بهینه‌یابی اقتصادی شبکه آبرسانی بر اساس معیارهای کمی و کیفی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

اردلان ایزدی[1] غلامرضا رخشنده‌رو[2]

(دریافت ۹۱/۸/۱۶ پذیرش ۹۲/۹/۱۵)

چکیده

هزینه‌های گزاف شبکه توزیع آب در طول عمر مفید خود برای تأمین آب با کمیّت و کیفیت مناسب، سبب شده تا طراحی بهینه شبکه، تبدیل به نخستین و اساسی‌ترین مرحله کاهش هزینه شبکه و عاملی برای لحاظ نمودن سایر معیارهای کمّی و کیفی در طراحی شبکه شود. در این تحقیق با بررسی شبکه دو مخزنه تلاش شد تا اثر معیار کمّی قابلیت اطمینان برای ایجاد ظرفیت اضافی در شبکه برای تأمین آب مصرفی در مواقع بحرانی و معیار کیفی غلظت مناسب کلر آزاد باقیمانده در تمام نقاط شبکه، بر روی هزینه طراحی شبکه بررسی شود. برای این کار، یک کد الگوریتم ژنتیک در محیط نرم‌افزار متلب نوشته شد و به نرم‌افزار تحلیلگر هیدرولیکی و کیفی اپیانت متصل شد. نتایج حاصله نشان داد که روش ارائه شده می‌تواند با اندکی افزایش هزینه، ارتباطی منطقی و هماهنگ میان پارامترهای کمّی و کیفی با اهداف بهینه‌یابی ایجاد نماید و به این طریق مبنای جدیدی برای قضاوت انتخاب نهایی حاصل شد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌یابی، شبکه توزیع آب، قابلیت اطمینان، کلر آزاد باقیمانده، الگوریتم ژنتیک

Using GA for the Economic Optimization of WDN Designs Based on Quantitative and Qualitative Criteria

A. Izadi[1] *Gh. R. Rakhshandehroo*[2]

(Received Nov. 6, 2012 Accepted Dec. 6, 2013)

Abstract

The supply of water with a desirable quality and at required quantities by water distribution networks (WDNs) requires exorbitant costs over their effective life. Optimized network design is, therefore, not only a basic and most decisive step toward reducing costs but will also serve a means for considering other quantitative and qualitative criteria in the design process. In this study, a gravitational network with two reservoirs was investigated to determine the effects of the quantitative parameter of resilience index and the qualitative parameter of free chlorine residual on network design costs. The quantitative parameter used gurantees network efficiency at critical demand times through creating extra capacity while the qualitative one is meant to ensure adequate concentrations are maintained throughout the network. For this purpose, a Genetic Algorithm (GA) was written in the Matlab code and incorporated into the EPANET Toolkit to perform thorough WDN hydraulic and water quality analyses. Results showed that the proposed method was capable of creating a logical and consistent relationship between quantitative and qualitative parameters, on the one hand, and design objectives, on the other, although the WDN costs are only slightly increased. It was concluded that the method could be exploited as a new basis for selecting the final WDN optimal design.

Keywords: Optimization, Water Distribution Network, Reliability, Free Chlorine Residual, Genetic Algorithm.

1. MSc Student, Dept. of Eng., Shiraz Univrsity, Shiraz (Corresponding Author) 9131258193 ardalan.izadi@gmail.com
2. Prof., Dept. of Eng., Shiraz University, Shiraz

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد بخش مهندسی راه، ساختمان و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز (نویسنده مسئول) ۰۹۱۳۱۲۵۸۱۹۳ ardalan.izadi@gmail.com
۲- استاد بخش مهندسی راه، ساختمان و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

اهمیت طراحی بهینه (بهینه‌یابی) شبکه‌های توزیع در طول چهار دهه گذشته یکی از موضوعات مورد توجه محققان بوده است و سبب شده تا روش‌های بسیاری با هدف و محوریت کاهش هزینه توسعه یابند [۱].

اگر بهینه‌یابی هزینه شبکه توزیع آب صرفاً در جهت کاهش هزینه از طریق کوچک‌تر نمودن سایز لوله‌ها و یا حذف کامل آنها باشد، می‌تواند باعث عدم توانایی شبکه در تأمین آب مصرفی مشترکان در هنگام بروز شکست شود، از این رو قابلیت اطمینان نیز به‌عنوان هدف و یا قید در بسیاری از بهینه‌یابی‌ها لحاظ شده است [۲ و ۳].

افزایش بیش از حد قابلیت اطمینان در شبکه‌ها با افزایش سن آب و در نتیجه تشدید مشکلات کیفی آب شرب مصرفی مشترکان همراه خواهد بود. وجود غلظت کلر آزاد باقیمانده مناسب در آب می‌تواند ضمانتی برای مناسب بودن کیفیت آب شرب باشد که در گذشته تنها در زمان بهره‌برداری بهینه شده است و هیچ‌گاه به‌عنوان عاملی مؤثر در انتخاب طرح نهایی شبکه، در طراحی‌ها در نظر گرفته نشده است [۴، ۵ و ۶].

در این تحقیق با توجه به اهمیت لحاظ نمودن سایر معیارها در زمان طراحی شبکه و تاکید فرمانی و همکاران بر به کارگیری معیارهای کمی (قابلیت اطمینان[1]) و کیفی (سن آب، کلر تزریقی در شبکه) در طراحی بهینه شبکه توزیع آب، به مطالعه شبکه ارائه شده در سال ۲۰۰۸ توسط کادو و همکاران پرداخته شد تا از این طریق هزینه شبکه توزیع، با استفاده از ابزار قدرتمند الگوریتم ژنتیک[2] بهینه‌یابی شده و نیز تعاملی منطقی بین معیارهای کمی (قابلیت اطمینان) و کیفی (وجود غلظت مناسب از کلر آزاد باقیمانده[3] در تمام نقاط شبکه) ایجاد شود [۷ و ۸]. معیار کمی قابلیت اطمینان با لحاظ نمودن ظرفیت‌های اضافی در شبکه توزیع آب در صدد کاهش نارسایی‌های شبکه در زمان بروز حالت بحرانی و شکست، و معیار کیفی غلظت کلر آزاد باقیمانده با تضمین کیفیت مناسب آب جهت شرب استفاده شد تا بهینه‌یابی واقعی‌تر و کاربردی‌تر ارائه شود و به این ترتیب شخص تصمیم گیرنده بتواند با مقایسه نتایج شبکه‌های مختلف به‌دست آمده از بهینه‌یابی و نیز با توجه به شرایط فنی و اقتصادی پیشرو، اقتصادی‌ترین شبکه را به‌عنوان گزینه نهایی انتخاب نماید.

۲- روش‌شناسی

در این تحقیق، با عنایت به ماهیت تصادفی الگوریتم ژنتیک و عدم قطعیت همگرا شدن الگوریتم به یک جواب ثابت در تحلیل‌های مختلف، کد نوشته شده چندین بار بر روی شبکه اعمال شد تا اقتصادی‌ترین شبکه‌ها به لحاظ هزینه حاصل شوند. برای هر شبکه میزان قابلیت اطمینان و کمترین میزان کلر تزریقی در مخازن برای تأمین غلظت مناسب از کلر آزاد باقیمانده محاسبه شد. با این روش با مقایسه سه معیار در جواب‌های پیشنهادی و در نظر داشتن انتظارات، اهداف و محدودیت‌های پیش‌رو، گزینه نهایی را می‌توان با دید بیشتری انتخاب نمود و از بهینه‌یابی به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای ایجاد ارتباط منطقی بین پارامترهای کمّی و کیفی در شبکه توزیع آب استفاده کرد. کد الگوریتم ژنتیک در محیط نرم‌افزار متلب نوشته و به نرم‌افزار ایپانت متصل شد. در الگوریتم بهینه‌یابی، تابع هدف، کمینه کردن هزینه تجهیزات شبکه به‌صورت رابطه ۱ است. در این تحقیق کلر فقط و فقط هنگامی که غلظت کلر آزاد باقیمانده مناسب در نقاط شبکه تأمین نشده باشد، به‌عنوان قید در هزینه جریمه ایفای نقش می‌نماید. دو قید دیگر در این الگوریتم، تأمین هد فشار مناسب در گره‌های شبکه و قابلیت اطمینان در شبکه به‌صورت رابطه ۲ است. لازم به‌ذکر است که قطر لوله‌ها و نیز مقدار غلظت تزریق کلر در مخازن، متغیرهای تصمیم می‌باشند.

$$\text{Objective Function} : \text{Minimize Capital Cost} \qquad (۱)$$

$$Subject\ to: \begin{cases} C_{min} \le C_i \le C_{max} \\ h_{min} \le h_i \\ RI_{min} \ge 0 \end{cases} \qquad (۲)$$

که در این روابط

C_i غلظت کلر آزاد باقیمانده در گره i از شبکه، C_{min} کمترین غلظت کلر آزاد باقیمانده مجاز در شبکه، C_{max} بیشترین غلظت کلر آزاد باقیمانده مجاز در شبکه، h_i فشار در گره i از شبکه، h_{min} کمترین فشار مجاز در گره‌های شبکه و RI شاخص قابلیت اطمینان است.

۳- کلر آزاد باقیمانده

منظور از کلر آزاد باقیمانده در آب، کلری است که بعد از واکنش با آب و یا سایر مواد موجود در آب هنوز خاصیت گندزدایی داشته باشد مانند اسید هیپوکلروس و یا کلرومین‌ها [۹]. حضور کلر باقیمانده در آب مصرفی مشترکان، ضامن سالم بودن آب مصرفی است که کمینه میزان غلظت کلر باقیمانده در آب به‌منظور کنترل رشد میکرب‌های پاتوژنیک، ناکارآمد نمودن میکروارگانیسم‌ها و جلوگیری از رشد بیوفیلم‌ها و مقدار بیشینه غلظت کلر آزاد باقیمانده برای کنترل بو، مزه و از همه مهم‌تر ایجاد فراورده‌های جانبی سرطان‌زای تری هالومتان است [۱۰]. مقدار حداقل و حداکثر مجاز باقیمانده کلر باقیمانده در آب آشامیدنی طبق راهنمای کیفی آب

[1] Reliability
[2] Genetic Algorithm (GA)
[3] Free Chlorine Residual

www.SID.ir
Archive of SID

شرب کانادا و سازمان سلامت جهانی بر حسب میلی‌گرم در لیتر به‌ترتیب ۰/۲ و ۰/۵ توصیه شده است[۱۱ و ۱۲]. به این ترتیب میزان تزریق کلر در منابع آب باید می‌نیمم باشد تا هزینه تهیه کیفیت مناسب آب در شبکه کاهش یابد. معمول‌ترین مدل برای واکنش کلر با حجم سیال و جداره لوله‌ها مدل‌های زوال مرتبه اول است که اساس تحلیل‌های کیفی این تحقیق قرار گرفت [۱۳].

۴- قابلیت اطمینان

واژه قابلیت اطمینان در شبکه‌های توزیع آب در واقع شاخصی برای سنجش توانایی شبکه در فراهم آوردن آب مناسب چه به لحاظ کمی و چه به لحاظ کیفی در شرایط طبیعی (نرمال) و شرایط بحرانی (غیرنرمال) است. مهم‌ترین مشکل در نظر گرفتن قابلیت اطمینان در طراحی شبکه‌ها، نحوه لحاظ نمودن قابلیت اطمینان بوده است به‌طوری که هیچ معنای قابل قبول کلی پذیرفته شده برای شبکه‌های توزیع آب شهری وجود نداشته است و معنای آن در گذر زمان دچار تغییرات و تکاملاتی شده و همین امر منجر شده تا محققان تعاریف بسیار متنوعی را برای این شاخص عنوان نمایند [۱۴]. در این تحقیق از تعریف شاخص انعطاف پذیری[1] شبکه که در سال ۲۰۰۰ میلادی توسط تودینی ارائه شده است، به‌عنوان قابلیت اطمینان شبکه استفاده شد.

تئوری پیشنهادی تودینی بر اساس ملاحظات هیدرولیکی و فیزیکی شبکه بود و دیگر نیازی به مواجه شدن با آنالیزهای آماری بر اساس احتمالات و حالت‌های مختلف شکست نداشت. وی در تئوری خود معتقد بود که وجود هد فشاری مازاد بر کمینه هد فشاری مجاز[2] در نقاط شبکه می‌تواند باعث کارکرد مناسب‌تر شبکه در مواقع بحرانی و یا شکست در شبکه شود زیرا در این مواقع شبکه با افزایش شدید افت هد مواجه است و در این مواقع، هد مازاد می‌تواند صرف غلبه بر افزایش افت هد شود. هد مازاد از طریق ایجاد ظرفیت‌های اضافی با استفاده از لوله‌هایی با قطرهای بزرگ‌تر از سایزهای مورد نیاز ایجاد می‌شود که طبیعتاً باعث افزایش هزینه شبکه می‌شود. تودینی شاخص انعطاف‌پذیری را بر اساس توان کل در ورودی شبکه[3] به‌صورت زیر پیشنهاد نموده است [۱۵]:

$$RI = \frac{\sum_{i=1}^{nn} q_i (h_i - h_i^*)}{[\sum_{i=1}^{nr} Q_k H_k - \sum_{i=}^{nn} q i h_i^*]} \qquad (۳)$$

که در این رابطه

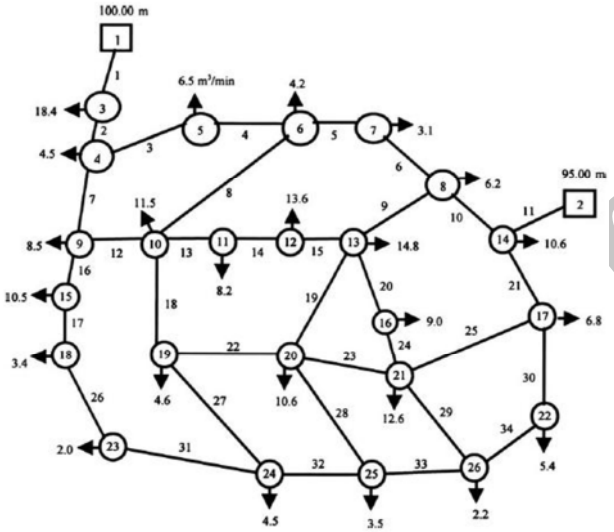
q_i دبی برداشتی از گره i، h_i هد موجود درگره i، h^*_i مینیمم هد مجاز برای گره i، nn تعداد کل گره‌ها، nr تعداد مخازن در سیستم آبرسانی، Q_k دبی انتقالی از مخزن k به شبکه، H_k هد مخزن k است.

۵- مطالعه موردی

روش طراحی مورد نظر برای شبکه ارائه شده توسط کادو و همکاران در سال ۲۰۰۸ میلادی مورد مطالعه قرار گرفت. این شبکه شامل ۹ حلقه با ۳۴ خط لوله است و آب به‌صورت ثقلی از دو مخزن با هد ثابت برای مصرف کنندگان تأمین است. جانمایی لوله‌ها در این شبکه در شکل ۱ نشان داده شده است.

شایان ذکر است که در این تحقیق میزان مقادیر ثابت واکنش حجمی و ثابت جداره‌ای برابر با یک در نظر گرفته شده است.

بهینه‌ترین شبکه یافت شده به لحاظ هزینه، شبکه‌ای است که به سرمایه‌گذاری در حدود ۱۲۵/۳ میلیون روپیه نیازمند است. در این شبکه مقدار قابلیت اطمینان ۰/۲۴۶۲ و کمترین غلظت کلر تزریقی مورد نیاز در مخازن اول و دوم (نقاط گره‌ای ۱ و ۲) به ترتیب ۰/۲۸ و ۰/۳۸میلی‌گرم در لیتر با دز ثابت است.



شکل ۱- جانمایی شبکه نه حلقه‌ای ارائه شده توسط کادو و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۱۱]

برای بررسی صحت و کارایی کد نوشته شده، شبکه با بهینه هزینه به‌دست آمده در این تحقیق با نتایج ارائه شده در سال ۲۰۰۸، مقایسه شد (جدول ۱). همان طور که در جدول ۱ دیده می‌شود، هزینه به‌دست آمده بسیار نزدیک به هزینه ارائه شده در سال ۲۰۰۸ است و تنها اختلافی در حدود ۲ درصد دارد. این در حالی است که شبکه ارائه شده در سال ۲۰۰۸، علاوه بر آنکه نتوانسته است کمترین فشار مجاز در گره ۲۶ را تأمین نماید، دارای مقادیر RI و غلظت تزریق کلر بیشتری نسبت به شبکه پیشنهادی در این تحقیق

[1] Resilience Index
[2] Minimum allowable Pressure Head
[3] Total Available Power at the Entrance

www.SID.ir

جدول ۱- مقایسه شبکه به‌دست آمده با شبکه ارائه شده کادو و همکاران

شبکه	غلظت کلر تزریقی در مخزن ۲ (mg/L)	غلظت کلر تزریقی در مخزن ۱ (mg/L)	RI	هزینه (روپیه)
شبکه پیشنهادی در این تحقیق	۰/۳۸	۰/۲۸	۰/۲۲۶	۱۲۵۳۴۲۸۱۰
شبکه پیشنهادی کادو و همکاران	۰/۵۰	۰/۳۲	۰/۲۹۸	۱۲۳۲۶۸۸۶۴

است. به عبارت دیگر هزینه کمتر و RI بیشتر از محاسن شبکه ارائه شده در سال ۲۰۰۸ و تأمین فشار در گره ۲۶ و غلظت مورد نیاز کمتر از کلر تزریقی، از محاسن شبکه ارائه شده در این تحقیق است.

افزایش قابلیت اطمینان شبکه به معنی افزایش سطح عملکرد شبکه در مواقع بحرانی و افزایش غلظت کلر تزریقی در شبکه به معنی افزایش هزینه گندزدایی آب است. با توجه به هدف طراحی مبنی بر کمینه نمودن هزینه، تا حد امکان باید قابلیت اطمینان بیشینه و غلظت کلر تزریقی کمینه شود که معمولاً به‌طور همزمان میسر نمی‌شود.

در جدول ۲، ده مورد از بهترین جواب‌های به‌دست آمده، همراه با مشخصات آنها جمع‌آوری شده است. هدف از ارائه این جدول فراهم نمودن شرایط مقایسه شبکه‌ها به لحاظ سه معیار هزینه، RI و کمینه غلظت کلر تزریقی در مخازن است تا نحوه و میزان همسویی هر یک از معیارهای طراحی با اهداف بهینه‌یابی سنجیده شود. لازم به ذکر است که متوسط میزان تزریق کلر در شبکه در واقع متوسط وزنی تزریق در دو مخزن شبکه است. همان‌گونه که در این جدول دیده می‌شود، انتظار افزایش RI و کمینه غلظت کلر تزریقی با افزایش هزینه همواره صحیح و صادق نیست و گاهی با افزایش هزینه، کاهش قابلیت اطمینان و یا کاهش کمینه غلظت کلر تزریقی در مخازن اتفاق می‌افتد.

برای نمایش بهتر اثر افزایش هزینه‌بر دو معیار کمینه غلظت کلر تزریقی مورد نیاز در مخازن و RI، شکل‌های ۲ و ۳ بر اساس اطلاعات جدول ۲ ترسیم شده است. این شکل‌ها علاوه بر گسترش دید فرد تصمیم گیرنده برای انتخاب نهایی از میان گزینه‌های مختلف پیشنهاد شده، نشان دهنده نوسانات موجود در روند افزایش کمینه غلظت کلر تزریقی در مخازن و RI با افزایش هزینه است.

همانطور که در شکل‌های ۲ و ۳ دیده می‌شود، در هشت مورد از شبکه‌های ارائه شده در جدول ۲، با افزایش هزینه، RI و میزان کمینه غلظت کلر تزریقی رفتار متناقضی دارند. به‌عبارتی دیگر، با افزایش RI، کاهش میزان غلظت کلر تزریقی و با کاهش RI، افزایش میزان غلظت کلر تزریقی مشاهده می‌شود و از این طریق شخص تصمیم گیرنده می‌تواند دو معیار RI و غلظت کلر تزریقی را مطابق با اهداف مورد نظر طراحی هماهنگ سازد. به‌عنوان مثال ممکن است فرد تصمیم گیرنده، شبکه شماره ۲ را نسبت به شبکه شماره ۱ ارجح بداند و از این طریق فقط با پرداخت ۰/۳درصد هزینه بیشتر، قابلیت اطمینان شبکه را ۱۱درصد بهبود بخشد و حتی میزان متوسط غلظت تزریق کلر را ۶ درصد کاهش دهد و یا اگر شخص تصمیم گیرنده به لحاظ مسائل اقتصادی با محدودیت‌هایی مواجه نباشد، با انتخاب شبکه شماره ۶ و افزایش ۱/۱درصد هزینه از شبکه با کمترین هزینه به‌دست آمده، قابلیت اطمینان را ۱۸/۷درصد و غلظت کلر تزریقی در مخزن دوم را ۱۳/۲درصد افزایش دهد.

نوسانات مربوط به گراف هزینه در برابر کمینه میزان غلظت کلر تزریقی در مخزن شبکه به‌علت متفاوت بودن موقعیت گره‌های انتهایی (گره با هیچ جریان خروجی به جز دبی مصرفی خود) شبکه‌های مختلف است (شکل ۲). به‌عنوان نمونه در شبکه ۱ و ۲، آب برای رسیدن به گره انتهایی ۲۴ باید حداقل مسافت ۴۱۷۰ متر را به‌ترتیب در مدت ۱/۳۵ و ۱/۳۶ ساعت طی نماید در صورتی

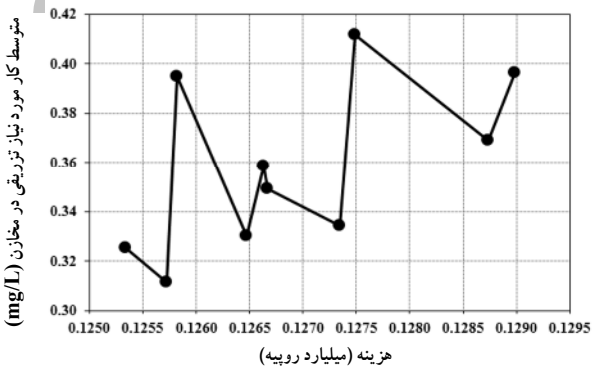
جدول ۲- مقایسه ده مورد از بهترین جواب‌های به دست آمده برای شبکه نه حلقه‌ای شبکه ارائه شده توسط کادو

شبکه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
هزینه (میلیارد روپیه)	۰/۱۲۵۳	۰/۱۲۵۷	۰/۱۲۵۸	۰/۱۲۶۵	۰/۱۲۶۶	۰/۱۲۶۷	۰/۱۲۷۳	۰/۱۲۷۵	۰/۱۲۸۷	۰/۱۲۹۰
مینیمم غلظت کلر تزریقی مورد نیاز در مخزن ۱ (mg/l)	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۳۱	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۳۴	۰/۲۸	۰/۳۱
مینیمم غلظت کلر تزریقی مورد نیاز در مخزن ۲ (mg/l)	۰/۳۸	۰/۳۵	۰/۵	۰/۳۹	۰/۴۵	۰/۴۳	۰/۴	۰/۵	۰/۴۷	۰/۵
متوسط کلر مورد نیاز تزریقی در مخازن (mg/l)	۰/۳۳	۰/۳۱	۰/۴۰	۰/۳۳	۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۴۱	۰/۳۷	۰/۴۰
RI	۰/۲۴۶	۰/۲۷۲	۰/۲۶۲	۰/۲۷۷	۰/۲۷۷	۰/۲۹۲	۰/۲۷۱	۰/۲۶۰	۰/۲۸۴	۰/۲۹۳

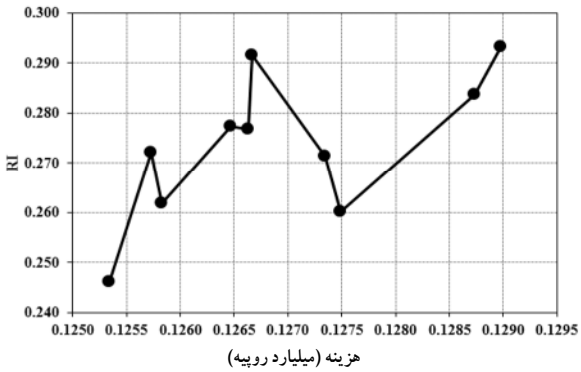
www.SID.ir
Archive of SID

که در شبکه ۳، گره انتهایی گره شماره ۲۳ است که آب برای رسیدن به این نقطه باید حداقل مسافت ۴۴۲۰ متر را در مدت ۱/۴۹ ساعت طی نماید و طبیعتاً طی مسافت طولانی‌تر نیازمند غلظت کلر تزریقی بیشتری است.

نوسانات مربوط به گراف هزینه در برابر RI متأثر از میزان افت انرژی در مسیر حرکت آب تا رسیدن به‌دست مشترکان در شبکه‌های مختلف است (شکل ۳). به نحوی که هرچه میزان افت انرژی ایجاد شده در مسیرهای حرکت آب کمتر باشد میزان RI بیشتر می‌شود. به‌عنوان نمونه، قطر بزرگ‌تر لوله‌ها در شبکه ۲ نسبت به شبکه ۱ (هر دو شبکه دارای مسیر حرکت یکسان آب می‌باشند)، باعث افزایش فشار در گره‌ها و در نتیجه شاخص RI در این شبکه شده است. این در حالی است که قطر بزرگ‌تر لوله‌ها در شبکه شماره ۳ نسبت به شبکه شماره ۲ علاوه بر آنکه باعث افزایش شاخص RI نشده است، بلکه این شبکه دارای RI کمتری نسبت به شبکه ۲ است. علت این امر را می‌توان مستقیماً مربوط به تغییر مسیر حرکت آب در شبکه ۳ نسبت به شبکه ۲ دانست. به‌عبارتی دیگر، مسیر حرکت آب در شبکه ۳ به‌گونه‌ای تغییر نموده است که سبب افزایش افت هد در شبکه و نتیجتاً کاهش فشار در نقاط شبکه و در نتیجه سبب کاهش RI شبکه شده است.



شکل ۲- تغییرات هزینه در برابر متوسط کلر تزریقی مورد نیاز در مخازن برای ۱۰ مورد از بهترین نتایج شبکه ارائه شده توسط کادو



شکل ۳- تغییرات هزینه در برابر RI برای ۱۰ مورد از بهترین نتایج شبکه ارائه شده توسط کادو

۶- نتیجه‌گیری

شبکه ارائه شده توسط کادو و همکاران در سال ۲۰۰۸، با طراحی یک کد الگوریتم ژنتیک و لحاظ نمودن دو قید قابلیت اطمینان و غلظت کلر آزاد باقیمانده بهینه‌یابی اقتصادی شد. با استفاده از این نوع بهینه‌یابی، فرد تصمیم گیرنده می‌تواند با مقایسه سه معیار هزینه، RI و کمینه غلظت کلر تزریقی شبکه‌های مختلف، با انتخاب گزینه مناسب تعاملی منطقی و مناسب بین امکانات شبکه با شرایط فنی و مالی پیش رو ایجاد نماید. نتایج نشان داد که با افزایش جزئی هزینه می‌توان قابلیت اطمینان شبکه را بهبود بخشید بدون آنکه نیاز به تزریق غلظت بیشتری از کلر در مخازن باشد. به‌عبارتی دیگر افزایش هزینه شبکه الزاماً به معنی افزایش قابلیت اطمینان و کمینه غلظت کلر تزریقی در مخازن شبکه نیست و علت این امر را می‌توان در یکسان نبودن مسیر حرکت آب در همه شبکه‌ها دانست که در نتیجه باعث تغییر عوامل متعدد مرتبط با یکدیگر از جمله فشار در گره‌ها و سرعت حرکت آب در لوله ها می‌شود که این عوامل مستقیماً بر روی RI و کمینه غلظت کلر تزریقی مورد نیاز، مؤثر هستند.

۷- مراجع

1. Vairavamoorthy, K., and Ali, M. (2005). "Pipe index vector: A method to improve Genetic-Algorithm-based pipe optimization." *Water Resources Planning and Management*, 131 (12), 1117-1125.
2. Afshar, M. H., and Jabbari, E. (2008). "Simultaneous layout and pipe size optimization using genetic algorithm." *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 33 (2B), 391-409.
3. Kadu, M. S., Gupta, R. and Bhave, P. R. (2008). "Optimal design of water networks using a modified genetic algorithm with reduction in search space." *J. of Water Res. Plan. and Manage.*, 147 (2), 147-160.
4. 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. of Water Resources Planning And Management*, 124(2), 99-111.

Archive of SID

www.SID.ir

5. Rouhiainen C. J., Tade, C., and West, G.N. (2003). "Multi-objective genetic algorithm for optimal scheduling of chlorine dosing in water distribution systems." Maksimovic C., Butler, D. and Mermon, F.A. (Eds): *Advances in water supply management*, swets and Zeitlinger, Lisse, pp. 459-469.
6. Munavalli, G. R., and Kumar, M. S. (2003). "Optimal scheduling of multiple chlorine sources in water distribution systems." *J. of Water Resources Planning and Management*, 129 (6), 493-504.
7. Farmani, R., Walters, G. A. and Savic, D. A. (2005). "Trade-off between total cost and reliability for Anytown water distribution network." *J. of Water Res. Plan. and Manage*., 131 (3), 161-171.
8. Farmani, R., Walters, G. A., and Savic, D. A. (2006), "Evolutionary multi-objective optimization of the design and operation of water distribution network: Total cost vs. reliability vs. water quality." *J. of Hydroinformatics*, 8(3), 165-179.
9. EPA. (1999). *Guidance manual, alternative disinfectants and oxidants*, USA.
10. Tabesh, M., and Zabihi, M. (2008). "Effects of qualitative constraints on water distribution network optimization." *4th Congress on Civil Engineering*, Tehran University, Tehran (In Persian).
11. Federal-Provincial Territorial Committee on Helath and Environmental. (2009). "Guidelines for Canadian drinking water quality -chlorine."
<http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/alt_formats/hecs-sesc/pdf/pubs/water-eau/chlorine-chlore/tech_doc_chlor eng.pdf> (May 2012).
12. WHO Seminar Pack for Drinking-Water Quality (1999). "Disinfiectants and disinfection by products."
<http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/S13.pdf>(May 2012).
13. Rossman, L. A. (2000). "EPANET2, users manual." U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH. <http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/EPANET/EN2manual.pdf>(2012).
14. Bao, Y., and Mays, L. W. (1990). "Model for water distribution system reliability." *J. of Hydraulic Engineering*, 116 (9), 1119-1137.
15. Todini, E. (2000). "Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach." *Urban Water*, 2 (3), 115-122.

Archive of SID

www.SID.ir