

کالیبراسیون مدل‌های شبکه توزیع آب شهری با استفاده از روش بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها

سیاوش یزدانی^۲

یوسف حسن زاده^۲

محمود فغفور مغربی^۱

(دریافت ۸۹/۱۱/۱۱ پذیرش ۹۰/۸/۳۰)

چکیده

نشت آب یکی از معضلات اصلی شبکه‌های توزیع است و با توجه به محدودیتهای موجود در منابع تأمین آب و هزینه بالای آن، کاهش میزان نشت در شبکه‌های توزیع آب را می‌توان یکی از اهداف عمده سازمان‌های تأمین کننده آب دانست. یکی از روشهای نشت‌یابی در شبکه توزیع آب، استفاده از کالیبراسیون فشارهای گره‌ای با برداشت فشار در چند نقطه از شبکه است. فرایند کالیبراسیون به صورت انجام بهینه‌سازی یک تابع هدف با قیودی مطرح می‌گردد. از این رو علاوه بر تحلیل هیدرولیکی شبکه، نیاز به استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌یابی نیز است. در این مقاله به مقایسه دو روش بهینه‌یابی الگوریتم زنتیک و کلونی مورچه‌ها در کالیبراسیون فشارهای گره‌ای و یافتن نشت پرداخته شد. به منظور بررسی کارایی و نحوه عمل این دو روش در شناسایی نشت، تحلیل‌ها روی شبکه با ایجاد نشت فرضی صورت گرفت که نتایج به دست آمده، کارآمدی روش بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها را در شناسایی موقعیت و مقدار نشت در گره‌های شبکه نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: نشت، الگوریتم‌های بهینه‌یابی، شبکه توزیع آب، کالیبراسیون فشارهای گره‌ای

Calibration of Water Supply Systems Based on Ant Colony Optimization

Mahmoud Faghfoor Maghrebi¹

Yousef Hasanzadeh²

Siyavash Yazdani³

(Received Jan. 31, 2011 Accepted Nov. 21, 2011)

Abstract

Leakage is one of the main problems in the water supply systems and due to the limitations in water supply and its costly process, reduction of leak in water distribution networks can be considered as one of the main goals of the water supply authorities. One of the leak detection techniques in water distribution system is the usage of the recorded node pressures at some locations to calibrate the whole system node pressures. Calibration process is accomplished by the optimization of a constrained objective function. Therefore, in addition to performing a hydraulic analysis of the network, application of an optimization technique is needed. In the current paper, a comparison between the ant colony and genetic algorithm methodes, in calibration of the node pressures and leak detections was investigated. To examine the workability and the way of leak detection, analysis of the network with an assumed leak was carried out. The results showed that the effectiveness of the ant colony optimization in the detection of the position and magnitude of leak in a water network.

Keywords: Leak, Optimization Algorithms, Water Distribution Network, Node Pressure Calibration.

1. Prof. of Civil Eng., Dept. of Eng., Ferdowsi University of Mashhad (Corresponding Author) (+98 511) 8815100 maghrebi@um.ac.ir

2. Prof of Civil Eng., Dept. of Eng., University of Tabriz, Tabriz

3. M.Sc. of Water Eng., Dept. of Civil Eng., University of Tabriz, Tabriz

۱- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، نویسنده مسئول (۰۵۱۱) ۸۸۱۵۱۰۰ maghrebi@um.ac.ir

۲- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه تبریز

۳- کارشناس ارشد مهندسی عمران- آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

با توجه به حل و کنترل دستی شبکه، استفاده از روش آزمون و خطا تنها در شبکه‌های کوچک با پارامترهای تنظیمی کم، قابل به‌کارگیری است و به‌منظور حل دستی مسئله باید ساده‌سازی‌هایی صورت گیرد تا با مسائل پیچیده شبکه‌ها برخورد نشود. سرعت همگرایی نیز در رسیدن به جواب نهایی در این روش خیلی کند است. ارسبی^۶ و وود^۷ روشهای صریح برای کالیبراسیون ارائه داده‌اند [۲]. وود و بولوس^۸ ثابت نموده‌اند که چگونه می‌توان روابط شبکه را به‌منظور تحلیل هیدرولیکی برحسب ارتفاع هیدرولیکی یا مصارف گره‌ای بیان نمود. آنها با به‌کارگیری الگوریتم ارائه شده توسط ارسبی الگوریتمی را برای انجام کالیبراسیون برحسب ضرایب افت ارتفاع هیدرولیکی ارائه نموده‌اند که به تصحیح پارامترهای افت یا ضریب زبری می‌پردازد [۳].

در فرایند کالیبراسیون با استفاده از این روش به روابط انرژی یا پیوستگی با توجه به پارامتر اندازه‌گیری شده در شبکه (دبی یا فشار) افزوده می‌شود. متغیری که در این رابطه مجهول است، می‌تواند ضریبی باشد که برای تصحیح زبری هر لوله شبکه به‌کار رود. با یک مجموعه از جریانات اولیه تخمینی به حل مسئله بالا پرداخته می‌شود، تا هنگامی که تفاوت مقادیر در دو تکرار متوالی ناچیز گردد.

نکته منفی اساسی در مورد روشهای صریح این است که تعداد پارامترهای مجهول به‌وسیله تعداد اندازه‌گیری‌ها محدود خواهد شد. یعنی اگر تعداد پارامترهای مجهول که به‌منظور تنظیم در انجام کالیبراسیون مطرح می‌گردند از تعداد مشاهدات بیشتر باشد، مسئله نامعین شده و حل روابط امکان‌پذیر نیست. اما در روشهای غیر صریح (ضمنی)، فرایند کالیبراسیون به‌صورت انجام بهینه‌سازی^۹ یک تابع هدف با قیودی مطرح می‌گردد که حل آن در واقع منجر به تشریح پارامترهای مجهول خواهد شد.

این شیوه مؤثرترین راه ممکن برای انجام فرایند کالیبراسیون است. نکته‌ای که باید به آن توجه نمود این است که دو روش دیگر کالیبراسیون یعنی روش آزمون و خطا و روش صریح، بیشتر به توسعه مفاهیم اساسی در رابطه با کالیبراسیون می‌پردازند و کمتر جنبه کاربردی دارند. اما روش اخیر که طی آن کالیبراسیون مدل تحلیل شبکه مورد نظر به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی مطرح می‌گردد، علاوه بر دقت، از تکامل و سرعت محاسباتی بهتری نیز در انجام این فرایند برخوردار است.

محققان مختلف توابع هدف متفاوتی در بحث بهینه‌سازی شبکه‌های آب از جمله فرایند کالیبراسیون آنها ارائه نموده‌اند. در

یکی از عوامل مؤثر در بهبود کیفیت مدیریت شبکه‌های آبرسانی کاهش آب به‌حساب نیامده است. نشت آب در شبکه‌های توزیع آب یکی از مهم‌ترین دلایل ایجاد آب به‌حساب نیامده فیزیکی محسوب می‌شود، بنابراین تعیین محل و مقدار نشت به‌عنوان مهم‌ترین قدم در جهت کاهش تلفات فیزیکی آب بوده و افزایش راندمان و عملکرد شبکه‌های توزیع آب شهری را به‌دنبال دارد.

در هنگام وقوع شکستگی در یک ناحیه از شبکه توزیع آب، به‌علت افزایش دبی و در نتیجه سرعت جریان، میزان فشار در نقاط نزدیک به محل شکستگی کاهش می‌یابد. در صورتی که در شبیه‌سازی شبکه این شکستگی در نظر گرفته نشود، میزان فشار گره در شبیه‌سازی بیشتر از میزان فشار واقعی به‌دست آمده از عملیات فشارسنجی خواهد بود. انتظار می‌رود با مجموعه عملیاتی مرکب از فشارسنجی و دبی‌سنجی همراه با شبیه‌سازی هیدرولیکی و کالیبراسیون شبکه بتوان گره‌های دارای نشت را در شبکه تعیین نمود. کالیبراسیون فرایندی است که مشخصات و پارامترهای مدل را تا جایی تغییر می‌دهد که اختلاف کمیتهای محاسبه شده توسط مدل با اطلاعات مشاهداتی (واقعی) به یک سطح مطلوب و قابل قبول برسد [۱].

مدل‌های کالیبراسیون هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب شهری را می‌توان در دو دسته کلی کالیبراسیون با استفاده از اطلاعات حالت ماندگار^۱ و اطلاعات غیرماندگار^۲ تقسیم نمود. در کالیبراسیون با استفاده از اطلاعات حالت ماندگار تنها اطلاعات مربوط به حالت پایدار شبکه استفاده شده و برای اضافه نمودن اطلاعات جدید، شبکه تنها تحت شرایط مختلف بارگذاری (عادی یا آتش‌نشانی) قرار می‌گیرد.

برای ایجاد اطلاعات بیشتر و بالطبع کالیبراسیون کارآمدتر، کالیبراسیون با استفاده از اطلاعات حالت غیرماندگار پدید آمده است. در این حالت فشارسنجی لحظه‌ای نقاط خاص همزمان با ایجاد یک حرکت وابسته به زمان (بستن یا باز کردن ناگهانی یک دریچه) صورت می‌گیرد و از اطلاعات تولید شده می‌توان در جهت کالیبراسیون نشت، زبری و یا مکان‌یابی نشت استفاده نمود.

کالیبراسیون در حالت دائمی خود بر اساس روش حل مسئله و تعداد پارامترهای تنظیمی به‌کار گرفته شده در الگوریتم مسئله به سه دسته کلی کالیبراسیون با استفاده از روش آزمون و خطا^۳، کالیبراسیون صریح^۴ و کالیبراسیون ضمنی^۵ تقسیم‌بندی می‌گردد.

¹ Steady State

² Transient

³ Trial and Error Calibration

⁴ Explicit Network Calibration

⁵ Implicit Network Calibration

⁶ Ormsbee

⁷ Wood

⁸ Boulous

⁹ Optimization Procedure

این زمینه می‌توان به تحقیق ارسبی اشاره نمود که تا کنون مورد استفاده است [۴]. ارسبی و لیگریدی^۱ با در نظر گرفتن ضرایب وزنی در مسئله بهینه‌سازی، تابع هدفی با ضرایب وزنی فشار و جریان را پیشنهاد داده‌اند [۵].

روش بهینه‌سازی که در بیشتر مقالات و نرم‌افزارها از آن استفاده شده است، روش بهینه‌یابی الگوریتم ژنتیک^۲ است. اصول اولیه الگوریتم ژنتیک توسط هولاند و همکاران^۳ ارائه گردیده است [۶]. گلدبرگ^۴ یک الگوریتم تکاملی - ژنتیکی برازنده^۵ که الگوریتم ژنتیک درهم ریخته نامیده می‌شود را پیشنهاد داده است [۷].

ویتکووسکی^۶ و سیمپسون^۷ مسئله کالیبراسیون مشابهی را با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک حل کرده‌اند [۸]. آنها از یک مدل واقعی کدگذاری^۸ الگوریتم ژنتیک استفاده کرده‌اند. این مدل کالیبراسیون بر روی چندین نمونه اجرا شده است و الگوریتم ژنتیک برای شبکه کوچک مورد مطالعه در مقاله ارائه شده توسط لیگت^۹ و پودار^{۱۰} به‌کار گرفته شده است [۹]. آنها در تمامی فرایندهای کالیبراسیون، ضریب زبری را به‌عنوان تنها پارامتر تنظیمی مدل در نظر گرفته‌اند. ساج^{۱۱} و وو^{۱۲} به‌کمک کالیبراسیون شبکه توزیع آب به‌روش بهینه‌یابی الگوریتم ژنتیک و داده‌های میدانی، توانستند نقاط حساس شبکه از لحاظ نشت را پیش‌بینی کرده و موقعیت نشت را نیز پیدا کنند [۱۰]. والسکی و همکاران^{۱۳} نیز با کمک روش الگوریتم ژنتیک درهم ریخته به کالیبراسیون زبری و مصارف گره‌ای پرداخته‌اند که در منوی کالیبراسیون نرم‌افزار WaterGems از آن استفاده می‌شود [۱۱].

کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها^{۱۴} در مهندسی هیدرولیک از زمان پیدایش این الگوریتم بسیار اندک بوده است. اکثر کارهای ارائه شده در زمینه حداقل کردن هزینه طرح است. استفلد^{۱۵} و توبالتز^{۱۶} با استفاده از روش کلونی مورچه‌ها قطر بهینه برای لوله‌های شبکه توزیع آب را انتخاب کرده‌اند به طوری که به مشترکان، میزان آب لازم با فشار قابل قبول تحویل شود [۱۲].

مایر و همکاران^{۱۷} نیز اقدام به بهینه‌کردن هزینه طرح شبکه توزیع آب به‌روش کلونی مورچه‌ها کرده‌اند [۱۳]. آنها به مقایسه دو روش کلونی مورچه‌ها و الگوریتم ژنتیک پرداخته و در نهایت به این نتیجه رسیده‌اند که روش کلونی مورچه‌ها جایگزین مناسبی برای الگوریتم ژنتیک است. در مقاله دیگری که توسط لوپز و همکاران^{۱۸} ارائه شده است، به‌روش کلونی مورچه‌ها، برنامه زمانی روشن و خاموش شدن پمپ را طرح‌ریزی کرده‌اند که موجب کاهش مصرف انرژی شده است [۱۴]. افشار و همکاران نیز با استفاده از این روش مکان‌های بهینه به‌منظور استقرار ایستگاههای پایش کیفی در شبکه‌های توزیع آب شهری را به‌روش کلونی مورچه‌ها تعیین نموده‌اند [۱۵].

با توجه به مطالب بالا با به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌یابی برای کالیبراسیون، علاوه بر تحلیل هیدرولیکی شبکه نیاز به اعمال روابط بهینه‌یابی مورد نظر نیز است. در حال حاضر در نرم‌افزار WaterGems تحلیل هیدرولیکی و کالیبراسیون به‌روش الگوریتم ژنتیک انجام می‌گیرد. هدف از انجام این تحقیق بررسی کارایی و دقت روش بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها در کالیبراسیون شبکه‌های توزیع آب در مقایسه با الگوریتم ژنتیک بود. این روش توسط دوریگو^{۱۹} برای اولین بار مطرح و با همکاری مانیزو^{۲۰} و کلورنی^{۲۱} توسعه داده شده است که روش جدیدتری نسبت به الگوریتم ژنتیک است [۱۶ و ۱۷]. تحلیل هیدرولیکی شبکه به‌وسیله نرم‌افزار EPANET2.0 و برنامه بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها نیز به زبان متلب^{۲۲} نوشته شد، سپس با اتصال پویا بین دو نرم‌افزار، مشخصه‌های هیدرولیکی به شبکه اعمال و نتایج آن دریافت شد و با تکرار این روند عملیات بهینه‌یابی و کالیبراسیون صورت پذیرفت.

شبیه‌سازی و کالیبراسیون شبکه توزیع آب یکبار به‌وسیله نرم‌افزار WaterGems و یکبار به‌وسیله نرم‌افزار EPANET2.0 و برنامه نوشته شده به زبان متلب صورت گرفت. سپس به مقایسه نتایج حاصل از دو روش الگوریتم ژنتیک و کلونی مورچه‌ها پرداخته شد. نوع شبیه‌سازی به‌کار گرفته شده در هر گام زمانی، شبیه‌سازی در حالت دائمی بود.

۲- مواد و روشها

ابتدا روابط کالیبراسیون به‌روش بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها ارائه شد و سپس به روابط کالیبراسیون به‌وسیله الگوریتم ژنتیک پرداخته

- 1 Lingireddy
- 2 Genetic Algorithm (GA)
- 3 Holland et al.
- 4 Goldberg
- 5 Competent Genetic-Evolutionary
- 6 Vitkovsky
- 7 Simpson
- 8 Coding
- 9 Ligget
- 10 Pudar
- 11 Sage
- 12 Wu
- 13 Walski et al.
- 14 Ant Colony Optimization (ACO)
- 15 Ostfeld
- 16 Tubaltzev

- 17 Maier et al.
- 18 López et al.
- 19 Dorigo
- 20 Maniezzo
- 21 Colomi
- 22 MATLAB

شد. در کالیبراسیون به وسیله کلونی مورچه‌ها، تحلیل‌های هیدرولیکی بر اساس فرضیات نرم‌افزار EPANET2 صورت گرفت. تابع هدف که برازندگی^۱ به وسیله آن محاسبه شد، به صورت زیر است

$$f(X) = \min \sum_{j=1}^N (Hobs_j - Hsim_j)^2 \quad (۱)$$

که در این رابطه

$Hobs_j$ فشار اندازه‌گیری شده در گره j ، $Hsim_j$ فشار شبیه‌سازی شده در گره j و N تعداد گره‌ها است.

برای اینکه فشارهای شبیه‌سازی شده به فشارهای مشاهداتی نزدیک شوند، مصارف گره‌ای برداشتی از کنتورها (D_j) در ضرایبی وزنی W_i که متغیرهای تصمیم مدل بهینه‌یابی هستند، ضرب شد و به این صورت در هر گره دبی برداشت برابر $w_i D_j$ بود. مقدار تغییرات ضریب وزنی معمولاً در بازه $0/5$ تا $1/5$ با میزان افزایش $0/1$ انتخاب می‌شود. به عنوان مثال برای برداشت گره‌ای 10 لیتر بر ثانیه، دبی‌های برداشتی در آن گره بین 5 تا 15 لیتر بر ثانیه تغییر خواهند نمود. در نرم‌افزار WaterGems نیز انتخابها در هر گره به این صورت به دست می‌آید.

با انتخاب بهترین مقدار مصرف گره‌ای برای هر گره از شبکه، مناسب‌ترین^۳ مقدار تابع برازندگی به دست می‌آید. این انتخاب بهینه، به کمک روشهای بهینه‌یابی صورت می‌گیرد. یکی از روشهای بهینه‌یابی مبتنی بر هوش جمعی، روش کلونی مورچه‌ها است. رابطه اصلی در این روش که احتمال انتخاب را به فرمون^۴ و راهنمای کاوشی^۵ ارتباط می‌دهد، به صورت زیر است

$$p_{ij}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_k [\tau_{ik}(t)]^\alpha [\eta_{ik}]^\beta} \quad (۲)$$

که در این رابطه

$p_{ij}(t)$ احتمال آنکه مصرف گره‌ای i برای گره j در تکرار t انتخاب شود، $\tau_{ij}(t)$ مقدار فرمون برای مصرف گره‌ای i در گره j در تکرار t است که بعد از هر تکرار به هنگام می‌شود. همچنین η_{ij} مقدار مطلوبیت (راهنمای کاوشی) برای مصرف گره‌ای i و گره j است که مقداری ثابت است. در اینجا از مطلوبیت برای افزایش احتمال انتخاب مصارف مشاهداتی در هر گره (برداشت شده از کنتورها) استفاده می‌شود که راهکار خوبی برای افزایش سرعت رسیدن به جواب بهینه و نیز یافتن نشت‌های واقعی است. مقدار مطلوبیت با توجه به شبکه مورد نظر و از طریق آنالیز

حساسیت تعیین می‌گردد. α و β نیز برای کنترل ارزش نسبی شدت فرمون و مطلوبیت در هر انتخاب به کار می‌روند که در اینجا پس از انجام آنالیز حساسیت و به دلیل کوچک بودن نسبی شبکه مورد مطالعه، هر دو برابر با یک در نظر گرفته شده‌اند.

به هنگام سازی فرمون مهم‌ترین بخش در بهینه‌سازی به روش کلونی مورچه‌ها است. در هر تکرار برای هر گره، یک انتخاب از بین مصارف گره‌ای صورت گرفته و فشارهای حاصل از این انتخابها با فشارهای مشاهداتی، مقایسه و برازندگی محاسبه می‌شود. در صورتی که برازندگی حاصل بهترین برازندگی تا آن تکرار باشد، باید احتمال انتخاب مصارف گره‌ای که برای هر گره انتخاب شده‌اند را افزایش و احتمال انتخاب بقیه مقادیر را کاهش داد. این عمل به وسیله رابطه زیر انجام می‌شود

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij} \quad (۳)$$

که در این رابطه

$\tau_{ij}(t+1)$ مقدار فرمون در تکرار $(t+1)$ و $\Delta \tau_{ij}$ مقدار به هنگام سازی فرمون است. ρ نیز نرخ تبخیر^۷ فرمون است که عددی بین صفر و یک است. فرمون در ابتدای برنامه برای کلیه انتخابها در تمامی گره‌ها برابر یک است و در تکرارهای مختلف، هر بار که جواب بهتری به دست آید در هر گره فقط مقدار فرمون مربوط به یک مصرف گره‌ای افزایش می‌یابد یعنی آن مصرف گره‌ای که باعث شده به جواب بهینه نزدیک‌تر شده و مقداری به فرمون آن افزوده می‌شود که همان مقدار $\Delta \tau_{ij}$ است و احتمال انتخاب آن در تکرارهای بعدی طبق رابطه ۲ افزایش می‌یابد. در حالی که برای دیگر مصارف گره‌ای در آن گره، $\Delta \tau_{ij}$ برابر با صفر است پس فرمون این مقادیر فقط تبخیر می‌شوند و به این صورت مقدار فرمون آنها از تکرار قبلی کمتر شده و احتمال انتخاب آنها در تکرارهای بعدی طبق رابطه ۲ کاهش می‌یابد.

به عنوان مثال اگر مصرف ثابت شده به وسیله کنتور در یک گره مشخص از شبکه D_j برابر 1 لیتر بر ثانیه باشد و نشتی به میزان $0/5$ لیتر بر ثانیه نیز در این گره وجود داشته باشد جوابی که در انتها باید به دست آید مصرف $1/5$ لیتر بر ثانیه در گره مذکور است. اگر مثلاً مقدار راهنمای کاوشی بر اساس آنالیز حساسیت انجام شده η_{2j} برابر

$$w_i = \begin{pmatrix} 0.5 \\ 1.0 \\ 1.5 \end{pmatrix} \text{مجموعه متغیر تصمیم موجود باشد،}$$

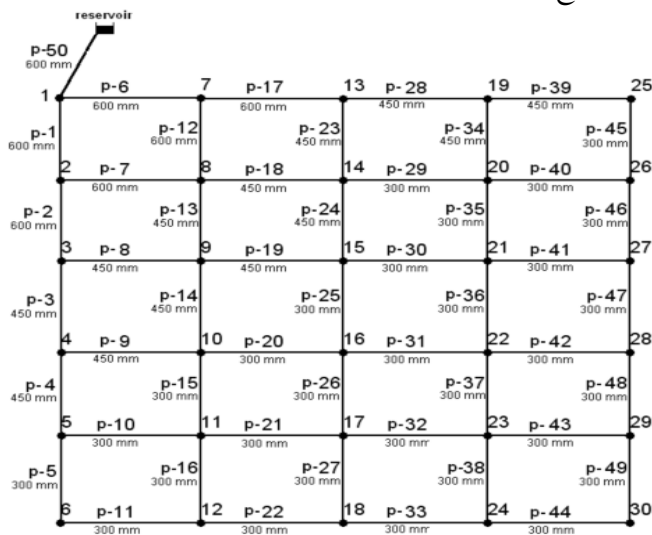
$$w_i D_j = \begin{pmatrix} 0.5 \\ 1.0 \\ 1.5 \end{pmatrix} \text{ماتریس انتخابها برای گره بالا}$$

⁷ Evaporation Rate

¹ Fitness
² Increment
³ Fittest
⁴ Pheromone
⁵ Heuristic Guidance
⁶ Demand

به راحتی می توان زبری واقعی را به دست آورد و در موارد مشابه تعمیم داد. در حالی که موقعیت و مقدار نشت می تواند از بازه وسیع تری برخوردار باشد که فضای جستجو را افزایش داده و شناسایی آنها را به مراتب دشوارتر سازد، لذا در این تحقیق بر کالیبراسیون نشت تأکید شد.

برای مقایسه کالیبراسیون فشارهای گره ای و همچنین یافتن نشت با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک و کلونی مورچه ها، شبکه نمونه ای در شکل ۱ نشان داده شده است. این مثال که توسط پولاکیس و همکاران^۲ برای یافتن نشت، مورد بررسی قرار گرفته، شبکه ای بیست حلقه ای شامل ۳۰ گره، ۵۰ لوله و یک مخزن است [۱۸]. طول لوله های افقی و عمودی به ترتیب ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متر، متوسط زبری مطلق (ε) کلیه لوله ها برابر با ۰/۲۶ میلی متر، مصرف گره ای در تمام گره ها ۵۰ لیتر بر ثانیه و قطر لوله ها نیز در شکل ۱ درج شده است.



شکل ۱- شبکه نمونه [۱۸]

تقاضای گره ای در تمام گره ها برابر با ۵۰ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته می شود که این مقادیر در عمل بر اساس جمع مصارف اندازه گیری شده کنتورها به صورت دقیق تری قابل محاسبه است. حال فرض می شود که نشتی دلخواه به صورت متمرکز در یکی از گره های شبکه به مقداری معین رخ دهد به این صورت که مصرف را در آن گره افزایش دهد و در حالت نشت دار، شبکه تحلیل می شود و از فشارهای گره ای به دست آمده در این حالت تعدادی را به عنوان مشاهدات انتخاب کرده و برای پیدا کردن نشت به برنامه WaterGems و برنامه بهینه یابی کلونی مورچه ها معرفی می شوند. میزان نشت در نظر گرفته شده برای گره ۱۶ برابر با ۲۵ لیتر بر ثانیه است. از آنجا که مصرف گره ای در تمام گره ها ۵۰ لیتر بر ثانیه،

ماتریس فرمومون در ابتدای برنامه $\tau_{ij} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ و ماتریس راهنمای

کاوشی $\eta_{ij} = \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix}$ است. با توجه به رابطه ۲ ماتریس احتمال انتخاب هر یک از مصارف گره ای از ماتریس اول

برابر $p_{ij} = \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.6 \\ 0.2 \end{pmatrix}$ است. چنانچه ملاحظه می شود احتمال انتخاب جواب درست ۰/۲ و احتمال انتخاب مقدار برداشتی از کنتور ۰/۶

است.

در کالیبراسیون به وسیله نرم افزار WaterGems تابع هدف که مناسب بودن میان مقادیر مشاهداتی و مقادیر شبیه سازی شده مدل توسط آن سنجیده می شود، به صورت زیر است

(۴)

$$\left[\frac{\sum_{nh=1}^{NH} W_{nh} \left(\frac{Hsim_{nh} - Hobs_{nh}}{Hpnt} \right)^2 + \sum_{nq=1}^{NQ} W_{nq} \left(\frac{Qsim_{nq} - Qobs_{nq}}{Qpnt} \right)^2}{NH + NQ} \right]$$

که در این رابطه

$Hobs_{nh}$ ، $Hsim_{nh}$ ، nq امین هد فشار اندازه گیری شده، nq امین فشار محاسبه شده، $Qobs_{nq}$ ، $Qsim_{nq}$ ، nq امین جریان اندازه گیری شده، nq امین جریان محاسبه شده، $Hpnt$ هد فشار تنظیم شده در هر گره، $Qpnt$ جریان تنظیم شده در هر لوله، NH و NQ به ترتیب کل گره های فشارسنجی و اندازه گیری دبی و W_{nh} و W_{nq} شاخصهای وزنی برای هد و جریان اندازه گیری شده هستند. برای بررسی میزان دقت حاصل از شبیه سازی و تعیین خطا از درصد میانگین قدرمطلق خطا^۱ استفاده شد. نحوه محاسبه در رابطه ۵ نشان داده شده است

$$MAPE = 100 * \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_o - X_c}{X_c} \right| \quad (5)$$

که در آن X_o مقادیر مشاهداتی، X_c مقادیر شبیه سازی شده و N تعداد مقادیر است.

۳- نتایج و بحث

اگرچه کالیبراسیون شبکه هم در رابطه با زبری و هم نشت می تواند مورد توجه قرار گیرد، اما با توجه به محدود بودن بازه تغییرات زبری و امکان گروه بندی که منجر به کاهش فضای جستجو به مقدار قابل توجهی می شود و با استفاده از کارهای آزمایشگاهی و میدانی

² Poulakis et al.

¹ Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

است برای ایجاد چنین نشستی در گره ۱۶، باید مصرف گره‌ای آن ۷۵ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شود.

در ستون ۱ جدول ۱ فشارهای گره‌ای در حالت بدون نشست یعنی دبی‌های برداشتی به وسیله کنتور مشاهده می‌گردد. در ستون ۲ فشارهای گره‌ای مشاهداتی (فشار در حالت نشست فرضی) که در عمل به وسیله عملیات فشارسنجی شبکه به دست می‌آید، درج شده است، هدف، تغییر مصارف در گره‌ها تا رسیدن به حداقل اختلاف میان فشارهای مشاهداتی و فشارهای شبیه‌سازی شده است. با توجه به فضای گسسته در هر دو روش بهینه‌یابی، مصارف گره‌ای با ضرب ضرایب وزنی در مصارف گره‌ای پایه در هر گره به دست می‌آید. در ستون ۳ جدول ۱ نتایج حاصل از تحلیل به وسیله روش کلونی

مورچه‌ها نشان داده شده است. لازم به توضیح است که این تحلیل از برداشت مقادیر فشارهای گره‌ای در دو گره ۱۷ و ۲۴ که به عنوان فشارهای مشاهداتی تلقی می‌گردند، حاصل می‌شود در حالی که برای تحلیل به روش الگوریتم ژنتیک از کلیه ۷ گره مشاهداتی استفاده شده است. مصارف گره‌ای به دست آمده، دقیقاً همان مصارف گره‌ای ثبت شده برای هر گره و نیز نشست ۲۵ لیتر بر ثانیه در گره شماره ۱۶ است. همچنین فشارهای شبیه‌سازی شده نیز با فشارهای مشاهداتی یکسان به دست آمده است. به هر بار محاسبه مصارف گره‌ای در تمام گره‌ها طبق رابطه ۲ و مقایسه فشارهای ناشی از آنها با فشارهای مشاهداتی، یک تکرار گفته می‌شود. برنامه بعد از ۲۵۸۷ تکرار به جواب دست یافته است.

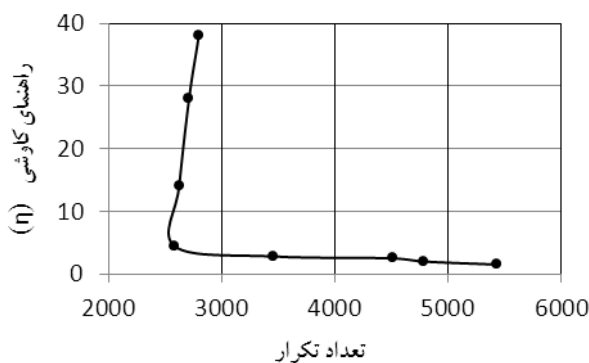
جدول ۱- مقایسه نتایج کلونی مورچه‌ها و الگوریتم ژنتیک در یافتن نشست (L/s) ۲۵ در گره شماره ۱۶

| شماره گره | ۱ فشار در حالت بدون نشست (m) | | ۲ فشار مشاهداتی (m) | | ۳ نتایج کلونی مورچه‌ها | | ۴ نتایج الگوریتم ژنتیک (حالت ۱) | | ۵ نتایج الگوریتم ژنتیک (حالت ۲) | | |
|----------------------------|------------------------------|-------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------|--|
| | نشست (m) | مصرف گره‌ای (L/s) | مصرف گره‌ای (L/s) | فشار شبیه‌سازی شده (m) | مصرف گره‌ای (L/s) | فشار شبیه‌سازی شده (m) | مصرف گره‌ای (L/s) | فشار شبیه‌سازی شده (m) | مصرف گره‌ای (L/s) | فشار شبیه‌سازی شده (m) | |
| ۱ | ۸۱/۵۴ | - | ۵۰ | ۸۷/۹۴ | ۴۵ | ۷۸/۹۲ | ۴۵ | ۷۸/۹۲ | ۴۵ | ۷۸/۹۲ | |
| ۲ | ۶۶/۹۵ | - | ۵۰ | ۶۳/۸۳ | ۲۵ | ۶۴/۰۶ | ۲۵ | ۶۴/۰۶ | ۴۵ | ۶۳/۷۸۷ | |
| ۳ | ۶۰/۰۲ | - | ۵۰ | ۵۶/۵۸ | ۴۰ | ۵۷/۳۷ | ۴۰ | ۵۷/۳۷ | ۷۰ | ۵۶/۷۴ | |
| ۴ | ۴۹/۶۷ | - | ۵۰ | ۴۵/۶۸ | ۳۰ | ۴۶/۹۲ | ۳۰ | ۴۶/۹۲ | ۲۵ | ۴۶/۳۹ | |
| ۵ | ۴۲/۸۴ | ۳۸/۶۸ | ۵۰ | ۳۸/۶۸ | ۷۵ | ۳۸/۶۵ | ۷۵ | ۳۸/۶۵ | ۷۵ | ۳۸/۲۱ | |
| ۶ | ۳۴/۷۲ | - | ۵۰ | ۳۰/۳۷ | ۳۰ | ۳۱/۱۷ | ۳۰ | ۳۱/۱۷ | ۶۰ | ۳۰/۰۵ | |
| ۷ | ۷۰/۰۲ | - | ۵۰ | ۶۷/۰۴ | ۷۵ | ۶۶/۷۲ | ۷۵ | ۶۶/۷۲ | ۷۵ | ۶۶/۸۴ | |
| ۸ | ۶۶/۵۲ | ۶۳/۳۷ | ۵۰ | ۶۳/۳۷ | ۷۵ | ۶۳/۳۹ | ۷۵ | ۶۳/۳۹ | ۶۵ | ۶۳/۳۹ | |
| ۹ | ۵۸/۴۹ | - | ۵۰ | ۵۴/۹۷ | ۲۵ | ۵۵/۸۱ | ۲۵ | ۵۵/۸۱ | ۲۵ | ۵۵/۴۹ | |
| ۱۰ | ۴۹/۶۷ | - | ۵۰ | ۴۵/۶۸ | ۴۵ | ۴۶/۹۲ | ۴۵ | ۴۶/۹۲ | ۵۵ | ۴۶/۳۹ | |
| ۱۱ | ۳۸/۶۷ | - | ۵۰ | ۳۴/۳۵ | ۵۰ | ۳۴/۵۸ | ۵۰ | ۳۴/۵۸ | ۴۵ | ۳۴/۶ | |
| ۱۲ | ۳۴/۱۸ | ۲۹/۸۱ | ۵۰ | ۲۹/۸۱ | ۷۵ | ۲۹/۸ | ۷۵ | ۲۹/۸ | ۵۰ | ۲۹/۸۲ | |
| ۱۳ | ۶۶/۴۳ | - | ۵۰ | ۶۳/۳۴ | ۴۰ | ۶۳/۰۱ | ۴۰ | ۶۳/۰۱ | ۵۰ | ۶۳/۲۸ | |
| ۱۴ | ۶۳/۵۹ | - | ۵۰ | ۶۰/۳۶ | ۷۵ | ۶۰/۰۹ | ۷۵ | ۶۰/۰۹ | ۳۰ | ۶۰/۶۷ | |
| ۱۵ | ۵۸ | - | ۵۰ | ۵۴/۴۵ | ۵۵ | ۵۵/۰۶ | ۵۵ | ۵۵/۰۶ | ۶۰ | ۵۴/۹۲ | |
| ۱۶ | ۴۳/۹۴ | - | ۷۵ | ۳۸/۷۶ | ۳۵ | ۴۱/۰۸ | ۳۵ | ۴۱/۰۸ | ۴۵ | ۴۰/۵۷ | |
| ۱۷ | ۳۶/۰۷ | ۳۱/۵۵ | ۵۰ | ۳۱/۵۵ | ۶۰ | ۳۱/۷۷ | ۶۰ | ۳۱/۷۷ | ۵۰ | ۳۱/۹۳ | |
| ۱۸ | ۳۳/۳۶ | - | ۵۰ | ۲۸/۹۰ | ۳۵ | ۲۹/۲۴ | ۳۵ | ۲۹/۲۴ | ۲۵ | ۲۹/۳۲ | |
| ۱۹ | ۶۰/۷ | - | ۵۰ | ۵۷/۴۶ | ۷۵ | ۵۶/۶۱ | ۷۵ | ۵۶/۶۱ | ۳۰ | ۵۷/۴۳ | |
| ۲۰ | ۵۸/۶۳ | ۵۵/۲۸ | ۵۰ | ۵۵/۲۸ | ۲۵ | ۵۵/۳۴ | ۲۵ | ۵۵/۳۴ | ۷۰ | ۵۵/۲ | |
| ۲۱ | ۵۰/۱۲ | - | ۵۰ | ۴۶/۳۰ | ۷۵ | ۴۶/۵ | ۷۵ | ۴۶/۵ | ۴۰ | ۴۷/۳۴ | |
| ۲۲ | ۴۰/۷۴ | - | ۵۰ | ۳۶/۱۴ | ۷۵ | ۳۷/۰۳ | ۷۵ | ۳۷/۰۳ | ۶۵ | ۳۷/۰۹ | |
| ۲۳ | ۳۴/۷۵ | - | ۵۰ | ۳۰/۲۴ | ۵۰ | ۳۰/۳۹ | ۵۰ | ۳۰/۳۹ | ۵۰ | ۳۰/۲۷ | |
| ۲۴ | ۳۲/۷۹ | ۲۸/۳۲ | ۵۰ | ۲۸/۳۲ | ۷۵ | ۲۸/۳۷ | ۷۵ | ۲۸/۳۷ | ۷۵ | ۲۷/۹۴ | |
| ۲۵ | ۵۹/۷۶ | - | ۵۰ | ۵۶/۵۰ | ۷۵ | ۵۵/۴ | ۷۵ | ۵۵/۴ | ۷۵ | ۵۶/۱۴ | |
| ۲۶ | ۵۵/۴۶ | - | ۵۰ | ۵۲/۰۳ | ۴۰ | ۵۲/۴۵ | ۴۰ | ۵۲/۴۵ | ۳۵ | ۵۲/۷۳ | |
| ۲۷ | ۴۸/۰۸ | - | ۵۰ | ۴۴/۲۰ | ۲۵ | ۴۵/۶۳ | ۲۵ | ۴۵/۶۳ | ۵۰ | ۴۵/۲۳ | |
| ۲۸ | ۳۹/۸۵ | - | ۵۰ | ۳۵/۳۷ | ۲۵ | ۶/۸۳ | ۲۵ | ۶/۸۳ | ۳۰ | ۳۶/۷۱ | |
| ۲۹ | ۳۴/۳۸ | ۲۹/۸۹ | ۵۰ | ۲۹/۸۹ | ۶۵ | ۲۹/۸۸ | ۶۵ | ۲۹/۸۸ | ۶۵ | ۲۹/۶۷ | |
| ۳۰ | ۳۲/۶۱ | - | ۵۰ | ۲۸/۱۳ | ۳۰ | ۲۸/۳۷ | ۳۰ | ۲۸/۳۷ | ۴۵ | ۲۷/۸۷ | |
| جمع مصارف: | | ۱۵۲۵ | | ۱۵۲۵ | | ۱۵۲۵ | | ۱۵۲۵ | | ۱۵۲۵ | |
| درصد میانگین قدر مطلق خطا: | | ۰/۰۰ | | ۰/۰۰ | | ۰/۰۰ | | ۰/۰۰ | | ۰/۱۰ | |

هرچند فشارهای شبیه‌سازی شده به وسیله روش الگوریتم ژنتیک نزدیک به فشارهای مشاهداتی هستند اما مصارف گره‌ای شبیه‌سازی شده به مصارف واقعی نزدیک نیست در حالی که برنامه کلونی مورچه‌ها دقیقاً جواب را نشان می‌دهد.

۳-۱- بررسی حساسیت روشها به مقدار نشت

برای نشان دادن دقت برنامه کلونی مورچه‌ها، تحلیلی دوباره انجام شد. این بار به جای نشت ۲۵ لیتر بر ثانیه، نشتی به میزان ۰/۵ لیتر بر ثانیه در گره ۱۶ ایجاد شد. به این صورت که مصرف گره‌ای در گره ۱۶ برابر با ۵/۵ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد، در حالی که در بقیه گره‌ها مصرف برابر با ۵۰ لیتر بر ثانیه بود. شبکه در این حالت، تحلیل هیدرولیکی شد. فشارهای به دست آمده تحت این شرایط فشارهای مشاهداتی هستند. در عمل، مقادیر فشارهای گره‌ای، از فشار سنجی شبکه توزیع آب به دست می‌آیند (ستون ۱ جدول ۳).



شکل ۲- تأثیر مقدار پارامتر راهنمای کاوشی (n) در رسیدن به جواب

جدول ۲- دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای حالت دوم نتایج

| شماره لوله | مشاهدات (لیتر بر ثانیه) | دبی شبیه‌سازی شده (لیتر بر ثانیه) |
|--------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| P-۵۰ | ۱۵۲۵ | ۱۵۲۵ |
| P-۲ | ۴۴۹/۷۲ | ۴۴۶/۲۶ |
| P-۱۵ | ۴۳/۲۲ | ۴۳/۰۳ |
| P-۱۸ | ۸۶/۴۴ | ۸۶/۸۶ |
| P-۲۸ | ۲۷۰/۵ | ۲۶۹/۹۸ |
| P-۳۵ | ۷۷/۵۷ | ۸۱/۳ |
| P-۴۲ | ۲۱/۸۱ | ۲۸/۷۵ |
| درصد میانگین قدرمطلق خطا | | ۵/۵۰ |

اکنون اگر مقادیر مربوط به فشار در گره‌های ۱۶ و ۱۷ به عنوان مشاهدات (نقاط فشارسنجی) در نظر گرفته شود، برنامه برای ۳۰ گره شبکه از بین انتخاب‌های موجود برای مقادیر مختلف مصرف گره‌ای، ۳۰ مصرف گره‌ای را به صورت تصادفی انتخاب کرده و برای

برای انتخاب پارامتر راهنمای کاوشی (n) و چگونگی ارتباط این پارامتر با تعداد تکرارها، آنالیز حساسیت با تغییرات n به صورت تابعی از تعداد تکرار مورد بررسی گرفت. چنانچه در شکل ۲ مشاهده می‌شود هر چه مقدار راهنمای کاوشی کمتر باشد، سرعت رسیدن به جواب نیز کاهش می‌یابد. در $n=4/4$ کمترین تعداد تکرار که برابر با ۲۵۸۷ است، به منظور رسیدن به جواب رخ می‌دهد. با افزایش مقدار راهنمای کاوشی، سرعت رسیدن به جواب کاهش یافته و نیز زمان اجرای برنامه افزایش می‌یابد که دلیل اصلی آن تولید مقادیر تکراری و کم شدن احتمال انتخاب دیگر مقادیر در هر گره است. در صورتی که از این پارامتر استفاده نشود، یعنی در رابطه ۲، $n=1$ باشد که هم ارز انتخاب $n=4/4$ برابر صفر است، برنامه اصلاً به جواب نخواهد رسید، هر چند که فشارها واسنجی شده و به فشارهای مشاهداتی نزدیک می‌شود. بنابراین مقادیر پارامترهای کلونی مورچه‌ها که در روابط ۲ و ۳ معرفی گردیده‌اند برای کلیه حالتها برابر $\Delta \tau$ برابر ۰/۲۵، n برابر ۴/۴، p برابر ۰/۹۹۸ و حداکثر تعداد تکرار ۴۰۰۰ است.

نتایج حاصل از برنامه WaterGems در دو ستون ۴ و ۵ نشان داده شده است که تفاوت آنها در مشاهدات است. به این صورت که در حالت اول (ستون ۴) مشاهدات فقط فشارهای گره‌ای در هفت گره از شبکه بوده که در ستون ۲ نشان داده شده است، در حالی که در حالت دوم (ستون ۵) علاوه بر آن هفت گره قبلی، دبی در هفت لوله نیز به عنوان مشاهدات داده شده است که نتیجه واسنجی دبی‌ها برای حالت دوم در جدول ۲ نشان داده شده است. حداکثر تکرار در روش الگوریتم ژنتیک ۴۰۰۰۰۰، اندازه جمعیت ۲۰۰ و شاخصهای وزنی برای هد و جریان اندازه‌گیری شده مطابق با پیش فرض نرم افزار WaterGems است.

مقدار درصد میانگین قدرمطلق خطا برای فشارهای گره‌ای و مصارف در ردیف آخر جدول ۱ آورده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت در حالت دوم نتایج الگوریتم ژنتیک که شامل فشارهای مشاهداتی در هفت گره و نیز دبی سنجی در هفت لوله بوده است، نتایج نسبت به حالت اول که فقط شامل فشار سنجی در هفت گره بوده، بهبود یافته است.

والسکی برای انجام کالیبراسیون استفاده از شیب هیدرولیکی^۱ را برای مقادیر فشارهای گره‌ای توصیه کرده است [۱۹]. دقت فشارسنجی نیز مطابق آنچه در عمل برداشت می‌شود برابر با ۰/۱ متر است، یعنی اختلاف فشار بین حالت بدون نشت با حالت نشت‌دار حداکثر برابر با ۰/۱ متر است که در انجام محاسبات از این دو نکته استفاده شد.

^۱ Hydraulic Grade

فقط فشار شبیه‌سازی شده به فشار مشاهداتی نزدیک شده اما مصارف گره‌ای، شرایط مسئله را ارضا نمی‌کنند.

برای مقایسه یافتن دو گره دارای نشت با موقعیت و مقدار متفاوت در دو گره ۵ و ۲۸، نشت فرضی ایجاد شد و با استفاده از فشارهای گره‌ای در این حالت به یافتن نشت پرداخته شد. مقدار نشت فرضی در گره ۵ برابر با ۲/۵ لیتر بر ثانیه و در گره ۲۸ برابر با ۱۷/۵ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد. فشارهای مشاهداتی، فشار در گره‌های ۱۶، ۲۹ و ۳۰ است که در ستون ۱ جدول ۴ نشان داده شده است. چنانچه در ستون ۲ جدول ۴ مشاهده می‌شود با کمک روش بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها بعد از ۱۹۴۵ تکرار، جواب به دست آمد. در نهایت نتایج حاصل از تحلیل با روش الگوریتم ژنتیک در ستون ۴ نمایش داده شده است.

تحلیل هیدرولیکی به نرم‌افزار EPANET2 ارسال می‌کند و دوباره جواب که همان فشارهای گره‌ای است به برنامه بازگشته و فشارهای محاسبه شده با فشار مربوط به گره‌های ۱۶ و ۱۷ طبق رابطه ۱ مقایسه شده و پس از چندین بار تکرار این چرخه، هر بار که جواب بهتری نسبت به جوابهای قبلی به دست آید، احتمال انتخاب آن مصارف گره‌ای افزایش می‌یابد. چنانچه در ستون ۲ جدول ۳ نشان داده شده است، در نهایت بعد از ۲۱۳۱ بار تکرار این چرخه، جواب صحیح که همان نشت ۰/۵ لیتر بر ثانیه در گره شماره ۱۶ است، پیدا شد، به این صورت که مصرف گره‌ای در تمام گره‌ها ۵۰ لیتر بر ثانیه و در گره شماره ۱۶ مصرف گره‌ای ۵۰/۵ لیتر بر ثانیه به دست آمد.

در ستون ۳ جدول ۳ نتایج حاصل از تحلیل به وسیله روش الگوریتم ژنتیک نیز نشان داده شده است که می‌توان ملاحظه نمود

جدول ۳- مقایسه نتایج کلونی مورچه‌ها و الگوریتم ژنتیک در یافتن نشت ۰/۵ لیتر بر ثانیه در گره شماره ۱۶

| شماره گره | نتایج کلونی مورچه‌ها | | نتایج الگوریتم ژنتیک | |
|---------------------------|----------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| | فشار مشاهداتی (m) | مصرف گره‌ای (L/s) | فشار شبیه‌سازی شده (m) | مصرف گره‌ای (L/s) |
| ۱ | - | ۵۰ | ۸۱/۵۱ | ۴۹/۷۵ |
| ۲ | - | ۵۰ | ۶۶/۹۱ | ۴۹/۵ |
| ۳ | - | ۵۰ | ۵۹/۹۷ | ۵۰ |
| ۴ | - | ۵۰ | ۴۹/۶۰ | ۵۰/۵ |
| ۵ | - | ۵۰ | ۴۲/۷۵ | ۵۰/۵ |
| ۶ | - | ۵۰ | ۳۴/۶۳ | ۵۰/۵ |
| ۷ | - | ۵۰ | ۶۹/۹۸ | ۴۹ |
| ۸ | - | ۵۰ | ۶۶/۴۷ | ۵۰/۵ |
| ۹ | - | ۵۰ | ۵۸/۴۳ | ۵۰/۵ |
| ۱۰ | - | ۵۰ | ۴۹/۶۰ | ۵۰/۵ |
| ۱۱ | - | ۵۰ | ۳۸/۵۸ | ۵۰/۵ |
| ۱۲ | - | ۵۰ | ۳۴/۰۹ | ۵۰/۵ |
| ۱۳ | - | ۵۰ | ۶۶/۳۸ | ۴۹/۵ |
| ۱۴ | - | ۵۰ | ۶۳/۵۴ | ۴۹/۵ |
| ۱۵ | - | ۵۰ | ۵۷/۹۴ | ۴۹/۵ |
| ۱۶ | ۴۳/۸۳ | ۵۰/۵ | ۴۳/۸۳ | ۵۰ |
| ۱۷ | ۳۵/۹۸ | ۵۰ | ۳۵/۹۸ | ۵۰/۵ |
| ۱۸ | - | ۵۰ | ۳۳/۲۶ | ۴۹ |
| ۱۹ | - | ۵۰ | ۶۰/۶۵ | ۵۰/۵ |
| ۲۰ | - | ۵۰ | ۵۸/۵۷ | ۴۹/۵ |
| ۲۱ | - | ۵۰ | ۵۰/۰۵ | ۵۰/۵ |
| ۲۲ | - | ۵۰ | ۴۰/۶۴ | ۴۹/۵ |
| ۲۳ | - | ۵۰ | ۳۴/۶۵ | ۴۹/۵ |
| ۲۴ | - | ۵۰ | ۳۲/۶۹ | ۴۹/۵ |
| ۲۵ | - | ۵۰ | ۵۹/۷۱ | ۵۰ |
| ۲۶ | - | ۵۰ | ۵۵/۴۰ | ۵۰/۵ |
| ۲۷ | - | ۵۰ | ۴۸/۰۰ | ۵۰/۵ |
| ۲۸ | - | ۵۰ | ۳۹/۷۵ | ۵۰/۵ |
| ۲۹ | - | ۵۰ | ۳۴/۲۸ | ۴۹/۵ |
| ۳۰ | - | ۵۰ | ۳۲/۵۱ | ۵۰ |
| جمع مصارف | | ۱۵۰۰/۵ | | ۱۵۰۰/۲۵ |
| درصد میانگین قدر مطلق خطا | | ۰/۰۰ | | ۰/۹۵ |

جدول ۴- مقایسه نتایج کلونی مورچه‌ها و الگوریتم ژنتیک در یافتن نشتهای متفاوت از نظر موقعیت و مقدار

| شماره گره | نتایج کلونی مورچه‌ها | | نتایج الگوریتم ژنتیک | |
|-----------|--------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| | فشار مشاهداتی (m) | مصرف گره‌ای (L/s) | فشار شبیه‌سازی شده (m) | مصرف گره‌ای (L/s) |
| ۱ | - | ۵۰ | ۷۹/۴۷ | ۶۰ |
| ۲ | - | ۵۰ | ۶۴/۴۷ | ۵۰ |
| ۳ | - | ۵۰ | ۵۷/۳۰ | ۶۵ |
| ۴ | - | ۵۲/۵ | ۴۶/۵۵ | ۵۷/۵ |
| ۵ | - | ۵۰ | ۳۹/۴۳ | ۶۰ |
| ۶ | - | ۵۰ | ۳۱/۱۲ | ۴۷/۵ |
| ۷ | - | ۵۰ | ۶۷/۶۴ | ۵۲/۵ |
| ۸ | - | ۵۰ | ۶۴/۰۲ | ۴۵ |
| ۹ | - | ۵۰ | ۵۵/۷۱ | ۴۵ |
| ۱۰ | - | ۵۰ | ۴۶/۵۶ | ۴۵ |
| ۱۱ | - | ۵۰ | ۳۵/۱۵ | ۴۷/۵ |
| ۱۲ | - | ۵۰ | ۳۰/۵۵ | ۴۷/۵ |
| ۱۳ | - | ۵۰ | ۶۳/۹۵ | ۵۰ |
| ۱۴ | - | ۵۰ | ۶۱/۰۱ | ۴۷/۵ |
| ۱۵ | - | ۵۰ | ۵۵/۲۰ | ۵۲/۵ |
| ۱۶ | ۴۰/۴۲ | ۵۰ | ۴۰/۴۲ | ۴۷/۵ |
| ۱۷ | - | ۵۰ | ۳۲/۳۹ | ۶۵ |
| ۱۸ | - | ۵۰ | ۲۹/۶۴ | ۵۵ |
| ۱۹ | - | ۵۰ | ۵۸/۰۶ | ۴۷/۵ |
| ۲۰ | - | ۵۰ | ۵۵/۸۹ | ۵۲/۵ |
| ۲۱ | - | ۵۰ | ۴۶/۸۶ | ۴۷/۵ |
| ۲۲ | - | ۵۰ | ۳۶/۷۵ | ۴۵ |
| ۲۳ | - | ۵۰ | ۳۰/۹۱ | ۴۵ |
| ۲۴ | - | ۵۰ | ۲۹/۰۰ | ۴۷/۵ |
| ۲۵ | - | ۵۰ | ۵۷/۰۹ | ۴۵ |
| ۲۶ | - | ۵۰ | ۵۲/۵۹ | ۵۲/۵ |
| ۲۷ | - | ۵۰ | ۴۴/۶۵ | ۴۷/۵ |
| ۲۸ | - | ۶۷/۵ | ۳۵/۳۶ | ۵۵ |
| ۲۹ | - | ۵۰ | ۳۰/۴۶ | ۵۵ |
| ۳۰ | - | ۵۰ | ۲۸/۸۰ | ۴۵ |
| | جمع مصارف | ۱۵۲۰ | | ۱۵۲۵ |
| | درصد میانگین قدرمطلق خطا | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۹/۴۳ |
| | | | | ۰/۷۳ |

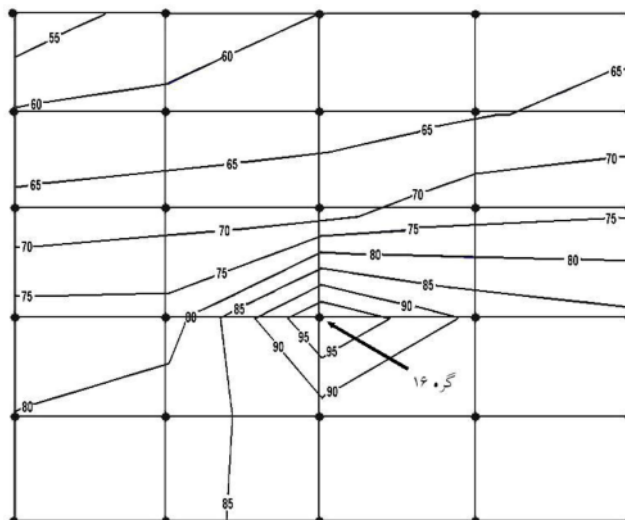
برای تحلیل حساسیت^۱ شبکه نسبت به موقعیت نشت و چگونگی تغییر فشارها از رابطه زیر استفاده شد

$$SA(j) = \frac{(H_{\text{noI}}^j - H_i^j)}{(H_{\text{noI}}^j - H_i^j)_{\text{max}}} \times 100 \quad (6)$$

^۱ Sensitivity Analysis

که در این رابطه

SA(j) درصد اختلاف فشار در دو حالت نشت دار و بدون نشت در گره j، H_{noI}^j هد فشار در حالت بدون نشت در گره j و H_i^j هد فشار در حالت نشت دار در گره j است.



شکل ۳- درصد اختلاف فشارسنجی ایجاد شده در شبکه شکل ۱ به علت نشت ۲۵ لیتر بر ثانیه در گره ۱۶

محدوده جستجویی که نشت در آن رخ داده است را کوچک تر می کند و در نتیجه با صرف هزینه و زمان کمتر می توان موقعیت نشت ها را تعیین نمود و همچنین امکان مدیریت مؤثر یک شبکه توزیع آب را هم زمان با شناسایی نشت ها و موقعیت یابی آنها فراهم می آورد.

در مقایسه با نشت یابی به روش الگوریتم ژنتیک این نکته قابل ذکر است که در این روش هر چند فشارها و دبی های شبیه سازی شده، تقریباً به مقادیر مشاهداتی نزدیک هستند، اما جواب درست پیدا نشده است. یکی از دلایل یافتن جوابها در برنامه کلونی مورچه ها این است که برنامه بیشتر در نزدیکی مصارف گره ای مشاهداتی به دنبال جواب می گردد که این امر به خاطر راهنمای کاوشی (۱۱) است و با جلو رفتن برنامه و به روز رسانی فرامون، انتخابهایی که فشارهای شبیه سازی شده را به فشارهای مشاهداتی نزدیک می کنند با احتمال بیشتری انتخاب می شوند و فرامون مربوط به انتخابهایی که تأثیر زیادی در بهبود برازندگی ندارند، تبخیر شده و احتمال انتخابشان در دفعات بعدی کاهش می یابد. همچنین پس از مدتی مصارف گره ای مربوط به بهترین برازندگی با مصارف گره ای برداشتی از کنتورها (مشاهداتی) در تمام گره ها مقایسه می شوند و اگر با هم برابر نبودند، راهنمای کاوشی و فرامون در آن گره ها برابر با یک می شود و در تکرارهای بعدی این نقاط که مشکوک به نشت هستند بهتر جستجو می شوند. موارد ذکر شده باعث می گردد تا احتمال یافتن جواب و نیز سرعت همگرایی در برنامه کلونی مورچه ها بیشتر از کاربرد روش الگوریتم ژنتیک باشد. همچنین مشاهده گردید که در شبکه ای شامل ۳۰ گره که در هر گره فقط ۱۰ انتخاب وجود داشته باشد، تعداد حالت هایی که باید برای

در شکل ۳ دیگرام حساسیت فشارهای گره ای شبکه در برابر میزان نشت به کمک رابطه ۵ رسم شده است که مقادیر فشارها در حالت نشت ۲۵ لیتر بر ثانیه با مقادیر فشار در حالت بدون نشت مقایسه شده است. چنانچه ملاحظه می شود، بیشترین اختلاف فشار مربوط به گره ای است که نشت در آن رخ داده است. لازم به یادآوری است در صورتی که دیگرام برای نشت ۰/۵ لیتر بر ثانیه برای همان گره ۱۶ ترسیم گردد، نتایج مشابه با نتایج شکل ۳ به دست خواهد آمد زیرا این نتایج به صورت نسبی و بدون بعد آورده شده اند.

نکته دیگری که از شکل ۳ مشاهده می شود، کاهش پیوسته تغییرات نسبی فشار در اثر نشت متمرکز یعنی گره ۱۶ است. انتظار می رود در صورت اتصال مخزن به یکی از گره های تحتانی در شبکه شکل ۱، روند شکل گیری خطوط هم فشار از ورودی به شبکه تا موقعیت نشت متمرکز، از گرادیان بیشتری برخوردار بوده و در پایین دست نشت (نسبت به محل اتصال مخزن به شبکه) تغییرات گرادیان فشار کاهش یابد. این موضوع می تواند در مسائل مربوط به نشت یابی به عنوان یک نکته مورد توجه قرار گیرد

۴- نتیجه گیری

بر اساس بررسی های صورت گرفته در مقاله حاضر بر روی شبکه مورد مطالعه و نتایج و راهکارهای ارائه شده، روش کلونی مورچه ها در کالیبراسیون شبکه های توزیع آب، روشی مناسب و انعطاف پذیر بوده و دارای سرعت و همگرایی بالایی در رسیدن به جوابها با حداقل خطا و دقت مورد نظر است که ابزار مناسبی در جهت پیش بینی نقاط دارای نشت در شبکه را فراهم می آورد. این روش

۵- قدردانی

نویسندگان این مقاله از شرکت آب و فاضلاب استان خراسان رضوی که در قالب طرح تحقیقاتی از این تحقیق حمایت نمودند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

رسیدن به جواب درست طی نمود برابر با 10^{30} حالت است درحالی که در حل مثالهای بالا به وسیله کلونی مورچه‌ها، تعداد تکرار تا رسیدن به جواب درست، بین ۲ تا ۳ هزار تکرار هستند که عددی بسیار کمتر از حالت‌های ممکن است.

۶- مراجع

- 1- Soltani Asl, M., and Faghfour Maghrebi, M. (2009). "Intelligent pressure management to reduce leakage in urban water supply networks, A case study of Sarafrazan district, Mashhad." *J. of Water and Wastewater*, 71, 99-104. (In Persian)
- 2- Ormsbee, L.E., and Wood, D.J. (1986). "Explicit pipe network calibration." *J. of Water Resources Planning Management*, 112(2), 166-182.
- 3- Boulos, P.F., and Wood, D.J. (1990). "Explicit calculation of pipe network parameters." *J of Hydraulic Engineering*, 116(11), 1329-1344.
- 4- Ormsbee, L.E. (1989). "Implicit network calibration." *J. of Water Resources Planning Management*, 115(2) 243-257.
- 5- Lingireddy, S., and Ormsbee, L.E. (2000). "Hydraulic network calibration using genetic algorithm." *J. of Civil Engineering and Environmental Syst.*, 19(1), 13- 39.
- 6- Holland, J.H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*, The University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan.
- 7- Goldberg, D.E. (1989). *Genetic algorithm in search optimization and machin learninig*, Addison Wesley Pub., Reading, MA.
- 8- Vitkovsky, J.P., and Simpson, A.R. (1997). *Calibration and leak detection in ppe networks using inverse transient analysis and genetic algorithms*, Res. Report No. R157, Dept. of Civ. and Env. Eng., University of Adelaide, Adelaide, Australia.
- 9- Pudar, R.S., and Liggett, J.A. (1992). "Leaks in pipe networks." *J. of Hydraulic Engineering*, 118(7), 1031-1046.
- 10- Wu, Z.Y., and Sage, P. (2006). "Water loss detection via genetic algorithm optimization-based model calibration." *ASCE 8th Annual International Symposium on Water Distribution System Analysis*, Cincinnati, Ohio.
- 11- Walski, T., Wu, Z.Y., Mankowski, R., Herrin, G., Gurrieri, R., and Tryby, M. (2002). "Calibrating water distribution model via genetic algorithms." *AWWA IMTech Conference*, Kansas City.
- 12- Ostfeld, A., and Tubaltzev, A. (2008). "Ant colony optimization for least-cost design and operation of pumping water distribution systems." *J. of Water Resources Planning and Management*, 134(2), 107-118.
- 13- Maier, H.R., Simpson, A.R., Zecchin, A.C., Foong, W.K., Phang, K.Y., Seah, H.Y., and Tan, C.L. (2003). "Ant colony optimization for design of water distribution systems." *J. of Water Resources Planning and Management*, 129(3), 200-209.
- 14- López-Ibáñez, M., Prasad, T.D., and Paechter, B., (2008). "Ant colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks." *J. of Water Resources Planning and Management*, 134(4), 337-346.
- 15- Afshar, A., Maknoon, R., and Afshar, A. (1385). "Optimum layout for water quality monitoring stations through ant colony algorithm." *J. of Water and Wastewater*, 59, 2-11. (In Persian)
- 16- Dorigo, M. (1992). "Optimization, learning and natural algorithms." Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, Milan, Italy.
- 17- Dorigo, M., Maniezzo, V., and Colorni, A. (1996). "Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 26(1), 29-41.
- 18- Poulakis, Z., Valougeorgis, D., and Papadimitriou, C. (2003). "Leakage detection in water pipe networks using a bayesian probabilistic framework." *J. of Probabilistic Engineering Mechanics*, 18, 315-327.
- 19- Walski, T.M., Chase, D.V., Savic, D.A., Grayman, W., Beckwith, S., and Koelle, E. (2003). *Advanced water distribution modeling and management*, 1st Ed., Haestad Press, Canada