and disinfection byproducts rule, final rule." 40 CFR, Parts 9, 141, and 142, Washington, D.C. <<http://water.epa.gov/lawsregs/rulesregs/sdwa/stage1/factsheet.cfm >> (Nov. 29, 213)
15. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II." *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 6(2), 182-197.
16. Behzadian, K., Kapelan, Z., Savic, D., and Ardeshir, A. (2009). "Stochastic sampling design using a multi-objective genetic algorithm and adaptive neural networks." *Environmental Modelling and Software*, 24(4), 530-541.
17. CWS Benchmarks. (2013). "Wolf-Cordera Ranch." <<http://centres.exeter.ac.uk/cws/benchmarks>> (June 19, 2013).

Archive of SID
www.SID.ir