

ارزیابی عملکرد مدل‌های بهینه‌سازی در کالیبراسیون و نشت‌یابی شبکه‌های توزیع آب با استفاده از مدل آزمایشگاهی

علی نصیریان^۱

محمود فغفور مغربی^۲

(دریافت ۹۱/۳/۲۰)

پذیرش ۹۲/۳/۳۰

چکیده

در این مقاله دقت نشت‌یابی مبتنی بر کالیبراسیون به‌روشن کلونی مورچه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. این روش برای دو شبکه شامل یک شبکه فرضی و یک شبکه آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج تحلیل‌های صورت گرفته بر روی هر دو شبکه، ضمن تأیید امکان نشت‌یابی با استفاده از کالیبراسیون فشارهای گرهی، سرعت و همگرایی روش کلونی مورچه‌ها را مورد تأیید قرار دادند. بررسی‌های آزمایشگاهی نشان دادند که تعداد گرہ‌های دارای نشت و مقدار نشت، تأثیر جدی بر روی دقت روش دارند. در طی تحلیل‌های صورت گرفته مشخص شد که کمینه شدن اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده نمی‌تواند به‌عنوان تنها شاخص، اطمینان از صحت نتایج به‌دست آمده ایجاد کند، لذا دو روش برای ارزیابی صحت نتایج نشت‌یابی با استفاده از سایر جوابهای به‌دست آمده در طی کالیبراسیون که دارای برازندگی‌های مناسبی هستند، ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: کالیبراسیون، کلونی مورچه‌ها، شبکه توزیع، نشت‌یابی

Performance Evaluation of Optimization Models for Calibration and Leakage Detection of Water Distribution Network Using Laboratorial Model

A. Nasirian¹

M. Faghfour Maghrebi²

(Received June 9, 2012 Accepted June 20, 2013)

Abstract

In this paper the accuracy of leakage detection using Ant Colony Optimization (ACO) has been investigated. The method has been evaluated on two networks consist of a hypothetical and a laboratorial networks. The results have proved the capability of the method and have confirmed the good convergence and speed. Experimental evaluations have shown serious effects of the number and value of leakage on the results. It is proved that a good fitness cannot guarantee the accuracy of the results. To cope with this problem two validation methods based on a number of obtained results have been developed.

Keywords: Calibration, Ants Colony, Distribution Network, Leakage Detection.

1- Ph.D. Student of Civil Eng., Ferdowsi University, Mashhad

2- Prof. of Civil Eng., Dept. of Eng., Ferdowsi University, Mashhad
(Corresponding Author) (+98 511) 6600021 maghrebi@um.ac.ir

۱- دانشجوی دکتری عمران- آب، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد (نویسنده
مسئول) ۶۶۰۰۰۲۱ (۰۵۱۱) maghrebi@um.ac.ir

به دست آمده از مدل سازی شبکه آغاز می شود. معمولاً اطلاعات به دست آمده از مدل با مقادیر واقعی تفاوت دارند [۱۱]. کالیبراسیون شبکه تا رسیدن به انطباق کامل بین مشاهدات فشار و دبی و نتایج محاسبات مدل برای این پارامترها صورت می گیرد [۱۲].

در فرایند کالیبراسیون، به تعداد گره های شبکه مصرف (با فرض اختصاص مصارف به گره ها) و به تعداد لوله های شبکه، زبری نامشخص وجود دارد. از نظر ریاضی برای اینکه یک دستگاه معادلات با این تعداد مجهول دارای جواب یک باشد، نیاز به تعداد معادلاتی برابر تعداد مجهولات دارد لذا تعدادی اندازه گیری های اضافی برای معین شدن شبکه مورد نیاز خواهد بود [۱۳]. در اکثر تحقیقات پیشین، از یک طرف با گروه بندی لوله ها و گره ها از تعداد مجهولات کاسته شده و از طرفی با برداشت داده ها در دوره زمانی توسعه یافته^۸ و یا تحت بارگذاری های مختلف، تعداد معادلات افزایش داده شده تا دستگاه معادلات معین یا دستگاه معادلاتی با درجات آزادی کمتر ایجاد شود [۱۴، ۱۵ و ۱۶]. در بسیاری از تحقیقات پیشین که اطلاعات را در زمان های مختلف یا بارگذاری های مختلف انجام داده اند، با توجه به اینکه مقدار نشت با فشار و مقدار مصرف با زمان متغیر است، از روش های تحلیل مرتبط با فشار استفاده شده است [۱۷].

در این تحقیق، مصرف برای هر گره، تنها یکبار کالیبره می شود، لذا مقدار نشت به عنوان پارامتر مجهول در نظر گرفته می شود. در مقاله حاضر نشت یابی بدون استفاده از گروه بندی گره ها برای کاهش مجهولات و یا استفاده از بارگذاری های مختلف برای افزایش تعداد معادلات انجام شده و مسئله در حالت کاملاً نامعین مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، اطلاعات مربوط به فشار و دبی از شبکه تنها یکبار و به صورت همزمان برداشت شد و مقدار مصارف گره ای تنظیمی نیز برای این زمان به دست آمد.

والسکی و همکاران بررسی هایی را بر روی یک مدل آزمایشگاهی برای بررسی کالیبراسیون شبکه به انجام رساندند [۱۸]. همچنین کواس و راموس و ویتوفسکی و همکاران، بررسی های آزمایشگاهی بر روی نشت یابی را با استفاده از جریان های غیرماندگار انجام دادند [۱۹ و ۲۰]. تاکنون هیچ کار آزمایشگاهی برای بررسی نشت یابی بر اساس کالیبراسیون شبکه در حالت ماندگار انجام نشده است و لذا بررسی این روش به صورت آزمایشگاهی از نقاط قوت تحقیق حاضر است.

پرکاربردترین روش های بهینه یابی در کالیبراسیون شبکه، روش های فراکاوشی^۹ و در بین آنها روش الگوریتم

تمام آب ورودی به شبکه های توزیع آب مصرف نمی شود و بخش قابل توجهی از آن از طریق نشت یا آب به حساب نیامده^۱ به هدر رفته و هزینه سنگینی را به شرکت های آب و فاضلاب تحمیل می کند [۱]. نشت از شبکه ها در اثر عواملی چون کیفیت پایین مواد مصرفی لوله ها و سایر اجزای شبکه، خطاهای طراحی، نگهداری نامناسب، فشار بالا در شبکه و عوامل تصادفی اتفاق می افتد [۲]. زوال لوله ها که مهم ترین عامل در بروز نشت است، متأثر از عواملی چون سن، قطر، جنس، پایداری و شرایط آب و خاک، شرایط اجرا و بهره برداری است [۳]. برخی روشها نظیر مدیریت هوشمند فشار، از جمله روشهای مؤثر در کاهش نشت از شبکه های توزیع آب شهری می باشند [۴]. همچنین روشهایی چون ابزارهای صوتی^۲، موازنه جرم^۳، عکسبرداری هوایی بر مبنای پایش حرارتی^۴، گازهای رسام^۵ از دیگر روشهایی هستند که به گستردگی توسط متصدیان صنعت آب برای کاهش نشت مورد استفاده قرار می گیرند [۵]. گرچه این روشها در برخی شرایط دارای دقت مناسب هستند ولی استفاده از آنها پرهزینه و زمانبر بوده و در برخی موارد دارای اثر بخشی لازم نیز نیستند [۵]. به عنوان مثال ابزارهای صوتی که در میان روشهای فوق رایج تر است، برای لوله های پلاستیکی دارای خطای زیادی است [۶]. برای رفع این مشکل اخیراً روشهایی که نشت را در سرتاسر شبکه، بر اساس مدل سازی و کالیبراسیون شبکه جستجو می کنند، مورد توجه محققان قرار گرفته اند. این روشها بر اساس مدل سازی و تحلیل شبکه در حالت جریان غیرماندگار^۶ و یا در حالت ماندگار^۷ عمل می کنند [۷ و ۸].

پودار و لیگت اولین کسانی بودند که از روش پایدار معکوس برای شناسایی نشت در شبکه لوله ها استفاده کردند [۹]. در این روش، نخست در یک فرایند کالیبراسیون شبکه، مقادیر مصرف واقعی گره ای شامل مصارف اندازه گیری شده توسط کنتورهای مشترکان و آب به حساب نیامده تخمین زده می شود، سپس با مقایسه این مقدار با مقدار اندازه گیری شده توسط کنتورهای مشترکان پس از اعمال ضرایب ساعتی و روزانه، مقدار آب به حساب نیامده تخمین زده می شود [۱۰]. اساس این روش مدل سازی و کالیبراسیون شبکه توزیع است. کالیبراسیون با برداشت میدانی برخی اطلاعات از شبکه واقعی و مقایسه با اطلاعات

¹ Non-revenue water

² Acoustic equipment

³ Mass balance technique

⁴ Thermography

⁵ Tracer gas

⁶ Transient analysis

⁷ Steady state

⁸ Extended Period Simulation (EPS)

⁹ Heuristic

ژنتیک^۱ است [۱۷، ۱۸]. روش کلونی مورچه‌ها^۲ از دیگر روشهای فراکتشافی است که در سال ۱۹۹۲ توسط دوریگو پیشنهاد شد [۲۱]. برخی از محققان این روش را برای طراحی بهینه شبکه مورد استفاده قرار دادند و قابلیت‌های این روش را در مسئله طراحی شبکه با کمترین هزینه مورد تأیید قرار داده‌اند [۲۲]. همچنین افشار و همکاران بهینه‌یابی ایستگاههای پایش کیفی را با استفاده از روش کلونی مورچه‌ها انجام داده‌اند [۲۳]. فغفور مغربی و همکاران بر روی شبکه‌های فرضی مقایسه‌ای بین الگوریتم ژنتیک و کلونی مورچه‌ها برای کالیبراسیون شبکه‌های توزیع به انجام رساندند و قابلیت‌های بالاتر روش کلونی مورچه‌ها نسبت به الگوریتم ژنتیک از لحاظ دقت و سرعت را نشان داده‌اند [۲۴]. با توجه به قابلیت‌های برتر این روش، در این تحقیق توانایی این روش در شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت.

در کارهای قبلی به جای مصرف، ضریب تنظیمی مصرف کالیبره شده است، لذا در گره‌هایی که مقدار مصرف کمی داشته باشند و یا دارای مصرف نباشند، نمی‌توان نشت‌های بزرگ را شبیه‌سازی نمود [۱۰]. در این مقاله مقدار نشت به‌عنوان پارامتر تنظیمی در نظر گرفته شد. برای این کار، برنامه بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها در محیط نرم افزار متلب^۳ نوشته شد و با ارتباط پویا بین این برنامه و نرم‌افزار اینپنت^۴، تحلیل شبکه در این محیط به انجام رسید. تفاوت بین مقدار دبی پایه و دبی تنظیمی به‌عنوان نشت در نظر گرفته شد. مقادیر مشاهداتی برای شبکه فرضی بر اساس تحلیل شبکه با وجود نشت‌های مفروض به‌دست آمد و این مقادیر در شبکه آزمایشگاهی مستقیماً اندازه‌گیری شد.

۲- روش شناسی

۲-۱- روابط کالیبراسیون

هدف از کالیبراسیون در شبکه‌های توزیع آب، تعیین پارامترهای واقعی شبکه توزیع است. این پارامترها در این تحقیق مصارف گره‌ای اضافی برای هر گره یا به عبارتی نشت در هر گره (L_i) هستند که برای هر گره i تعریف می‌شود:

$$(۱) \text{ جستجو برای: } x = (L_i) \quad i = 1, \dots, N$$

$$(۲) \text{ با کمینه سازی [۱۰]:}$$

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

$$(۳) \text{ با قید: } \underline{L} \leq L_i \leq \bar{L}$$

که در این در روابط

x نشان‌دهنده مجموعه‌ای از پارامترهای مدل، $f(x)$ تابع هدف است که مناسب بودن مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل را نشان می‌دهد. در تابع هدف که برازندگی^۵ به‌وسیله آن محاسبه می‌شود J Hobs فشار اندازه‌گیری شده در گره J ، $Hsim$ فشار شبیه‌سازی شده در گره J و N تعداد گره‌ها است. \underline{L} و \bar{L} به ترتیب حد پایین و بالا برای مقدار نشت است که توسط اپراتور به برنامه معرفی می‌شود. به‌صورت طبیعی، مقدار حداقل نشت مورد انتظار معادل صفر و مقدار حداکثر نشت محتمل در یک گره بر اساس کل مقدار آب به حساب نیامده در شبکه قابل تخمین است. به‌عنوان مثال اگر در شبکه‌ای مقدار متوسط آب ورودی به سیستم ۲۰ لیتر بر ثانیه و مقدار مصرف متوسط ۱۰ لیتر بر ثانیه باشد و با این فرض که تمامی این مقدار از یک نقطه نشت کند، مقدار حداکثر نشت ۱۰ لیتر بر ثانیه خواهد بود. باید توجه نمود که حداکثر مقدار نشت در یک گره توسط عوامل دیگری چون قطر لوله، عمر لوله‌ها و غیره نیز محدود می‌شود و تحلیل گر بر اساس کلیه اطلاعات باید این حدود را تعیین کند.

۲-۲- بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها

روش کلونی مورچه‌ها، با الهام گرفتن از زندگی مورچه‌های واقعی، در سال ۱۹۹۲ توسط دوریگو پیشنهاد شد [۲۱]. به‌طور طبیعی، مورچه‌ها در مسیر حرکت خود از یک منبع غذایی تا لانه، ماده‌ای به نام فرومون^۶ ترشح می‌کنند. هر مورچه برای رسیدن به غذا مسیری را به‌صورت تصادفی انتخاب می‌کند و تنها راهنمای وی برای این انتخاب، فرومون باقیمانده از سایر مورچه‌ها است. با توجه به زمان کوتاه‌تر برای طی یک مسیر کوتاه‌تر، مقدار فرومون در مسیر کوتاه‌تر تقویت شده و با توجه به تبخیر تدریجی فرومون، پس از اندک زمانی کوتاه‌ترین مسیر توسط مورچه‌ها شناسایی می‌شود. تنظیم پارامترها به‌روش کلونی مورچه‌ها در یک فضای گسسته صورت می‌گیرد. به‌عنوان مثال در مسئله حاضر، فضای بین \underline{L} و \bar{L} به A_n بازه تقسیم می‌شود. در هر گره، هر کدام از L_i ها با مقدار دبی پایه جمع می‌شود تا یک گزینه برای مجموع مصرف و نشت در آن گره تعیین شود. برای تعیین مقدار مصرف پایه، نخست متوسط دبی مصرفی در هر گره با اختصاص مصارف ثبت شده توسط کنتورهای مشترکان به آن گره به‌دست می‌آید. سپس با اعمال ضرایب ساعتی و روزانه، مصرف پایه مربوط به زمان ثبت اطلاعات فشار و دبی، مقدار مصرف پایه برای هر گره تخمین زده می‌شود. از این پس،

⁵ Fitness
⁶ Pheromone

¹ Genetic Algorithm (GA)
² Ants Colony
³ MATLAB
⁴ EPANET

برنامه، مجموع مقدار مصرف گره و نشست را کالیبره می‌کند و در انتهای برنامه بعد از کالیبره کردن این پارامتر، پس از کسر مقدار مصرف پایه، مقدار نشست تعیین می‌شود.

هر مورچه مجازی در واقع رشته‌ای با N مؤلفه خواهد بود (N تعداد گره‌های شبکه) که هر مؤلفه آن، نشان دهنده مجموع مقدار نشست و مصرف در یک گره است. احتمال انتخاب مقادیر مختلف به‌عنوان مصرف یک گره، مساوی نیست. مهم‌ترین رابطه در این روش که احتمال انتخاب را به فرومون و راهنمای کاوشی^۱ ارتباط می‌دهد، به‌صورت زیر است

$$p_{ij}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_k [\tau_{ik}(t)]^\alpha [\eta_{ik}]^\beta} \quad (4)$$

که در آن

$p_{ij}(t)$ احتمال آنکه مصرف گره‌ای i برای گره j زد تکرار t انتخاب شود. $\tau_{ij}(t)$ مقدار فرومون برای مصرف گره‌ای i در گره j در تکرار t ام می‌باشد که بعد از هر تکرار به‌نگام می‌شود. همچنین η_{ij} مقدار مطلوبیت (راهنمای کاوشی) برای مصرف گره‌ای i و گره j است که مقداری ثابت است. در این تحقیق با این فرض که تعداد نشست‌های همزمان در شبکه محدود است و اکثر گره‌ها دارای نشست نیستند، از مطلوبیت برای افزایش احتمال انتخاب مصارف پایه در هر گره (برداشت شده از کنتورهای مشترکین) استفاده می‌شود. α و β نیز برای کنترل ارزش نسبی شدت فرومون و مطلوبیت در هر انتخاب می‌باشند.

برای هر مورچه یا به‌عبارتی برای مجموعه مقادیر انتخابی به‌عنوان مصارف اضافی، یک تحلیل در نرم افزار ایننت انجام می‌شود. بر اساس فشارهای به‌دست آمده و استفاده از رابطه ۲، برازندگی هر مورچه محاسبه می‌شود. در صورتی که برازندگی حاصل، بهترین برازندگی تا آن تکرار باشد، احتمال انتخاب مصارف گره‌ای انتخابی در آن تحلیل، افزایش یافته و احتمال انتخاب بقیه مقادیر کاهش می‌یابد. این فرایند به‌وسیله رابطه زیر انجام می‌شود:

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (5)$$

که در آن

$\tau_{ij}(t+1)$ مقدار فرومون در تکرار $(t+1)$ و $\Delta\tau_{ij}$ مقدار به

هنگام‌سازی فرومون است. ρ نیز نرخ تبخیر^۲ فرومون است که عددی بین صفر و یک می‌باشد. فرومون در ابتدای برنامه برای کلیه انتخاب‌ها در تمامی گره‌ها برابر یک است و در تکرارهای مختلف، هر بار که جواب بهتری به‌دست آید، در هر گره، فقط مقدار فرومون مربوط به یک مصرف گره‌ای افزایش می‌یابد یعنی در آن مصرف گره‌ای که به جواب بهینه نزدیک‌تر است، مقدار $\Delta\tau_{ij}$ به فرومون آن افزوده می‌شود و احتمال انتخاب آن در تکرارهای بعدی افزایش می‌یابد. درحالی‌که برای دیگر مصارف گره‌ای، $\Delta\tau_{ij}$ برابر با صفر است. لازم به‌ذکر است که مقادیر پارامترهای مختلف روش کلونی مورچه‌ها شامل توان مقادیر فرومون و مطلوبیت و تبخیر در مسائل مختلف متفاوت بوده و با سعی و خطا تعیین می‌شود. برای این کار قبل از استفاده از مدل، مقادیر اولیه‌ای به این پارامترها اختصاص می‌یابد. آنگاه با تغییر مقادیر هر یک از پارامترها، بهترین آنها بر اساس کمترین تکرار و بهترین برازندگی برای مسئله مورد نظر، انتخاب می‌شوند. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته در کار حاضر، تغییر در مقدار راهنمای کاوشی، بیشترین تأثیر را بر روی نتایج نشان می‌دهد و تغییر سایر پارامترها تأثیر کمتری دارند. لذا در مثال‌های مختلف برای بهبود نتایج، تنها این پارامتر تغییر داده می‌شود و سایر پارامترها ثابت باقی می‌مانند. بر این اساس برای مقادیر α و β در ابتدا مقدار $0/5$ در نظر گرفته شد. سپس گستره تغییرات این کمیت بین $0/5$ تا 2 با فواصل $0/1$ تغییر داده شد و مقدار 1 برای هر دو پارامتر به‌عنوان مقدار بهینه به‌دست آمد. مقدار تبخیر به ازای مقادیر مختلف از 1 به‌صورت کاهشنده تا $0/9$ با فواصل $0/05$ مورد بررسی قرار گرفت و مقدار $0/99$ به‌عنوان مقدار بهینه برای تمامی تحلیل‌ها انتخاب شد. مقدار $\Delta\tau_{ij}$ اولیه $0/01$ در نظر گرفته شد و به‌صورت افزایشی تا $0/2$ با فواصل $0/01$ مورد بررسی قرار گرفت و نهایتاً مقدار $0/1$ به‌عنوان مقدار بهینه انتخاب شد. در این رابطه می‌توان به کار ارائه شده توسط فغفور مغربی و همکاران مراجعه نمود [۲۴].

۳- نتایج و بحث

برای بررسی صحت و دقت محاسبات، از دو شبکه نمونه استفاده شد. شبکه اول که در مقالات با عنوان مدل اینتون^۳ شناخته می‌شود، توسط والسکی و همکاران در سال ۱۹۸۷ مورد استفاده قرار گرفت و تاکنون در حل مسائل مختلف در زمینه مهندسی آب از آن استفاده شده است و بررسی‌های زیادی بر روی آن انجام شده است [۱۶، ۲۵ و ۲۷]. همچنین بررسی‌هایی بر روی مدل یک آزمایشگاهی که به‌همین منظور در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه فردوسی مشهد

² Evaporation Rate

³ Anytown

¹ Heuristic Guidance

ساخته شد، به انجام رسید. فاضل و فغفور مغربی بررسی‌هایی را بر روی شبکه شهر گلپهار انجام داده‌اند [۲۸]. در تحقیق مذکور، ضرورت ارزیابی روشهای نشت‌یابی در یک شبکه آزمایشگاهی مشخص شده است. در چنین شبکه‌ای تقریباً تمامی خطاهای یک شبکه واقعی وجود دارد، با این تفاوت که محل و مقدار نشت در این شبکه قابل ارزیابی است.

۳-۱- شبکه انیتون

شبکه انیتون که در شکل ۱ نمایش داده شده است، دارای ۱۶ گره، ۳۴ لوله، ۳ پمپ موازی، ۱ مخزن با ارتفاع ۳/۰۴ متر و ۲ تانک با ارتفاع ۷۱/۶ متر است. مشخصات گره‌های شبکه و لوله‌ها در شکل ۱، درج شده است. برای استفاده از روش حاضر، ابتدا شبکه مورد نظر با استفاده از اطلاعات ارائه شده در شکل ۱ در نرم افزار اینت مدل شده و فایل خروجی آن با پسوند inp ذخیره شد. سپس تعداد گره‌های شبکه، تعداد فشارسنج مورد نظر و میزان مصارف گره‌ای برای هر گره به برنامه نوشته شده در نرم افزار متلب معرفی شد. سپس با برقراری ارتباطی پویا بین دو نرم افزار اطلاعات تحلیل‌های هیدرولیکی به نرم افزار متلب ارسال گردید.

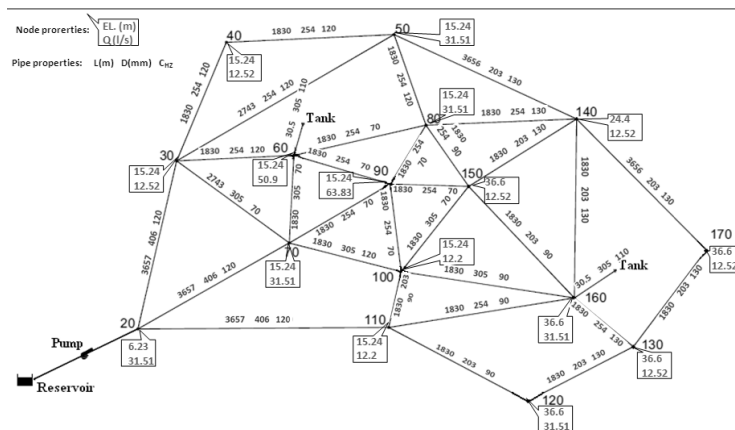
نتایج بهینه‌یابی موقعیت فشارسنجی، در تحقیقات مختلف برای چهار فشارسنج گره‌های ۴۰، ۹۰، ۱۱۰ و ۱۲۰ است [۱۶، ۲۶، ۲۷]. همچنین تعداد گره‌های بهینه برای فشارسنجی بر اساس تحقیقات کاپلان و همکاران و بهزادیان و همکاران پیشنهاد شده است [۱۶ و ۲۶]. در طی تحقیقات مختلف، مصارف گره‌ای در پنج گروه دسته‌بندی شده و پنج بارگذاری مختلف برای تحلیل مورد استفاده قرار گرفته است و شبکه به صورت معین تحلیل شده است [۲۶ و ۲۷]. بر اساس تحقیقات کاپلان، برای رسیدن به دقت نسبی ۰/۲، ۰/۶ و ۰/۸۵ و با در نظر گرفتن ۰/۱ متر خطا در اندازه‌گیری‌ها، به ترتیب به فشارسنجی در ۴، ۲ و ۸ گره‌ای نیاز دارد [۱۶].

مقدار نشت بین ۰ تا ۱۰۰ با فواصل ۱۰ لیتر بر ثانیه جستجو

شد. حداکثر تعداد تکرار برای آنالیز به ۱۰۰۰ محدود شد و مقدار راهنمای کاوشی برای ۱ و ۲ نشت به ترتیب ۳۰ و ۲۰ در نظر گرفته شد. تحلیل شبکه در دو حالت (۱) عدم وجود خطا در اندازه‌گیری‌ها (۲) وجود ۰/۱ متر خطا در اندازه‌گیری‌ها انجام شد. جدول ۱ تحلیل شبکه را در چند حالت مختلف نشان می‌دهد. هر تحلیل نسبت به سایر تحلیل‌ها کاملاً مستقل بوده و تحت شرایط خاص خود انجام شده است. ستون‌های ۲ و ۳ موقعیت و مقدار نشت فرضی را برای هر حالت تحلیل نشان می‌دهند. ستون ۴، اعداد درج شده شماره گره‌های فشارسنجی را نشان داده و "جریان ورودی"، اندازه‌گیری مقدار جریان ورودی به شبکه به‌عنوان یک مشاهده اضافی را بیان می‌کند. نشت محاسبه شده، موقعیت و مقدار نشت به دست آمده در فرایند کالیبراسیون با تنظیم فشارهای گره‌ای و جریان ورودی در ستون‌های ۶ و ۷ و برازندگی به دست آمده از رابطه ۲ و تکراری که در آن بهترین جواب به دست آمده در ستون‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است.

همانگونه که مشاهده می‌شود، چهار تحلیل نخست با فرض عدم وجود خطا در اندازه‌گیری‌ها و چهار آنالیز بعدی با فرض مقدار خطا ۰/۱ متر در اندازه‌گیری‌ها انجام شده است. در تحلیل نخست مقدار نشت ۳۰ لیتر بر ثانیه در گره ۷۰ فرض شده است. فشار گره ۹۰ و دبی ورودی به‌عنوان مشاهدات شبکه به برنامه بهینه‌یابی معرفی شده است. با وجود اینکه مقدار برازندگی تقریباً صفر به دست آمده، ولی جواب به دست آمده برای مقدار و موقعیت نشت صحیح نیست. بر این اساس، با کاهش تعداد مشاهدات و افزایش مجهول‌ها، چندین پاسخ صحیح برای مسئله وجود دارد که با نتایج ارائه شده توسط والسکی موافق است [۱۸]. در آنالیز بعدی و با اضافه شدن فشار سنجی در گره ۱۲۰ به مجموعه مشاهدات، مقدار دقیق پاسخ به دست می‌آید.

آنالیزهای شماره ۳ و ۴ دو نشت همزمان را با تعداد مشاهدات



شکل ۱- شبکه مورد مطالعه انیتون [۲۵]

مختلف جستجو می‌کنند. در این حالت نیز با افزایش تعداد مشاهدات، مقدار دقیق نشت شناسایی می‌شود. بر اساس این تحلیلها، برای پیدا شدن جواب درست به تعداد مشاهدات بیشتری نسبت به حالت وجود یک نشت نیاز است. دشوار شدن نشت یابی با افزایش تعداد گره‌های دارای نشت به خاطر دو عامل است: عامل اول به ماهیت روش مربوط است. روش حاضر که بر اساس تنظیم فشار در گره‌های انتخابی استوار است، به کاهش ایجاد شده در فشار گره‌های انتخابی در اثر وجود نشت‌های فرضی وابسته است. به عبارتی وجود نشت در شبکه که در واقع یک مصرف اضافی است، باعث افزایش سرعت جریان در لوله‌ها و در نتیجه کاهش فشار در گره‌ها می‌شود که این کاهش فشار با نزدیک شدن به گره دارای نشت، افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد گره‌های دارای نشت، برهم

گذاری این کاهش‌ها الگوی پیچیده‌تری ایجاد می‌کند و نشت یابی را دشوار می‌کند. عامل دوم به ماهیت روش کلونی مورچه‌ها مربوط می‌شود. مزیت عمده روش کلونی مورچه‌ها به عاملی به نام راهنمای کاوشی، مربوط می‌شود [۲۴]. راهنمای کاوشی اطلاعات طراح از شبکه را به برنامه معرفی می‌کند. در این مسئله فرض شده است که اکثریت گره‌های شبکه دارای نشت نیستند و لذا به کمک این پارامتر، احتمال انتخاب گزینه عدم وجود نشت در گره افزایش داده می‌شود. با افزایش تعداد گره‌های دارای نشت، تأثیر این ضریب کاهش یافته و توانایی این روش برای نشت یابی کاهش می‌یابد. تحلیل شماره پنج، مشابه حالت شماره دو است، با این تفاوت که در اندازه‌گیری فشار، ۰/۱ متر خطا وجود دارد. در این حالت علی‌رغم اینکه موقعیت نشت به درستی تشخیص داده شده است، ولی مقدار

جدول ۱- نشت یابی در شبکه انیتون

شماره تحلیل	نشت واقعی		مشاهدات	خطای اندازه‌گیری	نشت محاسبه شده		تکرار
	موقعیت	مقدار			موقعیت	مقدار	
۱	۷۰	۳۰	۹۰ جریان ورودی	۰	۲۰ ۴۰ ۷۰	۱۰ ۱۰ ۱۰	۴۳
۲	۷۰	۳۰	۹۰ ۱۲۰ جریان ورودی	۰	۷۰	۳۰	۵۳۲
۳	۷۰ ۱۴۰	۳۰ ۲۰	۹۰ ۱۲۰	۰	۱۱۰	۲۰	۱۵۷
۴	۷۰ ۱۴۰	۳۰ ۲۰	۹۰ ۱۲۰ ۱۱۰ جریان ورودی	۰	۷۰ ۱۴۰	۳۰ ۲۰	۶۱
۵	۷۰	۳۰	۹۰ ۱۲۰	۰/۱	۷۰	۲۰	۹۲
۶	۷۰ ۱۴۰	۳۰ ۲۰	۹۰ ۱۲۰ ۱۱۰ جریان ورودی	۰/۱	۱۰۰ ۱۴۰ ۱۶۰	۲۰ ۲۰ ۱۰	۸۷۱
۷	۷۰ ۱۴۰	۳۰ ۲۰	۹۰ ۱۲۰ ۱۱۰ ۴۰ ۱۷۰ جریان ورودی	۰/۱	۶۰ ۷۰ ۱۴۰	۱۰ ۲۰ ۲۰	۹۱۴
۸	۷۰ ۱۴۰	۶۰ ۴۰	۹۰ ۱۲۰ ۱۱۰ جریان ورودی	۰/۱	۱۶۰ ۷۰ ۱۴۰	۱۰ ۵۰ ۴۰	۶۹۴

نشت دارای خطاست. حالت تحلیل شش نیز مشابه حالت چهار است ولی علی‌رغم برازندگی بسیار ناچیز، نتایج برای گره ۱۴۰ درست و برای گره ۷۰ نادرست به دست آمد. این مسئله نشان می‌دهد که وجود خطا در اندازه‌گیری‌ها که امری اجتناب‌ناپذیر است، تأثیر بسیار زیادی بر روی نتایج خواهد داشت. در حالت هفت با افزایش تعداد مشاهدات، نتایج به دست آمده دارای دقت نسبی خوبی می‌باشند. آخرین تحلیل با ۲ برابر شدن مقدار نشت انجام شده و نشان می‌دهد با افزایش مقدار نشت و در نتیجه افزایش افت فشار در گره‌های مشاهداتی، اثر خطای اندازه‌گیری کاهش یافته و نتایج بهتری به دست می‌آید.

بر اساس نتایج به دست آمده از تحلیل شبکه انیتون می‌توان نتیجه‌گیری نمود: (۱) مقدار و موقعیت نشت با استفاده از کالیبراسیون شبکه در حالت پایدار دائمی قابل استخراج است؛ (۲) در اکثر تحلیل‌های انجام شده، پاسخ بهینه با تکرارهای محدودی به دست آمد. در مسئله حاضر با توجه به وجود ۱۱ گزینه انتخابی برای هر گره، فضای جستجو شامل ۱۶^{۱۱} مورد می‌باشد که با کمتر از ۱۰۰۰ تکرار، جوابهای بسیار خوبی شناسایی شده که قابلیت‌های قابل توجه روش کلونی مورچه‌ها را نشان می‌دهد؛ (۳) نشت یابی با افزایش مقدار نشت و افزایش تعداد مشاهدات بهبود یافته و با افزایش تعداد نشت و خطای اندازه‌گیری، دشوار می‌شود؛ (۴) رسیدن به یک برازندگی خوب نمی‌تواند تضمین‌کننده انجام یک نشت یابی خوب باشد و حتی در صورت عدم وجود مشاهدات کافی، ممکن است جوابهای متعددی وجود داشته باشد که فشار را در نقاط اندازه‌گیری تنظیم کند. لذا قبل از انجام مطالعات نشت یابی، مطالعات طرح نمونه‌گیری بهینه برای تعیین موقعیت و تعداد نقاط فشارسنجی لازم باید صورت گیرد؛ (۵) بر اساس مطالعات قبلی که بر روی این شبکه انجام شده است، وقتی مصارف گره‌ای در پنج گروه، دسته‌بندی شوند و پنج بارگذاری مختلف مورد استفاده قرار گیرد و فشار سنجی در ۸ گره انجام شود، دقت نسبی کالیبراسیون کمتر از ۰/۸۵ خواهد بود [۱۶، ۲۶ و ۲۷]. به عبارتی ۴۰ درصد از اندازه‌گیری فشار برای تنظیم تنها ۵ پارامتر و آن هم با دقت ۰/۸۵ لازم است. بر این اساس، استفاده از این روش برای مقاصد نشت یابی غیرممکن به نظر می‌رسید. تحلیل‌های انجام شده در مقاله حاضر نشان داد که تنها با پنج فشارسنجی با خطای ۰/۱ متر و ۱ دبی سنجی، ۱۶ مجهول مصرف گره‌ای تنظیم شد و دو نشت همزمان با دقت قابل قبولی شناسایی شد. بدیهی است با افزایش تعداد بارگذاری‌های شبکه و گروه‌بندی مصارف، نتایج بهتری قابل دستیابی خواهد بود.

۳-۲- مدل آزمایشگاهی

مدل مورد استفاده در این مقاله مدل آزمایشگاهی واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد بود که با ابعاد کلی ۳/۷۰ متر در ۱۰/۳۰ متر ساخته شد. این شبکه شامل ۶ حلقه، ۳۱ موقعیت بالقوه فشار سنجی و ۸ موقعیت بالقوه شبیه‌سازی مصرف و نشت بود که از لوله‌های برگشت آب، یک مخزن روباز ۱۰۰۰ لیتری و یک مخزن تحت فشار سود می‌برد. لوله‌ها از نوع پلیمری (PPRC) بوده و در شبکه اصلی با قطر داخلی ۱۶ میلی‌متر و لوله‌های برگشت با قطر داخلی ۱۰ میلی‌متر می‌باشند. در هر یک از لوله‌های اصلی شبکه، یک شیر قطع و وصل از نوع کروری در نظر گرفته شد. فشار در گره‌های مورد نظر توسط فشارسنج‌های الکترونیکی با دقت ۱ درصد و جریان ورودی به شبکه توسط یک کنتور الکترومغناطیسی با دقت ۰/۰۳ لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری شده و به کمک یک دیتالاگر به کامپیوتر منتقل می‌شد. مصارف گره‌ای به صورت حجمی و با استفاده از یک مخزن روباز مدرج اندازه‌گیری می‌شد. شکل ۲ نمای کلی از شبکه، سنسورهای فشارسنجی و نمونه‌ای از برداشت‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

۳-۳- کالیبراسیون شبکه بدون نشت

پس از اندازه‌گیری ابعاد دقیق شبکه، تراز گره‌ای، استخراج مشخصات پمپ مدل شبکه در برنامه اپینت ساخته شد. در این شبکه نصیریان و فغفور مغربی به منظور تعیین فاکتور اصطکاک لوله‌ها و همچنین بررسی بهترین رابطه برای تخمین افت طولی، در چند بازه‌ی مستقیم، مقادیر فشار و افت هیدرولیکی در دبی‌های مختلف را اندازه‌گیری و با نتایج به دست آمده از روابط داری-وایسباخ^۱ و هیزن-ویلیامز^۲ مقایسه‌ای را به انجام رساندند [۲۹]. ضریب هیزن ویلیامز^۳ بر اساس این بررسی‌ها معادل ۱۵۰ محاسبه شد. اطلاعات مربوط به پمپ، ضرایب افت طولی و سایر مشخصات شبکه از مطالعات قبلی برداشت شد و در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت [۲۹].

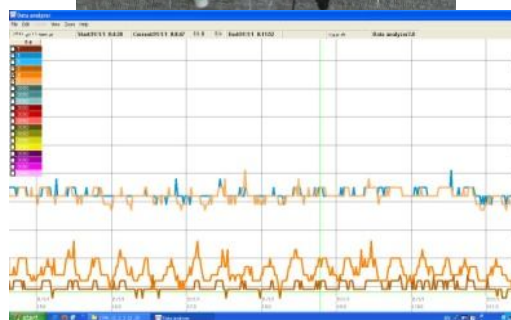
۳-۴- شناسایی یک نشت در شبکه

شبکه شکل ۳ در حالتی که کلیه شیرهای موجود روی لوله‌های اصلی باز است، برای بررسی وجود نشت مورد آزمایش قرار گرفت. برای این کار شیر برداشت از گره ۹ تا میزان معینی باز شد و دبی ۱/۵/۲۶۲ اندازه‌گیری شد. فشارسنجی در گره‌های ۱۷ و ۲۴ انجام شد

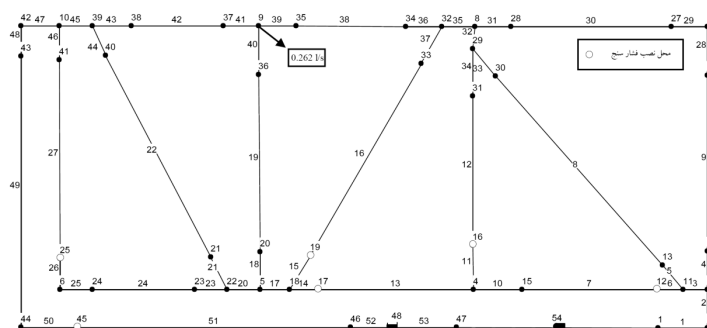
¹ Darcy-Weisbach Equation

² Hazen-Williams Equation

³ Hazen-Williams coefficient



شکل ۲- سیستم آزمایشگاهی اجرا شده



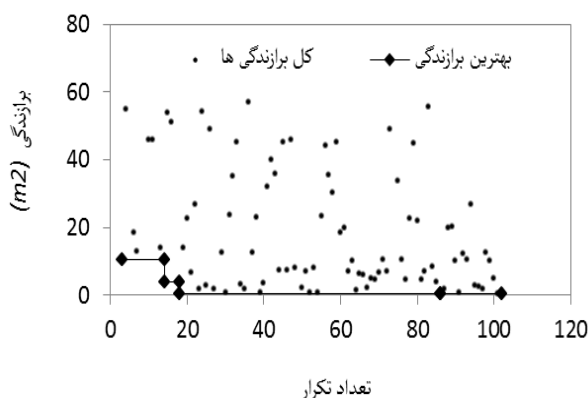
شکل ۳- مدل شبیه‌سازی آزمایشگاه در نرم افزار اپینت

عدم وجود نشت در سایر گره‌ها را نشان داد. این نتیجه با توجه به بازه‌های انتخابی نشت، بهترین جواب ممکن می‌باشد. نمودار تغییرات برازندگی در برابر شماره تکرار در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل، بهترین برازندگی به دست آمده تا هر تکرار نیز مشخص شده است. با توجه به این شکل، برازندگی در ۴ مرحله بهبود یافته است و به عبارتی ۴ مرتبه به روز رسانی فرمون انجام شده است.

و فشارهای ثبت شده به برنامه بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها معرفی شدند. در برنامه بهینه‌یابی، مقادیر انتخابی به عنوان نشت در بازه (۰ و ۰/۵ l/s) با فواصل ۰/۰۵ l/s تنظیم شدند. حداکثر تکرار ۱۰۰۰ و میزان مطلوبیت ۳۰ در نظر گرفته شد. جدول ۲ فشارهای محاسباتی (شبیه‌سازی شده) و مشاهداتی را در نقاط فشار سنجی نشان می‌دهد. بهترین جواب در تکرار ۱۰۲ به دست آمد و نتایج وجود نشتی به میزان ۰/۲۵ l/s را در گره ۹ و

جدول ۲- نتایج برنامه‌ی نشت یابی برای نشت در گره‌ای ۹

شماره گره	فشار مشاهداتی (m)	نتایج کلونی مورچه‌ها	
		مصرف گره‌ای (l/s)	فشار شبیه‌سازی شده (m)
۱۷	۲۹/۶۰	۰	۲۹/۹۵
۲۴	۲۸/۴۲	۰	۲۸/۷۲



شکل ۴- کل برازندگی ها و بهترین برازندگی ها در برابر تکرار

۳-۵- شناسایی دو نشت همزمان در شبکه فرعی

در آزمایش دیگری نخست شیرهای موجود بر روی لوله‌های حلقه‌های میانی شامل لوله‌های شماره ۸، ۱۲، ۱۶، ۱۹ و ۲۲ بسته شد و جریان تنها حلقه پیرامونی برقرار شد. شیرهای برداشت دو گره ۵ و ۶ باز شدند و دبی خروجی ۰/۰۹ و ۰/۳۳ لیتر بر ثانیه برای دو گره توسط مخزن اندازه‌گیری حجمی ثبت شدند. فشار گره‌های ۱۷، ۲۴ و ۲۷ اندازه‌گیری شد. سایر شرایط تحلیل، مشابه آزمایش قبل باقی ماند.

بهترین جواب در تکرار ۱۹۵ به دست آمد و نتایج، وجود نشتی به میزان ۰/۱ لیتر بر ثانیه در گره ۵ و ۰/۳ لیتر بر ثانیه در گره ۶ را نشان دادند. در سایر گره‌ها که در جدول به نشت آنها اشاره نشده، مقدار نشت تشخیصی صفر است. نتایج برنامه در جدول ۳ ارائه شده است.

۳-۶- شناسایی دو نشت همزمان در شبکه کامل

آزمایش دیگری با فرض وجود دو نشت همزمان در شبکه اصلی انجام شد. در این حالت نیز مانند آزمایش اول، تمامی شیرهای شبکه باز شد. نشت در گره‌های ۸ و ۶ به مقدار ۰/۳۷ و ۰/۵۲۶ لیتر بر ثانیه شبیه‌سازی شد. فشار در ۵ گره ۰/۱۴، ۰/۲۰، ۰/۲۵، ۰/۳۳ و ۰/۴۵ اندازه‌گیری شد. شبکه در دو حالت مشاهداتی (۱) سه فشارسنج در گره‌های ۰/۲۰، ۰/۲۵ و ۰/۳۳؛ و (۲) پنج فشارسنج در گره‌های معرفی شده تحلیل شد. جستجو برای نشت در بازه ۰ تا ۰/۷ و فواصل ۰/۰۵ لیتر بر ثانیه انجام شد. جدول ۴ نتایج تحلیل‌ها را نشان می‌دهد. برای به دست آوردن یک تخمین از میزان خطای اندازه‌گیری، مدل ایپنت با اعمال نشت در گره‌های ۸ و ۶ به مقدار ۰/۳۷ و ۰/۵۲۶ لیتر بر ثانیه شبیه‌سازی شد و فشار در گره‌های شبکه به دست آمد. این فشارها تحت عنوان "نتایج ایپنت" در جدول ۴ درج گردیده‌اند. همانگونه که مشاهده می‌شود این اختلاف از ۰/۱۸ متر در گره ۴۵ تا ۰/۶۴ متر در گره ۲۰ متغیر است. بر این اساس، اگر مقادیر نشت اندازه‌گیری شده در بین بازه‌های معرفی شده به برنامه، برای نشت وجود داشته باشد و این ارقام انتخاب شوند، بهترین برازندگی قابل دسترسی ۰/۹۸ خواهد بود.

کالیبراسیون شبکه با سه فشارسنج توانست به برازندگی ۰/۱۸۵ دست یابد که بسیار خوب است ولی نشت‌های شناسایی شده در گره‌های ۶، ۹ و ۷ به میزان ۰/۴، ۰/۴۵، و ۰/۰۵ لیتر بر ثانیه بود. بر این اساس می‌توان گفت نشت در گره ۶ تنها از نظر موقعیت به درستی شناسایی شده ولی نشت در گره ۸ چه به لحاظ موقعیت و چه کمیت شناسایی نشده است. در ادامه، نشت یابی با پنج فشارسنج با رسیدن به برازندگی ۰/۵۸۷ توانست تقریباً بهترین پاسخ ممکن را برای نشت در گره شماره ۶ شناسایی کند و پاسخ ۰/۲۵ لیتر بر ثانیه به عنوان نشت گره ۸ نیز قابل قبول است و علی‌رغم اینکه یک نشت اضافی به میزان ۰/۱ لیتر بر ثانیه را نیز در گره ۹ شناسایی کرده ولی می‌توان گفت که نتایج نشت یابی با پنج فشارسنج بسیار خوب بوده است.

جدول ۳- نتایج برنامه‌ی نشت یابی برای نشت در گره‌های ۵ و ۶

شماره گره	فشار مشاهداتی (m)	نتایج کلونی مورچه‌ها		برازندگی در هر گره (m ²)
		مصرف گره‌ای (l/s)	فشار شبیه‌سازی شده (m)	
۵	-	۰/۱	۲۴/۴۵	-
۶	-	۰/۳	۲۱/۵۱	-
۱۷	۲۵/۳۵	۰	۲۵/۸۷	۰/۲۷۰
۲۴	۲۲/۶۵	۰	۲۲/۹۸	۰/۱۰۹
۲۷	۲۳/۹۶	۰	۲۴/۴۱	۰/۲۰۲
برازندگی کل (m ²) ۰/۵۸۲				

جدول ۶- ده پاسخ با برازندگی کمتر برای نشت یابی با پنج فشار سنج

برازندگی شماره گره	۰/۵۹	۰/۶۱	۰/۶۱	۰/۷۳	۰/۰۴	۰/۰۸	۱/۸۸	۲/۳۲	۲/۶۹	۲/۶۹
۱۰	۰	۰	۰	۰	۰/۳۵	۰	۰/۵	۰	۰	۰
۹	۰/۱	۰/۰۵	۰	۰	۰/۱۵	۰	۰/۱۵	۰	۰/۳۵	۰/۳۵
۸	۰/۲۵	۰/۳	۰/۳	۰	۰/۱	۰/۱۵	۰	۰	۰	۰
۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۵	۰/۴	۰	۰
۴	۰	۰	۰	۰/۳۵	۰	۰	۰	۰	۰/۵۵	۰/۵۵
۵	۰	۰	۰	۰	۰/۲۵	۰/۱	۰	۰	۰	۰
۶	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۶	۰/۵۵	۰/۰۵	۰/۶۵	۰/۲	۰/۵۵	۰	۰

۴- نتیجه گیری

و در زمان کوتاه به اثبات رسید. از سویی بر اساس نتایج این مقاله، نشت یابی با افزایش مقدار نشت و افزایش تعداد مشاهدات بهبود یافته و با افزایش تعداد گره‌های دارای نشت و افزایش خطای اندازه‌گیری مشکل می‌شود. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته، رسیدن به یک برازندگی خوب نمی‌تواند تضمین کننده انجام یک نشت یابی خوب باشد، مخصوصاً در صورت عدم وجود مشاهدات کافی، ممکن است جوابهای متعددی وجود داشته باشد که فشار را در نقاط اندازه‌گیری تنظیم کند. لذا قبل از انجام مطالعات نشت یابی، مطالعات طرح نمونه‌گیری بهینه برای تعیین موقعیت و تعداد نقاط فشارسنجی لازم باید صورت گیرد. علاوه بر این دو راهکار، برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از نشت یابی در این مقاله ارائه شد که می‌توان به کمک آنها، صحت نتایج به دست آمده را مورد ارزیابی قرار داد. همچنین بررسی‌های آزمایشگاهی نشان دادند که قبل از انجام کالیبراسیون باید از دقت قابل قبول سایر پارامترها اطمینان حاصل شود. بررسی‌های انجام شده روی شبکه آزمایشگاهی که نمونه‌ای از شرایط واقعی است، نشان داد که روش حاضر می‌تواند به‌طور مؤثری در نشت یابی شبکه‌های توزیع مؤثر بوده و راهنمای خوبی برای روشهای محلی نشت یابی باشد.

در این مقاله نشت یابی شبکه‌های توزیع با استفاده از کالیبراسیون فشارهای گره‌ای به روش کلونی مورچه‌ها بر روی دو شبکه شامل یک شبکه فرضی برگرفته از مراجع و یک شبکه آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده از تحلیل شبکه فرضی، مقدار و موقعیت نشت با استفاده از کالیبراسیون شبکه در حالت پایدار دائمی قابل استخراج است. همچنین امکان نشت یابی با استفاده از کالیبراسیون فشارهای گره‌ای در حالت پایدار دائمی بر روی شبکه آزمایشگاهی و با وجود خطاهای ناشی از اندازه‌گیری و مدل‌سازی نیز با موفقیت آزمایش شد و مورد تأیید قرار گرفت. بر اساس مطالعات قبلی که بر روی شبکه فرضی به کار گرفته شده در این مقاله انجام شد، استفاده از این روش، برای مقاصد نشت یابی غیرممکن به نظر می‌رسید. تحلیلهای انجام شده در مقاله حاضر نشان داد که تنها با پنج فشارسنجی با خطای ۰/۱ متر و یک دی‌سنجی، ۱۶ مجهول مصرف گره‌ای تنظیم شد و دو نشت همزمان با دقت قابل قبولی شناسایی شد. بدیهی است با افزایش تعداد بارگذاری‌های شبکه و گروه بندی مصارف، نتایج بهتری قابل دستیابی خواهد بود. همچنین در این مقاله قابلیت‌های قابل توجه روش کلونی مورچه‌ها برای یافتن جواب بهینه با تعداد تکرار اندک

۵- مراجع

1. Karamouz, M., Tabesh, M., Nazif, S., and Moridi, A. (2005). "Estimation of hydraulic pressure in water networks using artificial neural networks and fuzzy logic." *J. of Water & Wastewater*, 53, 3-14. (In Persian)
2. Ekuakille, A. L., Vendramin, G., and Trotta, A. (2009). "Spectral analysis of leak detection in a zigzag pipeline: A filter diagonalization method-based algorithm application." *Measurement*, 42, 358-367.
3. Tabesh, M., Aghaei, A., and Soltani, J. (2011). "Study (prediction) of main pipes break rates in water distribution systems using intelligent and regression methods." *J. of Water and Wastewater*, 78, 2-14. (In Persian)
4. Soltani, A., and Faghfour Maghrebi, M. F. (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)

5. Covas, D., and Ramos, H. (2010). "Case studies of leak detection and location in water pipe systems by inverse transient analysis." *J. of Water Resources Planning and Management*, 136(2), 248-257.
6. Hunaidi, O., Chu, W., Wang, A., and Guan, W. (1999). "Leakage detection methods for plastic water distribution pipes." *In Advancing the Science of Water. AWWA Research Foundation Technology Transfer Conf.*, Denver.
7. Brunone, B. (1999). "Transient test-based technique for leak detection in outfall pipes." *J. of Water Resources Planning and Management*, 125(5), 302-306.
8. Zorriasateyn, N., and Borghei, S. M. (2005). "Dynamic simulation of water networks to control and reduce physical unaccounted-for water." *J. of Water and Wastewater*, 55, 49-59. (In Persian)
9. Pudar, R. S., and Liggett, J. A. (1992). "Leaks in pipe networks." *J. Hydraul. Eng.*, 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 Int. Symp. on Water Distribution Systems Analysis*, Cincinnati, Ohio.
- 11- Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W., and Beckwith, S. (2002). *Advanced water distribution modeling and management*, Haested Press, Waterbury, CT USA.
12. Ormsbee, L. E., and Lingireddy, S. (1997). "Calibrating hydraulic network models." *J. of the American Water Works Association*, 89(2), 44-54.
13. Boulos, P. F., and Wood, D. J. (1990). "Explicit calculation of pipe network parameters." *J. of Hydraulic Engineering*, 116(11), 1329-1344.
14. Kang, D., and Lansey, K. (2011). "Demand and roughness estimation in water distribution systems." *J. of Water Resources Planning and Management*, 137(1), 20-30.
15. Cheng, W., and He, Z. (2011). "Calibration of nodal demand in water distribution systems." *J. of Water Resources Planning and Management*, 137(1), 31-40.
16. Kapelan, Z. S., Savic, D. A., and Walters, G. A. (2003). "Multiobjective sampling design for water distribution model calibration." *J. of Water Resources Planning and Management*, 129(6), 466-479.
17. Wu, Z. Y., Burrows, R., Moorcroft, J., Croxton, N., and Limanond, S. (2010). "Pressure-dependent leakage detection method compared with conventional techniques." *Water Distribution System Analysis: Tucson, AZ, USA*, 1083-1092.
18. Walski, T. M., DeFrank, N., Voglino, T., Wood, R., and Whitman, B. E. (2006). "Determining the accuracy of automated calibration of pipe network models." *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium*, Cincinnati, Ohio, USA.
19. Covas, D., and Ramos, H. (2001). "Hydraulic transients used for leakage detection in water distribution systems." *BHR Group 2001 Water Pipeline Systems*, 227-241.
20. Vitkovsky, J., Lambert, M., Simpson, A., and Wang, X.-J. (2001). "An experimental verification of the inverse transient technique for leak detection." *6th Conference on Hydraulics in Civil Engineering: The State of Hydraulics, Proceedings Barton, A.C.T.* Institution of Engineers, Australia, 373-380.
21. Dorigo, M. (1992). "Optimization, learning and natural algorithms." Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano: Milan, Italy.
22. Zecchin, A. C., Simpson, A. R., Maier, H. R., Leonard, M., and Nixon, J. B. (2007) "Ant colony optimization applied to water distribution system design: Comparative study of five algorithms." *J. of Water Resources Planning and Management*, 133(1), 87-92.
23. Afshar, M. H. (2007). "Application of ant algorithm to pipe network optimization." *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, Engineering*, 31(5), 487-500.
24. Maghrebi, M. F., Hasanzadeh, Y., and Yazdani, S. (2011). "Calibration of water supply systems based on ant colony optimization." *J. of Water and Wastewater*, 85, 101-111. (In Persian)
25. Walski, T. M., Brill, E. D., Gessler, J., Goulter, I. C., Jeppson, R. M., Lansey, K., Lee, H. L., Liebman, J. C., Mays, L., Morgan, D. R., and Ormsbee, L. (1987). "Battle of networks models: Epilogue." *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 113(2), 191-203.
26. Behzadian, K., Kapelan, Z., Savic, D., and Ardeshtir, A. (2009). "Stochastic sampling design using a multi-objective genetic algorithm and adaptive neural networks." *Environmental Modelling and Software*, 24, 530-541.
27. Kapelan, Z. S., Savic, D. A., and Walters, G. A. (2005). "Optimal sampling design methodologies for water distribution model calibration." *J. of Hydraulic Engineering*, 131(3), 190-200.
28. Fazel, B., and Maghrebi, M. F. (2009). "Detecting leaks in urban water supply networks with field measurements of pressure node (case study golbahar city)." *8th Iranian Hydraulic Conference*, Tehran University. (In Persian)
29. Nasirian, A., Maghrebi, M. F., and Arshadi, M. J. (2011). "Laboratorial evaluation of water loss in PPRC pipes in small diameter." *10th Iranian Hydraulic Conference*, Rasht, Iran. (In Persian)