



مهندسين مساوا طرح و تجسيمات آب و فاضلاب

# مجله آب و فاضلاب

علمی - پژوهشی

سال ۲۵، شماره ۲ - ۱۳۹۳

۹۰

- تأثیر عوامل محیطی در شبیه‌سازی عددی کلیاتم در سیستم‌های رودخانه‌ای
- طراحی بهینه شبکه‌های جمع آوری فاضلاب تلفی با روش انرژماتیک مولوی اینفاف بدیر
- توزیع سرعت و برآورد دبی در کالال‌های فاضلاب براساس مفهوم آبرویی شانون
- ارزیابی عملکرد مدل‌های بهینه‌سازی در کالبراسون و نسبت‌یابی شبکه‌های توزیع آب با استفاده از مدل آزمایشگاهی
- حل ماتفاقات در مدیریت تصمیص منابع آب با استفاده از نظریه بازی، مطالعه موردنی؛ خوبه آبریز رودخانه ارومیه
- تصمیم فاضلاب مستقری به سهیله بیوراکنور هوایی-بیهوایی حاوی لجن گرانوله برای حذف مواد مذکوی
- حذف مرب می از محلوپهای آئی توسط تابور ذرات آهن صفر ظرفیت اصلاح شده
- بررسی تأثیر اکسید خواهی نیتروزی و جلیکی در ارزیابی کیفیت پساب غروی از لاغون‌های با هواهه
- بررسی کارایی تابور ذرات آهن صفر (nZVI) در حذف سفاکنین از پساب دارویی
- بررسی تأثیر گیاهان آبری در کاهش قصر و هدایت الکتریکی پساب شبهی
- کارایی تابور اکسید پیتیوم تبیث شده بر روی پستر بدنس در حذف ریگوای AB113
- بررسی میزان تری هالومتانها در آب شرب شهر بند عباس و امکانات صحیح حذف آن توسط امواج مغناوق صوت
- انتخاب پهلوی گرهی برای تصفیه فاضلاب پژوهشگاه صفت نفت بر تکیه بر فرایند تحلیل سلله مراثی و نرم‌افزار اکسپرت چویس
- تصمیم شهراهه زیله کارخانه کمپریست با فرایند اکسیداسیون مرطوب - جذب کاتالیستی شبیه‌سازی تراز سطح آب و دمای مخزن سد سید روز

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

علی فصیریان<sup>۱</sup> محمود فغفور مغربی<sup>۲</sup>

(دریافت ۹۱/۳/۲۰ پذیرش ۹۲/۳/۳۰)

## چکیده

در این مقاله دقت نشت‌یابی مبتنی بر کالیبراسیون بهروش 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 گرههای 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 به عنوان تنها شاخص، اطمینان از صحبت نتایج بدست آمده ایجاد کنند، لذا دو روش برای ارزیابی صحبت نتایج نشت‌یابی با استفاده از سایر جوابهای بدست آمده در طی کالیبراسیون که دارای برآزندگی‌های 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. Nasirian<sup>1</sup>

M. Faghfour Maghrebi<sup>2</sup>

(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 دکترای عمران- آن، دانشگاه فردوسی مشهد  
۲- استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد (تویسته)  
maghrebi@um.ac.ir (۰۵۱۱) ۶۶۰۰۰۲۱

## ۱- مقدمه

به دست آمده از مدل‌سازی شبکه آغاز می‌شود، عموماً 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 می‌گیرد [۱۲].

در فرایند کالیبراسیون، به تعداد گره‌های شبکه مصرف (با فرض اختصاص مصارف به گره‌ها) و به تعداد لوله‌های شبکه، زیری نامشخص وجود دارد، از نظر ریاضی برای اینکه یک دستگاه معادلات با این تعداد مجھول دارای جواب یک باشد، نیاز به تعداد معادلاتی برابر تعداد مجھولات دارد لذا تعدادی اندازه‌گیری‌های اضافی برای معین شدن شبکه مورد نیاز خواهد بود [۱۳]. در اکثر تحقیقات پیشین، از یک طرف با گروه‌بندی لوله‌ها و گره‌ها ز تعداد مجھولات کاسته شده و از طرفی با برداشت داده‌ها در دوره زمانی توسعه یافته<sup>۱</sup> و یا تحت بارگذاری‌های مختلف، تعداد معادلات افزایش داده شده تا دستگاه معادلات معین یا دستگاه معادلاتی با درجهات آزادی کمتر ایجاد شود [۱۴، ۱۵ و ۱۶]. در بسیاری از تحقیقات پیشین که اطلاعات را در زمان‌های مختلف یا بارگذاری‌های مختلف انجام داده‌اند، با توجه به اینکه مقدار نشت با فشار و مقدار مصرف با زمان متغیر است، از روش‌های تحلیل مرتبط با فشار استفاده شده است [۱۷].

در این تحقیق، مصرف برای هر گره، تنها یکبار کالیبره می‌شود، لذا مقدار نشت به عنوان پارامتر مجھول در نظر گرفته می‌شود. در مقاله حاضر نشت یابی بدون استفاده از گروه‌بندی گره‌ها برای کاهش مجھولات و یا استفاده از بارگذاری‌های 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 گره‌های تنظیمی نیز برای این زمان به دست آمد.

والسکی و همکاران بررسی‌هایی را بر روی یک مدل آزمایشگاهی برای بررسی کالیبراسیون شبکه به انجام رساندند [۱۸]. همچنین کواس و راموس و یوفسکی و همکاران، بررسی‌های آزمایندگار انجام دادند [۱۹ و ۲۰]. تاکنون هیچ کار آزمایشگاهی برای بررسی نشت یابی بر اساس کالیبراسیون شبکه در حالت ماندگار انجام نشده است ولذا بررسی این روش به صورت آزمایشگاهی از نقاط قوت تحقیق حاضر است.

پرکاربردترین روش‌های بینه‌یابی در کالیبراسیون شبکه، روش‌های فراکاوشی<sup>۲</sup> و در بین آنها روش الگوریتم

تمام آب ورودی به شبکه‌های توزیع آب مصرف نمی‌شود و بخش قابل توجهی از آن از طریق نشت یا آب به حساب نیامده<sup>۳</sup> به هدر رفته و هزینه سنگینی را به شرکت‌های آب و فاضلاب تحمیل می‌کند [۱]. نشت از شبکه‌ها در اثر عواملی چون کیفیت پایین مواد مصرفی لوله‌ها و سایر اجزای شبکه، خطاهای طراحی، نگهداری نامناسب، فشار بالا در شبکه و عوامل تصادفی اتفاق می‌افتد [۲]. زوال لوله‌ها که مهم‌ترین عامل در بروز نشت است، متأثر از عواملی چون سن، قطر، جنس، پایداری و شرایط آب و خاک، شرایط اجرا و بهره‌برداری است [۳]. برخی روش‌ها نظر مدیریت هوشمند فشار، از جمله روش‌های مؤثر در کاهش نشت از شبکه‌های توزیع آب شهری می‌باشند [۴]. همچنین روش‌هایی چون ابزارهای صوتی<sup>۴</sup>، موازنۀ جرم<sup>۵</sup>، عکسبرداری هوایی بر مبنای پایش حرارتی<sup>۶</sup>، گازهای رسام<sup>۷</sup> از دیگر روش‌هایی هستند که به گستردگی توسط متخصصان صنعت آب برای کاهش نشت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵]. گرچه این روش‌ها در برخی شرایط دارای دقت مناسب هستند ولی استفاده از آنها پرهزینه و زمانی بوده و در برخی موارد دارای اثر یخشی لازم نیز نیستند [۵]. به عنوان مثال ابزارهای صوتی که در میان روش‌های فوق رایج‌تر است، برای لوله‌های پلاستیکی دارای خطای زیادی است [۶]. برای رفع این مشکل اخیراً روش‌هایی که نشت را در سرتاسر شبکه، بر اساس مدل‌سازی و کالیبراسیون شبکه جستجو می‌کنند، مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. این روش‌ها بر اساس مدل‌سازی و تحلیل شبکه در حالت جریان غیرماندگار<sup>۸</sup> و یا در حالت ماندگار<sup>۹</sup> عمل می‌کنند [۷ و ۸].

پودار و لیگت اولین کسانی بودند که از روش پایدار معکوس برای شناسایی نشت در شبکه لوله‌ها استفاده کردند [۹]. در این روش، نخست در یک فرایند کالیبراسیون شبکه، مقادیر مصرف واقعی گره‌ای شامل مصارف اندازه‌گیری شده توسط کنترل‌های مشترکان و آب به حساب نیامده تخمین زده می‌شود، سپس با مقایسه این مقدار با مقدار اندازه‌گیری شده توسط کنترل‌های مشترکان پس از اعمال ضرایب ساعتی و روزانه، مقدار آب به حساب نیامده تخمین زده می‌شود [۱۰]. اساس این روش مدل‌سازی و کالیبراسیون شبکه توزیع است. کالیبراسیون با برداشت میدانی برخی اطلاعات از شبکه واقعی و مقایسه با اطلاعات

<sup>1</sup> Non-revenue water

<sup>2</sup> Acoustic equipment

<sup>3</sup> Mass balance technique

<sup>4</sup> Thermography

<sup>5</sup> Tracer gas

<sup>6</sup> Transient analysis

<sup>7</sup> Steady state

<sup>8</sup> Extended Period Simulation (EPS)

<sup>9</sup> Heuristic

که در این در روابط X نشان دهنده 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 برآورده شده به موسیله آن محاسبه می‌شود؛  $Hobs$  فشار اندازه‌گیری شده در گره  $j$  و  $Hsim$  فشار شبیه‌سازی شده در گره  $j$   $N$  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. به صورت 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. به عنوان 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 الگام گرفتن از زندگی مورچه‌های واقعی، در سال ۱۹۹۲ توسط دوریگو پیشنهاد شد [۲۱]. به طور طبیعی، مورچه‌ها در مسیر حرکت خود از یک منبع غذایی تا لانه، ماده‌ای به نام فرومون<sup>۱</sup> ترشح می‌کنند. هر مورچه برای رسیدن به غذا مسیری را به صورت 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 تبخر تدریجی فرومون، پس از اندک زمانی کوتاه‌ترین مسیر توسط مورچه‌ها شناسایی می‌شود. تنظیم پارامترها برروش کلونی مورچه‌ها در یک فضای گسته صورت می‌گیرد. به عنوان مثال در مسئلله حاضر، فضای بین  $\underline{L}$  و  $\bar{L}$  به  $A$ <sup>۲</sup> بازه تقسیم می‌شود. در هر گره، هر کدام از  $i$ ‌ها با مقدار دبی پایه جمع می‌شود تا یک گزینه برای مجموع مصرف پایه، نشت در آن گره تعیین شود. برای تعیین مقدار مصرف پایه، نخست متوجه دبی مصرفی در هر گره با اختصاص مصارف ثبت شده، توسط کنترلهای مشترکان به آن گره بددست 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،

<sup>5</sup> Fitness  
<sup>6</sup> Pheromone

زنگیک<sup>۳</sup> است [۱۸، ۱۷]. روش کلونی مورچه‌ها<sup>۴</sup> از دیگر روش‌های فرا اکتشافی 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 به عنوان پارامتر تنظیمی در نظر گرفته شد. برای این کار، برنامه بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها در محیط نرم افزار متلب<sup>۵</sup> نوشته شد و با ارتباط پویا بین این برنامه و نرم افزار ایپنت<sup>۶</sup>، تحلیل شبکه در این محیط به انجام رسید. تفاوت بین مقدار دبی پایه و دبی تنظیمی به عنوان نشت در نظر گرفته شد. مقدار مشاهداتی برای شبکه فرضی بر اساس تحلیل شبکه با وجود نشت‌های مفروض به دست آمد و این مقدار 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:

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

$$(2) \text{ با کمینه سازی: } |10|.$$

$$f(x) = \min \sum_{j=1}^N (Hobs_j - Hsim_j)^2 \quad (3) \text{ با قید: } L \leq L_i \leq \bar{L}$$

<sup>1</sup> Genetic Algorithm (GA)

<sup>2</sup> Ants Colony

<sup>3</sup> MATLAB

<sup>4</sup> EPANET

هنگام سازی فرومون است.  $\rho$  نیز نرخ تبخیر<sup>۲</sup> 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 بدست آید، در هر گره، فقط مقدار فرومون مربوط به یک مصرف گره‌ای افزایش می‌یابد یعنی در آن مصرف گره‌ای که به جواب بهینه تریدیکتر است، مقدار  $\Delta\tau$  به فرومون آن افزوده می‌شود و احتمال انتخاب آن در تکرارهای بعدی افزایش می‌یابد. در حالی که برای دیگر مصارف گره‌ای،  $\Delta\tau$  برابر با صفر است. لازم به ذکر 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 برآزندگی برای مسئله مورد نظر انتخاب می‌شوند. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته در کار حاضر، تغییر در مقدار راهنمای کاووشی، 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  $\alpha$  و  $\beta$  در ابتداء مقدار  $1/5$  در نظر گرفته شد. سپس گستره تغییرات این کمیت بین  $1/5$  تا  $2$  با فواصل  $1/10$  تغییر داده شد و مقدار  $1$  برای هر دو پارامتر به عنوان مقدار بهینه بدست آمد. مقدار تبخیر به ازای مقادیر مختلف از  $1$  به صورت کاهنده تا  $1/9$  با فواصل  $1/10$  مورد بررسی قرار گرفت و مقدار  $1/9$  به عنوان مقدار بهینه برای تمامی تحلیل‌ها انتخاب شد. مقدار  $\Delta\tau$  اولیه  $1/10$  در نظر گرفته شد و به صورت افزایشی تا  $1/2$  با فواصل  $1/10$  مورد بررسی قرار گرفت و نهایتاً مقدار  $1/10$  به عنوان مقدار بهینه انتخاب شد. در این رابطه می‌توان به کار آرائه 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 اینیتون<sup>۳</sup> 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 بهمین منظور در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه فردوسی مشهد

برنامه، مجموع مقدار مصرف گره و نشت را کالایبره می‌کند و در انتهای برنامه بعد از کالایبره کردن این پارامتر، پس از کسر مقدار مصرف پایه، مقدار نشت 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 نشت و مصرف در یک گره است. احتمال انتخاب مقادیر مختلف به عنوان مصرف یک گره، مساوی نیست. مهم‌ترین رابطه در این روش که احتمال انتخاب را به فرومون و راهنمای کاووشی<sup>۱</sup> ارتباط می‌دهد، به صورت زیر است

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

که در آن

$p_{ij}(t)$  احتمال آنکه مصرف گره‌ای  $i$  برای گره  $j$  در تکرار  $t$  انتخاب شود،  $(t)$   $\tau_{ij}$  مقدار فرومون برای مصرف گره‌ای  $i$  در گره  $j$  در تکرار  $t$  می‌باشد که بعد از هر تکرار بهنگام می‌شود. همچنین  $\eta_{ij}$  مقدار مطلوبیت (راهنمای کاووشی) برای مصرف گره‌ای  $i$  و گره  $j$  را نشان می‌دهد که مقداری ثابت است. در این تحقیق با این فرض که تعداد نشتهای همزمان در شبکه محدود است و اکثر گره‌ها دارای نشت نیستند، از مطلوبیت برای افزایش احتمال انتخاب مصارف پایه در هر گره (برداشت شده از کنترلرهای مشترکین) استفاده می‌شود.  $\alpha$  و  $\beta$  نیز برای کنترل ارزش نسبی شدت فرومون و مطلوبیت در هر انتخاب می‌باشند.

برای هر مورچه یا به عبارتی برای مجموعه مقادیر انتخابی به عنوان مصارف اضافی، یک تحلیل در نرم افزار اینپنت انجام می‌شود. بر اساس فشارهای بدست آمده و استفاده از رابطه  $2$ . برآزندگی هر مورچه محاسبه می‌شود. در صورتی که برآزندگی حاصل، بهترین برآزندگی تا آن تکرار باشد. احتمال انتخاب مصارف گره‌ای انتخابی در آن تحلیل، افزایش یافته و احتمال انتخاب بقیه مقادیر کاهش می‌یابد. این فرایند به وسیله 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

<sup>2</sup> Evaporation Rate  
<sup>3</sup> Anytown

<sup>1</sup> Heuristic Guidance

شد. حداقل 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 خطأ در اندازه‌گیری‌ها و (۲) وجود ۱/۰ متر خطأ 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 شماره‌گرهای فشارسنجی را نشان داده و "جريان ورودی"، اندازه‌گیری مقدار جريان ورودی به عنوان یک مشاهده اضافی را بیان می‌کند. نشت محاسبه شده، موقعیت و مقدار نشت به دست آمده در فرایند کالیبراسیون با تنظیم فشارهای گرهات جريان ورودی در ستون‌های ۶ و ۷ و برآزندگی 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 خطأ در اندازه‌گیری‌ها و چهار آنالیز بعدی با فرض مقدار خطأ ۱/۰ 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 به عنوان مشاهدات شبکه به برنامه بهینه‌یابی معرفی شده است. با وجود اینکه مقدار برآزندگی 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 مجھول‌ها، چندین پاسخ صحیح برای مسئلله 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

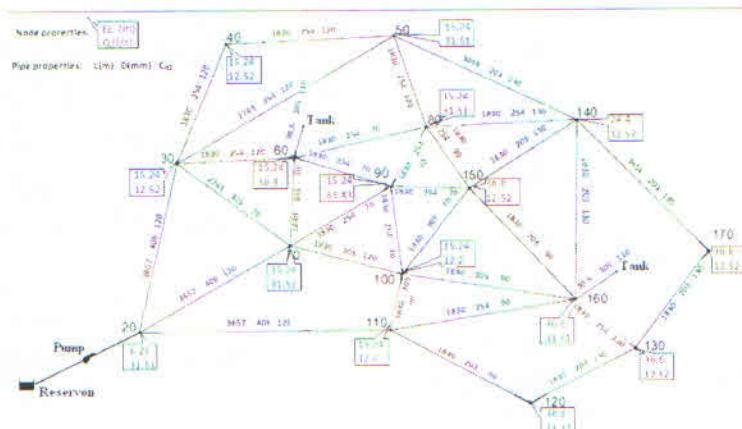
ساخته شد، به انجام رسید. فاضل و فغفور معتبر بررسی‌هایی را بر روی شبکه شهر گلبهار انجام داده‌اند [۲۸]. در تحقیق مذکور، ضرورت ارزیابی روشهای نشت‌یابی در یک شبکه آزمایشگاهی مشخص شده است. در چنین شبکه‌ای تقریباً تمامی خطاهای یک شبکه واقعی وجود دارد، با این تفاوت که محل و مقدار نشت در این شبکه قابل ارزیابی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

### ۱-۳- شبکه انتیون

شبکه انتیون که در شکل ۱ نمایش داده شده است، دارای ۱۶ گره، ۳۴ لوله، ۳ پمپ موازی، ۱ مخزن با ارتفاع ۴/۰ متر و ۲ تانک با ارتفاع ۷۱/۶ متر است. مشخصات گرهات 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 اینپلنت نصب شده و فایل خروجی آن با پسوند inp ذخیره شد. سپس تعداد گرهات شبکه، تعداد فشارسنج مورد نظر و میزان مصارف گرهات 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 گرهات ۴۰، ۹۰، ۱۱۰ و ۱۲۰ است [۲۷، ۲۶، ۱۶]. همچنین تعداد گرهاتی بهینه برای فشارسنجی بر اساس تحقیقات کاپلان و همکاران و بهزادیان و همکاران پیشنهاد شده است [۱۶ و ۲۶]. در طی تحقیقات مختلف، مصارف گرهات در پنج گروه، دسته‌بندی شده و پنج بارگذاری مختلف برای تحلیل مورد استفاده قرار گرفته است و شبکه به صورت معین تحلیل شده است [۲۷ و ۲۶]. بر اساس تحقیقات کاپلان، برای رسیدن به دقت نسبی ۰/۰۶ و ۰/۰۸۵ و با در نظر گرفتن ۰/۱ متر خطأ در اندازه‌گیری‌ها، به ترتیب به فشارسنجی در ۴، ۲ و ۸ گرهات نیاز دارد [۱۶].

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



گذاری این کاهش‌ها الگوی پیچیده‌تری ایجاد می‌کند و نشت‌یابی را دشوار می‌کند. عامل دوم به ماهیت روش کلونی مورچه‌ها مربوط می‌شود، مزیت عمدۀ 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 ولذا کمک این پارامتر، احتمال انتخاب گرینه عدم وجود نشت در گره افزایش داده می‌شود. با افزایش تعداد گره‌های دارای نشت، تأثیر این ضریب کاهش یافته و توانایی این روش برای نشت‌یابی کاهش می‌یابد.

تحلیل شماره پنج، مشابه حالت شماره دو است، با این تفاوت که در اندازه‌گیری فشار،  $1/0$  متر خطأ وجود دارد. در این حالت علی‌رغم اینکه موقعیت نشت به درستی تشخیص داده شده است، ولی مقدار

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 نشت‌یابی 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 واپس 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 تزدیک شدن به گره دارای نشت، افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد گره‌های دارای نشت، برهم

جدول ۱- نشت‌یابی در شبکه انتیون

۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
تکرار	برازندگی		نشت محاسبه شده	خطای اندازه‌گیری	مشاهدات	نشت واقعی	موقعیت	شماره تحلیل
			نشت مقادیر	موقعیت		نشت مقادیر	موقعیت	
۴۳	$2/9 \times 10^{-5}$		۱۰	۲۰		۹۰	۳۰	۷۰
			۱۰	۴۰				۱
			۱۰	۷۰				
۵۲۲	$1/8 \times 10^{-5}$	۳۰	۷۰			۹۰		
						۱۲۰	۳۰	۷۰
								۲
۱۰۷	$0/0075$	۲۰	۱۱۰			۹۰	۳۰	۷۰
						۱۲۰	۲۰	۱۴۰
								۳
۶۱	$3/46 \times 10^{-5}$	۳۰	۷۰			۹۰		
			۲۰	۱۴۰		۱۲۰	۳۰	۷۰
						۱۱۰	۲۰	۱۴۰
								۴
۹۲	$0/0047$	۲۰	۷۰	۰/۱		۹۰		
						۱۲۰	۳۰	۷۰
								۵
۸۷۱	$0/0014$	۲۰	۱۰۰			۹۰		
			۲۰	۱۴۰		۱۲۰	۳۰	۷۰
			۱۰	۱۶۰				۶
						۱۱۰	۲۰	۱۴۰
۹۱۴	$0/00197$	۱۰	۶۰			۹۰		
			۲۰	۷۰		۱۲۰	۳۰	۷۰
			۲۰	۱۴۰				۷
						۱۱۰	۲۰	۱۴۰
۶۹۴	$0/00087$	۱۰	۱۶۰			۹۰		
			۵۰	۷۰		۱۲۰	۶۰	۷۰
			۴۰	۱۴۰				۸
						۱۱۰	۴۰	۱۴۰

### ۲-۳- مدل آزمایشگاهی

مدل مورد استفاده در این مقاله مدل آزمایشگاهی واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد بود که با ابعاد کلی  $3/70 \times 10/30$  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 روپا ز ۱۰۰۰ لیتری و یک مخزن تحت فشار سود می‌برد. لوله‌ها از نوع پلیمری (PPRC) بوده و در شبکه اصلی با قطر داخلی ۱۶ میلی متر و لوله‌های برگشت با قطر داخلی ۱۰ میلی متر می‌باشند. در هر یک از لوله‌های اصلی شبکه، یک شیر قطع و وصل از نوع کروی در نظر گرفته شد. فشار در گرهات مورد نظر توسط فشارسنج‌های الکترونیکی با دقت ۱ درصد و جریان ورودی به شبکه توسط یک کنتور الکترومغناطیسی با دقت  $0/03$  لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری شده و به کمک یک دیتاگر به کامپیوتر منتقل می‌شد. مصارف گرهات به صورت حجمی و با استفاده از یک مخزن روپا ز مدرج اندازه‌گیری می‌شد. شکل ۲ نمای کلی از شبکه، سنورهای فشارسنجی و نمونه‌ای از برداشت‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

### ۳-۳- کالیبراسیون شبکه بدون نشت

پس از اندازه‌گیری ابعاد دقیق شبکه، تراز گرهات، استخراج مشخصات پمپ مدل شبکه در برنامه اینپنت 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 دارسی-وایسباخ<sup>۱</sup> و هیزن-ویلیامز<sup>۲</sup> مقایسه‌ای را به انجام رساندند [۲۹]. ضریب هیزن ویلیامز<sup>۳</sup> بر اساس این بررسی‌ها معادل  $150$  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].

### ۴-۳- 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  $9$  تا میزان معینی باز شد و دبی  $5/1$   $262/0$  اندازه‌گیری شد. فشارسنجی در گرهات  $17$  و  $24$  انجام شد

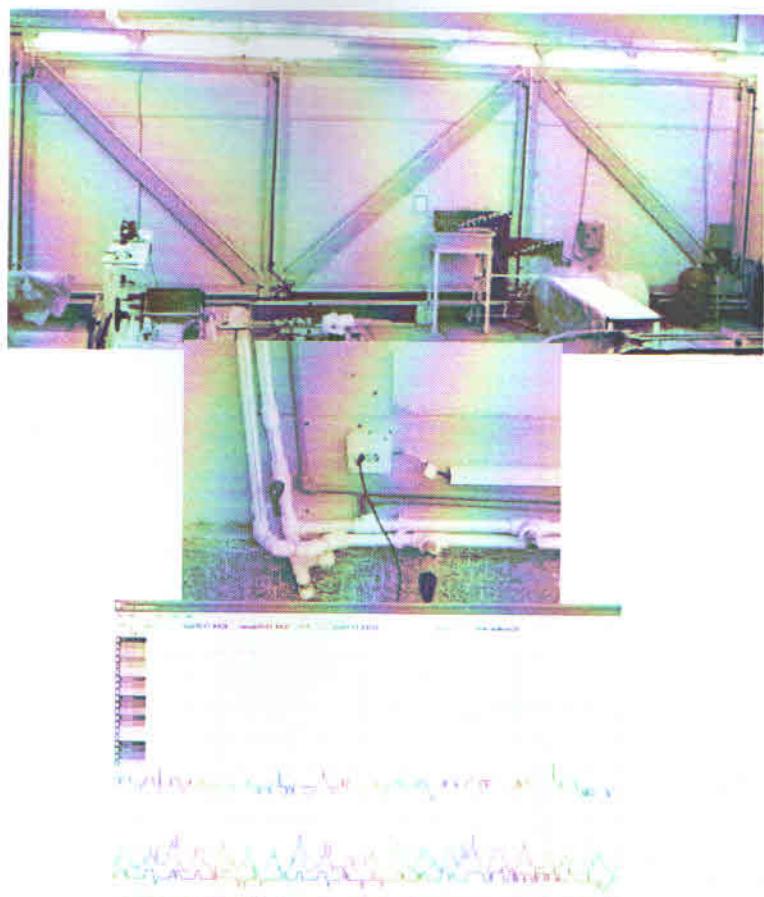
نشت دارای خطاست. حالت تحلیل شش نیز مشابه حالت چهار است ولی علی‌رغم برآزندگی بسیار ناچیز، نتایج برای گره  $140$  درست و برای گره  $70$  نادرست به دست آمد. این مسئله نشان می‌دهد که وجود خطاط در اندازه‌گیری‌ها که امری اجتناب‌ناپذیر است، تأثیر بسیار زیادی بر روی نتایج خواهد داشت. در حالت هفت با افزایش تعداد مشاهدات، نتایج به دست آمده دارای دقت نسبی خوبی می‌باشند. آخرین تحلیل با  $2$  برابر شدن مقدار نشت انجام شده و نشان می‌دهد با افزایش مقدار نشت و در نتیجه افزایش افت فشار در گرهات مشاهداتی، اثر خطاط اندازه‌گیری کاهش یافته و نتایج بهتری به دست می‌آید.

بر اساس نتایج به دست آمده، از تحلیل شبکه اینیتون می‌توان نتیجه‌گیری نمود:  $(1)$  مقدار و موقعیت نشت با استفاده از کالیبراسیون شبکه در حالت پایدار دائمی قابل استخراج است:  $(2)$  در اکثر تحلیل‌های انجام شده، پاسخ بهینه با تکرارهای محدودی به دست آمد. در مسئله حاضر با توجه به وجود  $11$  گرهی انتخابی برای هر گره، فضای جستجو شامل  $16^3$  مورد می‌باشد که با کمتر از  $1000$  تکرار، جوابهای بسیار خوبی شناسایی شده که قابلیت‌های قابل توجه روش کلوونی مورچه‌ها را نشان می‌دهد:  $(3)$  نشت یابی با افزایش مقدار نشت و افزایش تعداد مشاهدات بهبود یافته و با افزایش تعداد نشت و خطاط اندازه‌گیری، دشوار می‌شود:  $(4)$  رسیدن به یک برآزندگی خوب نمی‌تواند تضمین کننده 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:  $(5)$  بر اساس مطالعات قبلی که بر روی این شبکه انجام شده است، وقتی مصارف گرهات در پنج گروه، دسته‌بندی شوند و پنج بارگذاری مختلف مورد استفاده، قرار گیرد و فشار سنجی در  $8$  گره انجام شود، دقت نسبی کالیبراسیون  $40$  کمتر از  $85/0$  خواهد بود  $[26, 16, 22]$ . به عبارتی  $0/85$  اندازه‌گیری فشار برای تنظیم تنها  $5$  پارامتر و آن هم با دقت  $0/85$  لازم است. بر این اساس، استفاده از انجام شده در مقاله نشت یابی غیرممکن به نظر می‌رسید. تحلیلهای انجام شده در حاضر نشان داد که تنها با پنج فشارسنجی با خطاطی  $1/0$  متر و  $1$  دبی سنجی،  $16$  مجهول مصرف گرهات تنظیم شد و دو نشت همزمان با دقت قابل قبولی شناسایی شد. بدینهی است با افزایش تعداد بارگذاری‌های شبکه و گروه‌بندی مصارف، نتایج بهتری قابل دستیابی خواهد بود.

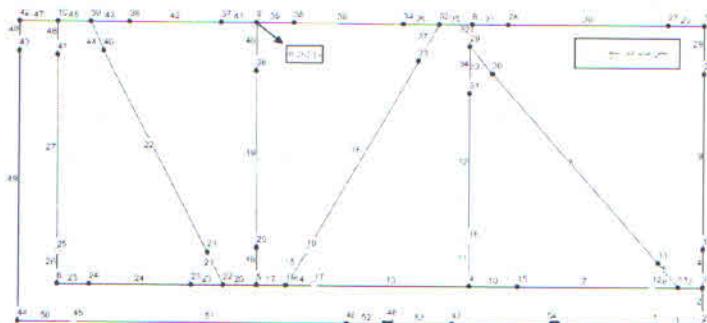
<sup>1</sup> Darcy-Weisbach Equation

<sup>2</sup> Hazen-Williams Equation

<sup>3</sup> Hazen-Williams coefficient



شکل ۲- سیستم آزمایشگاهی اجرا شده



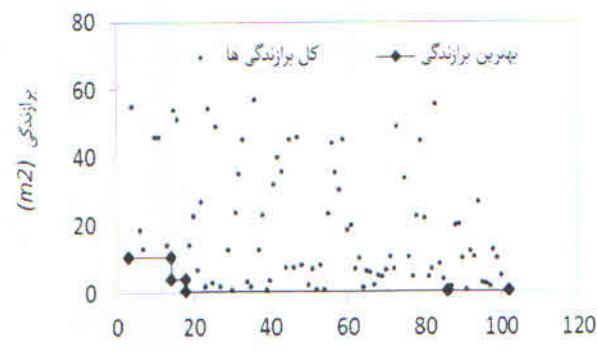
شکل ۳- مدل شبیه‌سازی آزمایشگاهی در نرم افزار ایپارت

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

و فشارهای ثبت شده به برنامه بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها معرفی شدند. در برنامه بهینه‌سازی، مقادیر انتخابی به عنوان نشت در بازه  $(0.5/5, 0)$  با فواصل  $0.5/5$  تنظیم شدند. حداقل تکرار  $1000$  و میزان مطلوبیت  $30$  در نظر گرفته شد. جدول ۲ فشارهای محاسباتی (شبیه‌سازی شده) و مشاهداتی را در نقاط فشار سنجی نشان می‌دهد. بهترین جواب در تکرار  $102$  به دست آمد و نتایج وجود نشتی به میزان  $0.25/5$  را در گره  $9$  و

جدول ۲- نتایج برنامه‌ی نشت یابی برای نشت در گره‌ای

شماره گره	فشار مشاهداتی (m)	ناتایج کلونی مورچه‌ها	مصرف گره‌ای (l/s)	فشار شبیه‌سازی شده (m)
۱۷	۲۹/۶۰	.	۲۹/۹۵	۰/۵۲۶
۲۴	۲۸/۴۲	.	۲۸/۷۲	۰/۴۵



نعداد تکرار

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

بهترین جواب در تکرار ۱۹۵ به دست آمد و نتایج وجود نشته به میزان ۱/۰ 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.

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

شماره گره	فشار مشاهداتی (m)	مصرف گره‌ای (l/s)	ناتایج کلونی مورچه‌ها	فشار شبیه سازی شده (m)	برازندگی در هر گره (m²)
۵	-	۰/۱	۲۴/۴۵	۰/۵۲۰	-
۶	-	۰/۳	۲۱/۵۱	۰/۱۰۹	-
۱۷	۲۵/۳۵	-	۲۵/۸۷	۰/۲۷۰	۰/۲۰۲
۲۴	۲۲/۶۵	-	۲۲/۹۸	۰/۱۰۹	۰/۵۸۲
۲۷	۲۲/۹۶	-	۲۴/۴۱	۰/۲۰۲	۰/۵۸۲
برازندگی کل (m²)					

جدول ۴- نتایج برنامه‌ی نشت یابی برای نشت در گره‌های ۶ و ۸

پارامتر	شماره گره	اندازه‌گیری شده	نتایج اینست	بهینه یابی با سه فشارسنج	بهینه یابی با پنج فشارسنج
نشت (l/s)	۸	۰/۳۷	۰/۳۷	۰/۲۵	.
	۶	۰/۵۲۶	۰/۵۲۶	۰/۵۵	۰/۴
	۹	.	.	۰/۱	۰/۴۵
	۷	.	.	.	۰/۰۵
فشار (m)	۲۰	۳۴/۹	۳۵/۵۴	۳۵/۱۹	۳۴/۸۲
	۲۲	۳۲/۴	۳۲/۸۴	۲۲/۶۳	۳۲/۵۱
	۲۵	۳۴/۴	۳۴/۹۳	۲۴/۵۲	۳۴/۴
	۱۴	۳۷/۸	۳۷/۵۴	۳۷/۴۵	-
	۴۵	۳۶/۱	۳۵/۹۲	۳۵/۵۴	-
برازندگی	-	-	۰/۹۸	۰/۰۱۸۵	۰/۰۸۷

شناسایی شده در حالی که نشت در گره ۹ در چهار مورد و در گره ۸ در سه مورد شناسایی شده است. این بررسی برای جدول ۶ نشان می‌دهد که در میان ده جواب برتر، هشت مرتبه نشت در گره ۶ و پنج مرتبه در گره ۸ شناسایی شده است. بر این اساس، تعداد پیدا شدن نشت نیز رابطه مستقیمی با مقدار نشت و کیفیت نشت یابی دارد. لذا این روش نیز می‌تواند به عنوان راهنمای خوبی برای اعتبارسنجی نشت یابی مورد استفاده قرار گیرد. بر اساس هر دو تحلیل، احتمال وقوع نشت در گره ۶، بالاتر از سایر گره‌های شبکه است و با توجه به این واقعیت که نشت در این گره دارای مقدار بیشتری است، این تحلیل قابل قبول است.

بر اساس تحلیلهای صورت گرفته بر روی شبکه آزمایشگاهی، ضمن تأیید کلیه نتیجه‌گیری‌های انجام شده بر روی شبکه فرضی، می‌توان موارد زیر را نیز نتیجه‌گیری کرد: ۱) نشت یابی با استفاده از کالیبراسیون فشارهای گرهی در حالت پایدار دائمی بر روی شبکه آزمایشگاهی و با وجود خطاهای ناشی از اندازه‌گیری و مدل‌سازی با موفقیت آزمایش شد؛ ۲) دو راهکار برای اعتبارسنجی نتایج با موفقیت آزمایش شد که می‌توان به کمک آنها صحت نتایج به دست آمده از نشت یابی را مورد ارزیابی قرار داد.

برای بررسی‌های بیشتر، ۱۰ جوابی که در فرایند کالیبراسیون دارای کمترین برازندگی بودند، برای سه و پنج فشارسنج در جدولهای ۵ و ۶ ارائه شده‌اند. در جدول ۵ مشاهده می‌شود که در بهترین جواب که با برازندگی ۰/۰۱۹ به دست آمده، نشت در گره‌های ۹ و ۶ شناسایی شده است. در جوابی که دارای برازندگی ۰/۰۳ است، این نشت در گره‌های ۱۰، ۹، ۵ و ۶ و در جواب بعدی که با برازندگی ۰/۰۹۸ بوده، در گره‌های ۱۰ و ۹ مشاهده می‌شود. همانگونه که مشاهده می‌شود، علی‌رغم اینکه تمامی این جوابها دارای برازندگی‌های بسیار خوبی هستند، ولی نتایج آنها نسبت به یکدیگر متفاوت است. با بررسی نتایج جدول ۶ با همین رویکرد، مشاهده می‌شود که در بهترین جوابها که به ترتیب دارای برازندگی‌های ۰/۰۵۹، ۰/۰۶۱ و ۰/۰۶۱ هستند، نشت در گره‌های ۶ و ۸ شناسایی شده است. این بررسی نشان می‌دهد که بررسی چندین پاسخ خوب به دست آمده در کالیبراسیون، راهنمای خوبی برای اعتماد یا عدم اعتماد به نتایج نشت یابی است.

در بررسی دیگری، تکرار شناسایی نشت در یک گره خاص در جوابهای مختلف مد نظر قرار گرفت. مثلاً در جدول ۵ مشاهده می‌شود که از بین ده جواب ارائه شده، در پنج مورد، نشت در گره ۶

جدول ۵- ده پاسخ با برازندگی کمتر برای نشت یابی با سه فشارسنج

برازندگی	شماره گره	۰/۰۱۹	۰/۰۳۰	۰/۰۹۸	۰/۰۹۹	۰/۱۷۴	۰/۴۳۲	۰/۵۴۱	۱/۱۷۵	۱/۵۳۳	۱/۸۵۷
۱۰	۰	۰/۱	۰	۰/۳۵	۰/۳	.	.	.	۰/۴	.	.
۹	۰/۴۵	۰/۱۵	۰/۵۵	۰/۶	.	۰/۱۵	۰/۵۵	۰/۶	.	۰	.
۸	۰	۰	۰	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۴	۰/۱۵	۰/۰۷
۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۷
۵	۰	۰	۰/۲	۰/۴	۰/۱	۰/۱	۰/۴	۰/۵	۰/۵	۰/۴	۰/۴
۶	۰	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۱

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

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

## ۴-نتیجه‌گیری

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 برآزندگی 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 بدکمک آنها، صحت نتایج به دست آمده را مورد ارزیابی قرار داد. همین‌بین 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 به طور 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 بدست 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 موقیت 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 ۱۰ متر و یک دبی‌سنجی، ۱۶ مجھول مصرف گره‌ای تنظیم شد و دو نشت همزمان با دقت قابل قبولی شناسایی شد. بدین‌بهی است با افزایش تعداد بارگذاری‌های شبکه و گروه‌بندی 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

- 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)
- 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.
- 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)
- 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 8<sup>th</sup> 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. Boulous, 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." *8<sup>th</sup> 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." *6<sup>th</sup> 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 Ardeshir, 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)." *8<sup>th</sup> 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." *10<sup>th</sup> Iranian Hydraulic Conference*, Rasht, Iran. (In Persian)