

یافتن موقعیت و تعیین مقدار دو نشت همزمان در شبکه های آبرسانی با استفاده از الگوریتم دومرحله ای

رضا معاشری^۱، محمدرضا جلیلی قاضی زاده^{۱*}

^۱ دانشجوی دکترای مهندسی محیط زیست - آب و فاضلاب، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
^۲ دانشیار، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

خلاصه: نشت در شبکه های آبرسانی به علت مشکلاتی مانند هدررفت آب، احتمال ورود آلاینده ها و نشست زمین با اهمیت می باشد. از آنجایی که روش های رایج نشت یابی معمولاً پرهزینه و وقت گیر هستند، استفاده از روش های شبیه سازی هیدرولیکی شبکه به منظور تعیین محل و مقدار نشت، مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله یک روش جدید برای تعیین مقدار و محل نشت ها در شبکه های آبرسانی معرفی شده است که در آن از یک الگوریتم دومرحله ای استفاده می شود. مرحله ی اول (الگوریتم پله ای) برای تعیین محل و مرحله ی دوم (الگوریتم کرم شب تاب) برای تعیین مقدار نشت ها می باشد که در حالت دو نشت همزمان نیز قابل استفاده است. روش پیشنهادی بر اساس مقایسه ی نتایج حاصل از شبیه سازی هیدرولیکی شبکه و مقادیر داده های برداشت میدانی از شبکه (فشارسنجی یا دبی سنجی) می باشد. این روش در یک شبکه ی حلقوی ۳۰ گره ای، برای ۶ مثال مختلف اجرا شد. نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی قادر به شناسایی محل یک نشت یا دو نشت همزمان بوده و مقدار نشت متناظر با آن ها را نیز با خطای کمتر از ۸ درصد بدست می آورد. هم چنین این روش حساسیتی نسبت به محل وقوع نشت ها نداشته و قادر به شناسایی مقادیر بسیار کم نشت (زیر ۰/۳ درصد دبی ورودی به شبکه) می باشد. روش پیشنهادی توسعه داده شده در این مقاله، می تواند توسط بهره برداران شبکه های آبرسانی برای یافتن محل و مقدار نشت های گزارش نشده، مورد استفاده قرار گیرد.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۸-۱۹
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۹-۰۸
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۹-۱۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۹-۲۶

کلمات کلیدی:

الگوریتم دو مرحله ای
الگوریتم کرم شب تاب
شبکه های آبرسانی
نشت یابی
واسنجی

۱- مقدمه

در بعضی کشورها گزارش شده است [۱]. برخی اوقات نشت بیشتر از ۷۰ درصد سهم کل تلفات را تشکیل داده است [۲]. کاهش آب بدون درآمد باعث کاهش هزینه های سرمایه گذاری برای ساخت تاسیسات منابع آب جدید، بالابردن عمر تاسیسات آب، کاهش هزینه های بهره برداری و نگهداری، کاهش امکان ورود آلودگی از محل های نشت لوله، افزایش بازده و بالابردن درآمدهای شرکت های آب و فاضلاب و جلب رضایت مشترکین خواهد شد [۳]. روش های نشت یابی را می توان به روش های فیزیکی و شبیه سازی - میدانی تقسیم کرد. روش هایی چون ابزارهای صوتی، موازنه جرم، عکس برداری هوایی بر مبنای پایش حرارتی، گازهای رسام توسط متصدیان صنعت آب از جمله روش های فیزیکی نشت یابی محسوب می شوند [۴]. از جمله روش های شبیه سازی - میدانی نشت یابی نشت یابی، انجام فرآیند کالیبراسیون شبکه به منظور تعیین محل نشت با استفاده

با توجه به محدودیت منابع آبی در کشور لزوم کنترل هدررفت و نشت آب از شبکه های توزیع با اهمیت می باشد. یکی از شاخص های بررسی عملکرد شبکه های توزیع آب، شاخص آب بدون درآمد^۱ است. آب بدون درآمد به سه بخش اصلی تلفات واقعی^۲، تلفات ظاهری^۳ و مصارف مجاز بدون درآمد تقسیم می شود. تلفات واقعی شامل تلفات از مخازن ذخیره ی آب و نشت از خط انتقال، شبکه ی توزیع و انشعابات می باشد که بخش مهمی از آن نشت از شبکه ی توزیع است. مقدار نشت در شبکه های آبرسانی در کشورهای مختلف، متفاوت بوده و از میزان ۳-۷ درصد در کشورهایی مانند هلند تا ۵۰ درصد

- 1 Non-revenue water
- 2 Real Loss
- 3 Apparent Loss

* نویسنده عهده دار مکاتبات: m_Jalili@sbu.ac.ir

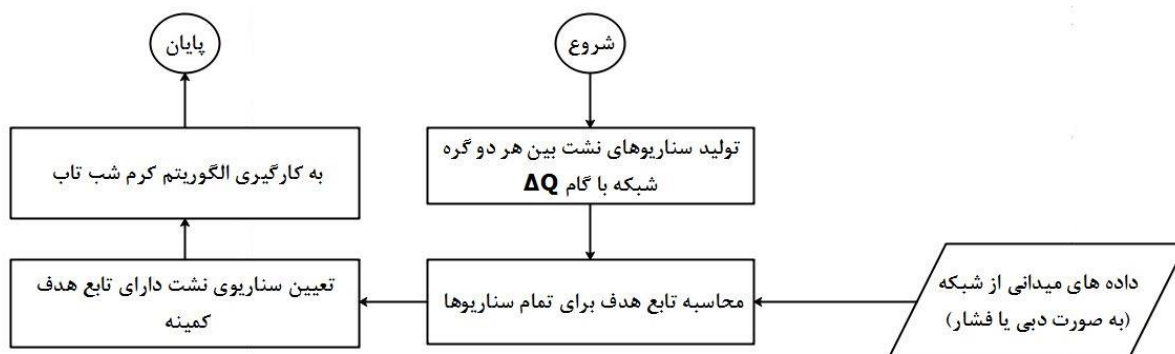


جریان گذرا با استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور کالیبراسیون و تشخیص نشت توسعه داده شد و سپس برای ارزیابی این مدل، یک مدل آزمایشگاهی برای برداشت داده های مورد نیاز نشت های شبیه سازی شده ساخته شد و مجموعه ای از داده های نشت در دو مکان و با اندازه های مختلف برای ارزیابی روش حل معکوس مورد استفاده قرار گرفت [۱۰]. عطاری و همکاران (۲۰۱۵)، عمل تعیین موقعیت و مقدار نشت در شبکه های آبرسانی را با استفاده از ترکیب فشارسنجی و دبی سنجی به روش شبکه های عصبی انجام دادند. در این روش با تولید داده های آموزشی و اعمال آن به شبکه ی عصبی، شبکه قادر خواهد بود که با دریافت فشارگرهی یا مقدار دبی لوله ها و یا ترکیب فشارسنجی و دبی برخی از لوله ها موقعیت و مقدار دقیق نشت گرهی را تعیین کند [۱۱].

از دیگر موارد دیگر انجام شده در خصوص روش های شبیه سازی میدانی، می توان به پژوهش های بوستانی و خدانشناس (۲۰۱۵)، سوفوکلوس و همکاران (۲۰۱۷)، حاجی بنده و نظیف (۲۰۱۸)، معاشری و جلیلی قاضی زاده (۲۰۲۰) و شکفته و همکاران (۲۰۲۰) اشاره نمود (۱۶-۱۲).

روش های پیشنهادی براساس شبکه ی عصبی نمی تواند نشت های کوچک را شناسایی کنند [۱۱]. زیرا شناسایی نشت های کوچک مستلزم استفاده از داده های فراوان در مرحله ی آموزش شبکه ی عصبی بوده و این عمل باعث بالابردن مدت زمان آموزش آن خواهد شد. هم چنین چنانچه در مرحله ی آموزش شبکه ی عصبی، داده ها به مقدار و دقت کافی نباشند، باعث ایجاد نتیجه ی اشتباه در پاسخ خروجی خواهد شد. استفاده از مدل حل معکوس جریان گذرا به منظور نشت یابی، در عمل بسیار کارسخت و دارای مشکلات اجرایی است. اکثر روش های مطالعات پیشین، قادر به شناسایی تنها یک نشت و آن هم در محدوده ی نشت های گزارش شده هستند و قابلیت یافتن محل نشت های با مقادیر کم، که جزء نشت های گزارش نشده باشند، نیستند. در حالی که از دیدگاه بهره برداری شناسایی نشت های گزارش نشده ارجحیت دارد. به صورت کلی علیرغم فعالیت های انجام شده در رابطه با نشت یابی شبیه سازی - میدانی، به نظر می رسد تا رسیدن به یک روش عملی و اجرایی برای یافتن محل و مقدار نشت، مطالعات بیشتری لازم است و در این پژوهش سعی شده است که مشکلات پژوهش های پیشین تا حدودی پوشش

از الگوریتم های فراابتکاری^۱، استفاده از روش های هوش مصنوعی مانند شبکه های عصبی مصنوعی و نشت یابی به وسیله ی ایجاد جریان گذرا می باشد. مغربی و عطاری روشی با استفاده از تحلیل اختلاف فشارهای گرهی در حالت نشت دار و بدون نشت، جهت تعیین موقعیت نشت ارائه کردند [۵]. کندلیری و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از روش گراف به تعیین محل نشت در شبکه های آبرسانی پرداختند. این روش شامل ایجاد سناریوهای نشت و در ادامه تجزیه و تحلیل با استفاده از ماتریس لاپلاس نرمال شده می باشد [۶]. فغفور مغربی و همکاران (۲۰۱۴) با شبکه ی عصبی مصنوعی بهبود یافته با الگوریتم خفاش روشی برای تعیین مقدار و موقعیت نشت در شبکه های تامین آب، ارائه دادند. در روش ذکر شده در فرآیند آموزش شبکه های عصبی از الگوریتم خفاش استفاده شده است. نتایج آن ها نشان داد که استفاده از الگوریتم خفاش، نتیجه ی بهتری از الگوریتم های متعارف آموزش شبکه ی عصبی دارد [۷]. سوزا و همکاران (۲۰۱۵) تعیین موقعیت نشت در شبکه های توزیع آب شهری با استفاده از الگوریتم شبیه سازی تبرید و تئوری گراف را انجام دادند. بدین صورت که داده های فشارسنجی به منظور حل مساله بهینه سازی استفاده می شوند. تابع هدف مجموع اختلاف بین فشارهای محاسباتی و فشارهای اندازه گیری شده میدانی بوده و عمل بهینه سازی با استفاده از الگوریتم شبیه سازی تبرید صورت گرفته است [۸]. عطاری و فغفور مغربی (۲۰۱۸) نیز به نشت یابی با استفاده از شبکه ی عصبی پرداختند. شبکه ی مورد مطالعاتی آن ها، شبکه ی پولاکیس بود. نتایج آن ها نشان داد که شبکه ی عصبی آموزش دیده تنها مقادیر نشت بیشتر از ۱۰ درصد مصرف گرهی را شناسایی می کند و قادر به شناسایی مقادیر کمتر از آن نیست [۴]. فغفور مغربی و همکاران (۲۰۱۳)، مقدار و موقعیت نشت را در گرہ های شبکه با استفاده از روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک و کلونی مورچه ها یافتند. در تحقیق ایشان، داده های میدانی از شبکه به صورت فشار و دبی بود. هم چنین نتایج آن ها نشان داد که الگوریتم کلونی مورچه ها عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک در یافتن نشت های شبکه دارد [۹]. رحمانشاهی و همکاران (۲۰۱۸) نیز به نشت یابی در خطوط لوله ویسکوالاستیک با استفاده از حل معکوس جریان گذرا پرداختند. برای این منظور در ابتدا یک مدل حل معکوس



شکل ۱. فلوجارت روش کلی تعیین محل و مقدار نشت با استفاده از الگوریتم دو مرحله ای پیشنهادی

Fig. 1. The overall flowchart of determining the location and amount of leakage using the proposed two-step algorithm

ذکر است که در این روش باید مدل هیدرولیکی شبکه ی موجود کالیبره باشد.

۲-۱- الگوریتم پله ای

شبکه ای را در نظر بگیرید که در آن حداکثر دو نشت وجود دارد که مقدار کل آن معلوم اما محل وقوع هر کدام از نشت ها، نامعلوم است. هدف از الگوریتم پله ای تعیین محل وقوع نشت ها است. ابتدا مقدار نشت بین هر گره و هر دو گره ممکن توزیع می شود. تعداد حالات ممکن برای یک نشت در شبکه برابر N و برای هر دو گره برابر $\frac{N!}{(N-2)!}$ می باشد که در آن N تعداد گره های شبکه است. در ارتباط با مقدار توزیع دبی نشت اختصاص داده شده به هر دو گره بدین صورت عمل می شود که ابتدا مقادیر $Q_1 = Q_L$ و $Q_2 = 0$ اختصاص داده می شود. که در آن Q_1 و Q_2 به ترتیب مقدار نشت در گره اول و گره دوم شبکه و Q_L برابر مقدار نشت کل می باشد. حالت بعد توزیع دبی های نشت به صورت $Q_1 = Q_L - \Delta Q$ و $Q_2 = \Delta Q$ خواهد بود که ΔQ مقدار گام انتخاب شده برای دبی نشت است. به همین ترتیب در حالت کلی توزیع دبی بین هر دو گره پیشنهادی به صورت $Q_1 = Q_L - n\Delta Q$ و $Q_2 = n\Delta Q$ خواهد بود که مقدار n مرحله ی تکرار را نشان می دهد ($n = 0, 1, \dots, \frac{Q_L}{\Delta Q}$). طبق این روش هر حالت تولید شده یک سناریو نشت نامیده می شود. لذا تعداد کل سناریوهای تولید شده برابر خواهد بود با: $\frac{N!}{2(N-2)!} \left[\frac{Q_L}{\Delta Q} - 1 \right] + N$. لازم به ذکر است که سناریوی نشت به صورت ماتریسی با تعداد ردیف برابر یک و تعداد ستون برابر تعداد کل گره های شبکه می باشد و مقدار هر درایه از ماتریس نامبرده، مقدار نشت هر گره متناظر با

داده شود.

در مقاله ی حاضر روش جدیدی برای تعیین مقدار و محل نشت استفاده شده است. روش پیشنهادی می تواند تا ۲ نشت را در شبکه های آبرسانی تشخیص دهد. در این روش در مرحله ی اول، الگوریتم به کار گرفته شده محل نشت را تعیین می کند (با الگوریتم پله ای). در مرحله ی دوم برای تعیین مقدار نشت ها (که در مرحله ی قبل محل آن ها تعیین شد) از الگوریتم کرم شب تاب^۱ استفاده می شود. الگوریتم های پیشنهادی بر روی شبکه ی پولاکیس [۱۷] به کار گرفته شده اند.

۲- مواد و روش ها

در این پژوهش، یک روش دومرحله ای در نرم افزار Matlab 2017b [۱۸]، برای یافتن محل و مقدار نشت ها کدنویسی شد که در آن نشت به عنوان مصرف اضافی گره ای تلقی می گردد. الگوریتم مرحله ی اول که الگوریتم پله ای نامیده می شود، برای تعیین محل نشت ها به کار گرفته شد. در ادامه با استفاده از الگوریتم مرحله ی دوم (الگوریتم کرم شب تاب) مقدار نشت ها تعیین شدند. برای انجام این روش، نیاز به داده های میدانی از محل پروژه (فشار و دبی) بود. روش انجام کار بدین گونه بود که نتایج فشارسنجی یا دبی سنجی میدانی در نقاط مختلف شبکه با نتایج آن در مدل کامپیوتری در نتیجه ی تولید سناریوهای مختلف نشت، مقایسه شده و سناریوی که دارای کم ترین خطا با نتایج میدانی بود، مقدار و محل نشت ها را مشخص می کرد. روش کلی انجام کار در شکل ۱، آورده شده است. لازم به

سناریوی محل نشت در شبکه، تعیین می شود. لذا در این مرحله محل های حداکثر دو نشت در شبکه مشخص شده است. از آن جایی که به علت حجم زیاد محاسبات مقدار ΔQ نمی تواند بسیار کوچک باشد. لذا در این مرحله مقدار توزیع نشت بین دو گره مشخص شده، به صورت تقریبی به دست آمده است. اما برای تشخیص دقیق تر توزیع مقدار نشت بین دو گره مذکور، از الگوریتم مرحله ی دوم (کرم شب تاب) استفاده خواهد شد.

۲-۲- الگوریتم کرم شب تاب

در مرحله ی دوم الگوریتم دو مرحله ای، مقدار نشت در سناریوی انتخاب شده از مرحله ی قبل، با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب، به دست آورده می شود. نحوه استفاده از الگوریتم کرم شب تاب، به صورت زیر است [۱۹]:

۱. تولید کرم های شب تاب اولیه و ارزیابی آن ها: در روش حاضر، کرم های شب تاب اولیه به مفهوم مقادیر مختلف نشت، برای هر کدام از گره هایی است که در الگوریتم پله ای به عنوان گره های نشت دار معرفی شده اند. مقادیر متفاوت نشت گره یا گره های نشت دار، به عنوان درایه یا درایه های غیرصفر سناریوی های محتمل نشت شبکه در نظر گرفته شده و مقدار تابع هدف متناظر با آن ها، محاسبه می گردد.

۲. به ازای هر کرم شب تاب مانند I_i و J اگر شدت نور کرم شب تاب i (I_i) از شدت نور کرم شب تاب j (I_j) بیشتر باشد، طبق رابطه ی ۲ (فرمول جذب) کرم شب تابی با شدت I_i تولید می گردد. این بدان مفهوم می باشد هر جفت سناریوی تولیدی از مرحله ی ۱، از نظر مقدار تابع هدف با هم مقایسه شده و در این مقایسه، براساس رابطه ی ۲، درایه های غیرصفر سناریویی که مقدار تابع هدف بیشتری دارد، به سمت درایه های غیرصفر سناریوی دارای تابع هدف کم تر متمایل شده و سناریوی نشت جدیدی تشکیل می شود.

۳. تعیین بهترین پاسخ یافته شده

۴. تکرار از مرحله ی ۲ در صورت برآورده نشدن شرایط خاتمه. که در روش پیشنهادی، رسیدن به تعداد معینی تکرار است که توسط کاربر تعیین می گردد.

فرمول جذب در این الگوریتم به صورت زیر می باشد [۱۴]:

$$x'_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r^m} (x_j - x_i) + \alpha \varepsilon_i \quad (2)$$

شماره آن درایه، در شبکه است. هر سناریوی تولیدی در نرم افزار EPANET شبیه سازی هیدرولیکی شده و مقادیر فشارگره ها و دبی لوله ها برای این سناریو محاسبه می شود. بدین منظور برنامه ی کامپیوتری به منظور ارتباط پویا بین الگوریتم پیشنهادی و نرم افزار شبیه سازی EPANET با استفاده از کدنویسی در محیط Matlab تهیه شد. بدین ترتیب که برای هر سناریو اطلاعات بارگذاری گره ها شامل نشت و مصارف گرهی به نرم افزار EPANET منتقل شده و برای هر سناریو تحلیل هیدرولیکی انجام و نتایج به الگوریتم اصلی باز گردانده می شود. در این مرحله تابع هدف زیر محاسبه می شود:

$$F(x) = a \sum_{k=1}^n \left| \left(\frac{P}{\gamma} \right)_{(k,Sim)} - \left(\frac{P}{\gamma} \right)_{(k,Obs)} \right| + b \sum_{l=1}^m \left| (Q)_{(l,Sim)} - (Q)_{(l,Obs)} \right| \quad (1)$$

که در آن:

$F(x)$: تابع هدف

a و b : پارامترهایی هستند که نوع برداشت داده ی میدانی از شبکه را مشخص می کنند ($a=1$ و $b=0$ به معنای فقط فشارسنجی، $a=0$ و $b=1$ به معنای فقط دبی سنجی و $a=1$ و $b=1$ به معنای ترکیب فشارسنجی و دبی سنجی بوده و واحد آن ها به ترتیب معکوس واحد فشار و معکوس واحد دبی می باشد).

m و n : به ترتیب تعداد کل فشار و دبی سنج های شبکه

γ : وزن مخصوص آب

$\left(\frac{P}{\gamma} \right)_{(k,Sim)}$: هد فشار محاسبه شده ی گره ای که فشارسنج k ام در آن نصب شده است (نتایج شبیه سازی).

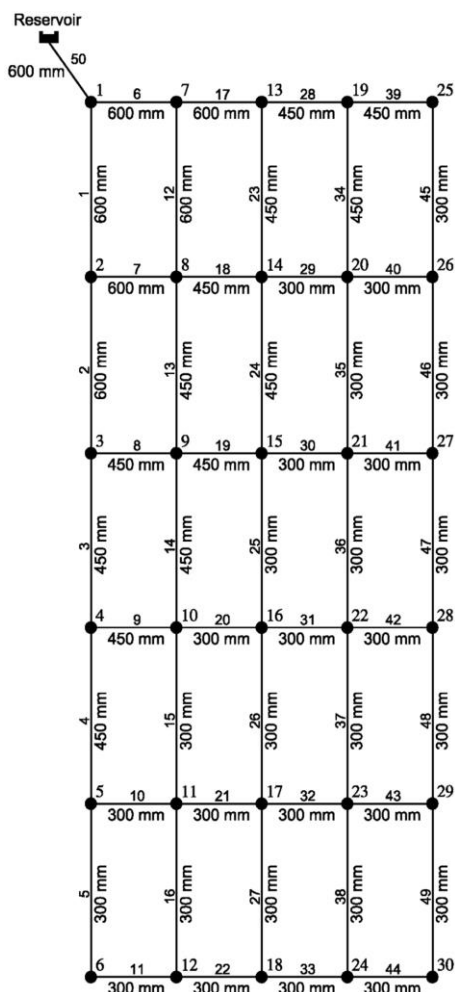
$(Q)_{(l,Sim)}$: دبی محاسبه شده ی لوله ای که دبی سنج l ام در آن نصب شده است (نتایج شبیه سازی).

$\left(\frac{P}{\gamma} \right)_{(k,Obs)}$: هد فشار اندازه گیری شده ی گره ای که فشارسنج k ام در آن نصب شده است (نتایج برداشت میدانی).

$(Q)_{(l,Obs)}$: دبی اندازه گیری شده ی لوله ای که دبی سنج l ام در آن نصب شده است (نتایج برداشت میدانی).

کلیه ی واحدهای کمیت های ذکر شده براساس سیستم بین المللی SI هستند.

در انتهای این مرحله، سناریویی (از انتخاب حداکثر ۲ محل برای نشت) که مقدار تابع شماره (۱) به ازای آن حداقل باشد، به عنوان



شکل ۲. شبکه‌ی مورد مطالعه [۱۷]
Fig. 2. Network of case study [17]

براساس روش پیشنهادی در الگوریتم پله‌ای، مقدار گام ΔQ برابر 0.25 لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده و پارامترهای الگوریتم کرم شب‌تاب در این پژوهش، براساس فرایند سعی و خطا و تلاش برای یافتن بهترین مقادیر بهینه، به صورت زیر تعریف شده است:

$$\beta_0 = 2, \alpha_\infty = 0, \alpha_0 = 0.2, \gamma = 1, \\ m = 0.1, \max \text{ iteration} = 100$$

این الگوریتم برای شبکه‌ی مورد مطالعه، در ۶ مثال به کار گرفته شده است که نتایج آن در ادامه آورده شده است.

۳- نتایج و بحث

در این قسمت نتایج ۶ سناریوی مختلف، شامل یک سناریوی تک نشت و پنج سناریوی دو نشت همزمان در دو گره مختلف شبکه آورده شده است.

که در آن:

x'_i : کرم شب‌تاب اصلاح شده x_i . به مفهوم سناریوی نشت حاصل از متمایل شدن درایه‌های غیرصفر سناریوی نشت مغلوب (دارای مقدار تابع هدف بیشتر) نسبت به درایه‌های غیرصفر سناریوی نشت برتر (دارای مقدار تابع هدف کمتر) در مقایسه‌ی هر جفت سناریوی نشت تولیدی از مرحله‌ی ۱ الگوریتم کرم شب‌تاب است.

x_j : کرم شب‌تاب برتر نسبت به x_i

β_0 : جذابیت اولیه

r : فاصله‌ی بین دو کرم شب‌تاب. از آن جایی که هر سناریوی

نشت به صورت مات

γ : ضریب جذب نور^۲

m : عدد بیان کننده نوع نور ساطع شده

ε_i : بردار تصادفی (توزیع گوسی یا توزیع نرمال)

α : ضریب جهش (رابطه شماره ۳).

$$\alpha = \alpha_\infty + (\alpha_0 - \alpha_\infty)e^{-t} \quad (3)$$

که در آن:

α_∞ : مقدار نهایی ضریب جهش (در تکرار آخر)

α_0 : مقدار اولیه ضریب جهش (در تکرار اول)

t : شماره تکرار

۳-۲- مطالعه‌ی موردی

شبکه‌ی مورد مطالعه که در شکل ۲ آورده شده است، شبکه‌ی معروف پولاکیس می‌باشد که اولین بار در سال ۲۰۰۳ معرفی شد [۱۷]. در این شبکه طول لوله‌های افقی و عمودی به ترتیب برابر ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متر، متوسط زبری مطلق هر لوله 0.26 میلی‌متر، دارای ۲۰ حلقه، ۳۰ گره، ۵۰ لوله و یک مخزن (با ارتفاع سطح آب برابر ۵۰ متر) می‌باشد. قطرهای در نظر گرفته شده برای هر لوله در شکل نشان داده شده است. دبی مصرف در کلیه‌ی گره‌های این شبکه برابر 30 لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که این شبکه تماماً حلقوی بوده و از نظر تحلیل هیدرولیکی به مراتب مشکل‌تر از شبکه‌های شاخه‌ای و مرکب است.

1 Attractiveness

2 Light absorption coefficient

جدول ۱. حالات مختلف داده های میدانی از شبکه در مثال قسمت ۱.۳
Table 1. Different types of the network field data in Example 3. 1

پارامتر اندازه گیری میدانی	شماره ی گره های شبکه جهت فشارسنجی یا لوله های منتخب شبکه جهت دبی سنجی	فشار یا دبی میدانی اندازه گیری شده متناظر با ستون دوم
فقط فشار	۳۰، ۲۹، ۲۸، ۲۷، ۲۶، ۲۴، ۲۳، ۲۲، ۱۶، ۱۵، ۱۲، ۱۱، ۱۰، ۹، ۶، ۵، ۴	۲۳/۸۶، ۲۷/۱۱، ۱۸/۳۱، ۲۱/۳۳، ۲۳/۸۶ ۲۰/۵۱، ۲۱/۷۲، ۲۶/۹۲، ۱۸/۱۰، ۱۹/۷۸ ۲۰/۱۸، ۲۳/۱۹، ۲۵/۹۷، ۱۷/۵۷، ۱۸/۳۰ ۱۷/۵۰، ۱۸/۱۶ متر
فقط دبی	۴۶، ۳۴، ۵، ۱۸	۱۱۴/۱۱، ۴۶/۳۴، ۶۷/۳۴، ۴۴/۳۸ لیتر بر ثانیه
ترکیب فشار و دبی	فشار گره های ۳۰، ۲۸، ۱۵، ۱۱ و دبی لوله ۴۶	۱۷/۵۰، ۲۶/۹۲، ۲۰/۱۸، ۱۹/۷۸ متر و ۴۴/۳۸ لیتر بر ثانیه

۱-۳- تک نشت- گره ۲۱

در این سناریو، ۲/۵ لیتر بر ثانیه به تقاضای دبی گره شماره ۵ اضافه شد و شبیه سازی هیدرولیکی انجام گردید. برای انجام عملیات نشت یابی با استفاده از الگوریتم دو مرحله ای، در مرحله ی اول با الگوریتم پله ای محل نشت و در مرحله ی دوم با الگوریتم کرم شب تاب مقدار نشت به دست آمد. دلیل این که برای حالت یک نشت در شبکه، بعد از تعیین محل نشت، مقدار آن توسط الگوریتم کرم شب تاب تعیین می شود این است که ممکن است در حالت واقعی دو نشت در شبکه باشد، اما یکی از آن ها کمتر از گام (ΔQ) در نظر گرفته شده باشد، لذا در این حالت در مرحله ی اول، یک نشت گزارش می شود، در حالیکه دو نشت در شبکه وجود دارد. ولی با اجرای الگوریتم مرحله ی دوم (کرم شب تاب)، مقدار صحیح تر بزرگترین نشت پیدا می شود.

۱-۱-۳- مرحله ی اول (تعیین محل نشت)

در این مرحله براساس الگوریتم ذکر شده، باید محل نشت

تعیین شود. برای انتخاب نوع برداشت داده های میدانی از شبکه (با فشارسنجی یا دبی سنجی) حالت های زیر در نظر گرفته شده است:
• فقط فشارسنجی

بدین منظور بعد از شبیه سازی شبکه، با فرآیند سعی و خطا مشخص گردید که نیاز به ۱۷ فشارسنج (با دقت دو رقم اعشار) برای رسیدن به محل دقیق محل نشت می باشد. فشارگره هایی که بدین منظور باید اندازه گیری شود، در سطر دوم جدول ۱، آورده شده است. بعد از اجرای الگوریتم (تابع هدف رابطه شماره ۱ با میزان $b=0$ و $a=1$ می باشد)، مرحله ی اول یعنی تعیین محل نشت، با موفقیت تعیین شد.
• فقط دبی سنجی

در این حالت با فرآیند سعی و خطا مشخص گردید که نیاز به ۴ دبی سنج (با دقت دو رقم اعشار) می باشد. دبی لوله هایی که بدین منظور باید اندازه گیری شود، در سطر سوم جدول ۱، آورده شده است. بعد از اجرای الگوریتم (تابع هدف رابطه شماره ۱ با میزان $b=1$ و $a=0$ می باشد) مرحله ی اول یعنی تعیین محل نشت، با موفقیت انجام شد.

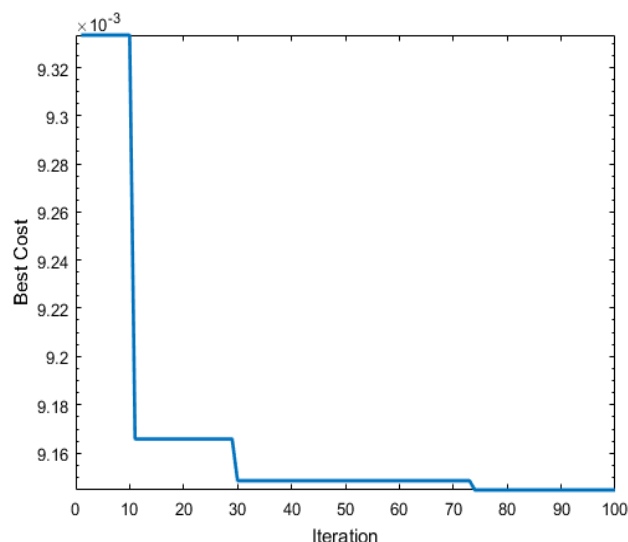
به ۴ دبی سنجی می باشد که نصب این تعداد دبی سنجی در یک شبکه ۳۰ گرهی نیز، کاری سخت و پرهزینه است لذا در ادامه سعی گردید برداشت میدانی از نوع ترکیب فشارسنجی و دبی سنجی باشد. دبی لوله ها و فشارگره هایی که بدین منظور باید اندازه گیری شود، در سطر چهارم جدول ۱، آورده شده است. بعد از انجام محاسبات (تابع هدف رابطه شماره ۱ با میزان $a=1$ و $b=1$ می باشد) مرحله ی اول یعنی تعیین محل نشت، با موفقیت تعیین شد. در ادامه برای تمامی مثال هایی که ارائه خواهد شد، برداشت میدانی از شبکه، به صورت فشار و دبی سنجی در نظر گرفته شده است (فشار گره های با شماره ی ۳۰، ۲۸، ۱۵، ۱۱ و دبی لوله با شماره ی ۴۶).

۳-۱-۲- مرحله ی دوم (تعیین مقدار نشت)

در نتیجه ی اجرای الگوریتم مرحله ی دوم (الگوریتم کرم شب تاب)، نرم افزار مقدار نشت گره ۲۱ را ۲/۵ لیتر بر ثانیه گزارش داد که نشان دهنده ی عملکرد صحیح نرم افزار تهیه شده می باشد. لازم به ذکر است منظور از عملکرد صحیح در روش پیشنهادی، هنگامی است که مقادیر نشت های گزارش شده، حداکثر ۱۰ درصد با مقادیر واقعی نشت تفاوت داشته باشد. در شکل ۳، خروجی الگوریتم کرم شب تاب برای یافتن بهترین مقدار تابع هدف در مقابل تعداد تکرار انجام شده، نشان داده شده است.

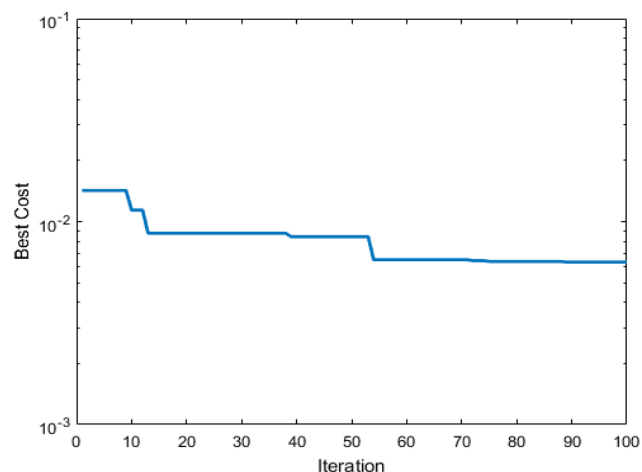
۳-۲- دو نشت- گره های ۱۵ و ۲۳

بدین منظور ۱/۳۳ و ۳/۶۷ لیتر بر ثانیه به ترتیب به دبی برداشت گره های ۱۵ و ۲۳ اضافه شد و بعد از شبیه سازی شبکه، فشار گره های با شماره ی ۳۰، ۲۸، ۱۵، ۱۱ (به ترتیب ۱۷/۲۱، ۱۹/۹۶، ۲۶/۷۷، ۱۹/۵۴ متر) به عنوان فشارهای میدانی اندازه گیری شده و دبی لوله ی ۴۶ به مقدار ۴۴/۴۴ لیتر بر ثانیه، به عنوان دبی میدانی اندازه گیری شده، در نظر گرفته شد. بعد از اجرای الگوریتم دو مرحله ای، نرم افزار محل نشت ها را در گره های ۱۵ و ۲۳ و مقدار آن ها را به ترتیب ۱/۴۳ و ۳/۶۴ لیتر بر ثانیه گزارش داد که نشان دهنده ی عملکرد صحیح الگوریتم تهیه شده برای یافتن مقدار و محل نشت ها می باشد. در شکل ۴، خروجی الگوریتم کرم شب تاب برای یافتن بهترین مقدار تابع هدف در مقابل تعداد تکرار انجام شده، نشان داده شده است. همان گونه که از شکل ۴، استنباط می شود،



شکل ۳. تغییرات تابع هدف جمعیت بهینه کرم شب تاب در برابر تعداد تکرار برای مثال قسمت ۳-۱

Fig. 3. Objective function changing of the firefly optimal population against the iteration number (example 3-1)



شکل ۴. تغییرات تابع هدف جمعیت بهینه کرم شب تاب در برابر تعداد تکرار برای مثال قسمت ۳-۲

Fig. 4. Objective function changing of the firefly optimal population against the iteration number (example 3-2)

• ترکیب دبی سنجی و فشارسنجی

همانطور که در دو قسمت قبل اشاره شد، اگر داده های میدانی به صورت فقط فشار در نظر گرفته شود نیاز به ۱۷ فشارسنج می باشد که این تعداد فشارسنج برای یک شبکه ۳۰ گرهی موجود، نسبتاً زیاد و پرهزینه است و اگر داده های میدانی فقط به صورت دبی باشد، نیاز

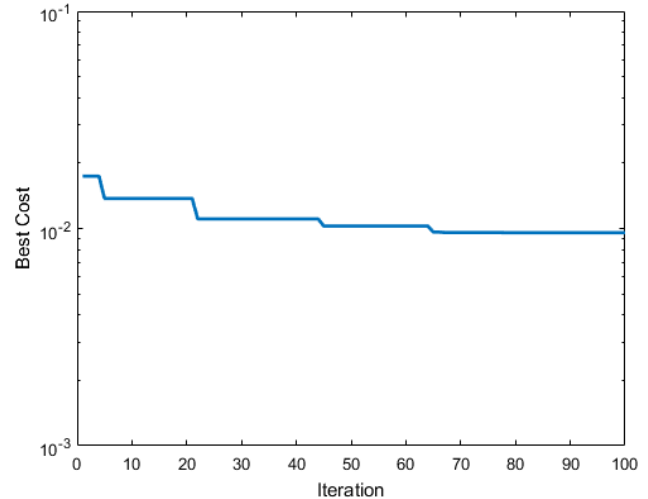
گره های ۳۰، ۲۸، ۱۵، ۱۱ (به ترتیب ۱۷/۴۱، ۲۰/۰۹، ۲۶/۸۷، ۱۹/۶۷ متر) به عنوان فشارهای میدانی اندازه گیری شده و دبی لوله ی ۴۶ به مقدار ۴۴/۸۰ لیتر بر ثانیه، به عنوان دبی میدانی اندازه گیری شده، در نظر گرفته شد. بعد از اجرای الگوریتم دو مرحله ای، نرم افزار محل نشت ها را در گره های ۱۱ و ۲۷ و مقدار آن ها را به ترتیب ۰/۹۸ و ۲/۴۹ لیتر بر ثانیه گزارش داد که نشان دهنده ی عملکرد صحیح الگوریتم تهیه شده برای یافتن مقدار و محل نشت ها می باشد. در شکل ۵، خروجی الگوریتم کرم شب تاب برای یافتن بهترین مقدار تابع هدف در مقابل تعداد تکرار انجام شده، نشان داده شده است.

۴-۳- دو نشت-گره های ۱۰ و ۲۴

بدین منظور، ۱/۲۳ و ۱/۷۷ لیتر بر ثانیه به ترتیب به دبی برداشت گره های ۱۰ و ۲۴ اضافه کرده و بعد از مدل کردن شبکه، فشار گره های با شماره ی ۳۰، ۲۸، ۱۵، ۱۱ (به ترتیب به میزان های ۱۷/۳۷، ۲۰/۱۲، ۲۶/۸۹، ۱۹/۶۹) به عنوان فشارهای میدانی اندازه گیری شده و دبی لوله ۴۶ به مقدار ۴۴/۲۵ لیتر بر ثانیه، به عنوان دبی میدانی اندازه گیری شده، در نظر گرفته شد. بعد از اجرای الگوریتم دو مرحله ای، نرم افزار محل نشت ها را در گره های ۱۰ و ۲۴ و مقدار آن ها را به ترتیب ۱/۲۲ و ۱/۷۶ لیتر بر ثانیه گزارش داد. همان طور که ملاحظه می شود، نرم افزار محل نشت ها را به درستی تشخیص داده و مقادیر نشت متناظر با آن ها را خطای قابل قبولی گزارش کرده است. در شکل ۶، خروجی الگوریتم کرم شب تاب برای یافتن بهترین مقدار تابع هدف در مقابل تعداد تکرار انجام شده، نشان داده شده است.

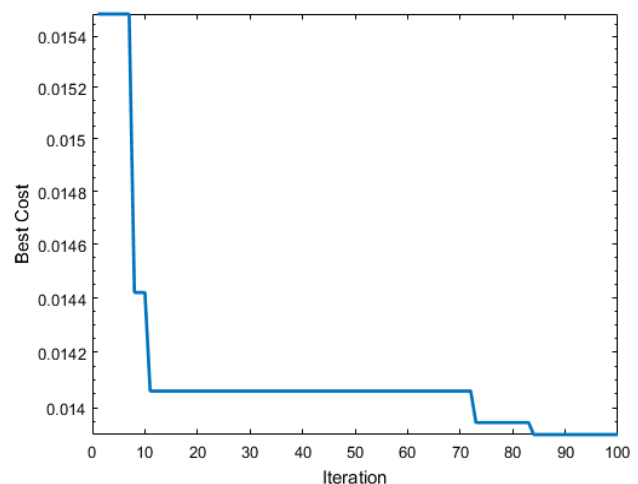
۴-۵- دو نشت-گره های ۲۹ و ۳۰

بدین منظور، ۱/۳۳ و ۱/۸۴ لیتر بر ثانیه به ترتیب به دبی برداشت گره های ۲۹ و ۳۰ اضافه کرده و بعد از مدل کردن شبکه، فشار گره های با شماره ی ۳۰، ۲۸، ۱۵، ۱۱ (به ترتیب به میزان های ۱۷/۲۸، ۲۰/۰۸، ۲۶/۸۸، ۱۹/۶۵) به عنوان فشارهای میدانی اندازه گیری شده و دبی لوله ۴۶ به مقدار ۴۴/۳۴ لیتر بر ثانیه، به عنوان دبی میدانی اندازه گیری شده، در نظر گرفته شد. بعد از اجرای الگوریتم دو مرحله ای، نرم افزار محل نشت ها را در گره های ۲۹ و ۳۰ و مقدار آن ها را به ترتیب ۱/۳۰ و ۱/۸۷ لیتر بر ثانیه گزارش داد. همان طور که ملاحظه می گردد، نرم افزار محل نشت ها را به درستی تعیین



شکل ۵. تغییرات تابع هدف جمعیت بهینه کرم شبتاب در برابر تعداد تکرار برای مثال قسمت ۳-۳

Fig. 5. Objective function changing of the firefly optimal population against the iteration number (example 3-3)



شکل ۶. تغییرات تابع هدف جمعیت بهینه کرم شبتاب در برابر تعداد تکرار برای مثال قسمت ۴-۳

Fig. 6. Objective function changing of the firefly optimal population against the iteration number (example 3-4)

میزان تابع هدف با افزایش تکرار بهبود یافته و در نهایت تقریباً میزان تغییراتش ناچیز می گردد.

۳-۳- دو نشت-گره های ۱۱ و ۲۷

بدین منظور، ۱/۰۳ و ۲/۴۷ لیتر بر ثانیه به ترتیب به دبی برداشت گره های ۱۱ و ۲۷ اضافه شد و بعد از شبیه سازی شبکه، فشار

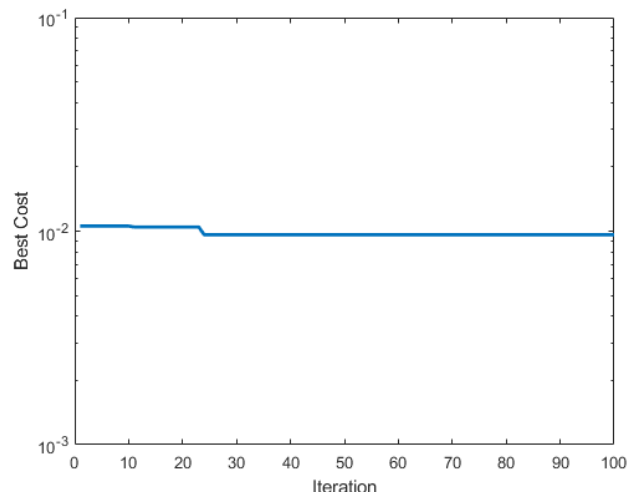
فشار گره‌های با شماره ی ۳۰، ۲۸، ۱۵، ۱۱ (به ترتیب به میزان‌های ۱۷/۵۰، ۲۰/۱۹، ۲۶/۹۰، ۱۹/۷۸) به عنوان فشارهای میدانی اندازه‌گیری شده و دبی لوله ۴۶ به مقدار ۴۳/۷۹ لیتر بر ثانیه، به عنوان دبی میدانی اندازه‌گیری شده، در نظر گرفته شد. بعد از اجرای الگوریتم دو مرحله‌ای، نرم افزار محل نشت‌ها را در گره‌های ۱۹ و ۲۵ و مقدار آن‌ها را به ترتیب ۱/۲۳ و ۱/۹۸ لیتر بر ثانیه گزارش داد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، نرم افزار عملکرد مناسبی در تعیین مقدار و محل نشت‌ها داشته است. در شکل ۸، خروجی الگوریتم کرم شب تاب برای یافتن بهترین مقدار تابع هدف در مقابل تعداد تکرار انجام شده، نشان داده شده است.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش جدید برای تعیین مقدار و محل وقوع یک یا دو نشت همزمان در شبکه‌های توزیع آب ارائه شد. روش پیشنهادی یک الگوریتم دو مرحله‌ای است که در مرحله ی اول آن محل نشت(ها) با استفاده از الگوریتم پله‌ای و در مرحله ی دوم آن مقدار نشت(ها) با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب تعیین می‌شود. در این روش، الگوریتم قادر خواهد بود که با دریافت داده‌های میدانی از شبکه، به تعیین مقدار و محل نشت در گره‌های شبکه بپردازد. از جمله مزایای آن می‌توان به یافتن دقیق محل(های) نشت و خطای حداکثر ۱۰ درصد در تعیین مقادیر نشت(ها)، نیاز به کم‌ترین داده‌های میدانی از شبکه (با فشارسنجی در گره‌ها یا دبی‌سنجی در لوله‌های شبکه) اشاره کرد. این الگوریتم می‌تواند هم با فشارسنجی، هم با دبی‌سنجی و هم با ترکیب فشارسنجی و دبی‌سنجی، عملیات نشت‌یابی را انجام دهد. تعداد برداشت‌های میدانی از ابتدا مشخص بوده و مقادیر بسیار کم نشت‌ها را نیز تعیین می‌کند. برای مثال‌های مختلف ارائه شده، در شبکه‌ی پولاکیس، با ترکیب چهار فشارسنجی و یک دبی‌سنجی، محل و موقعیت یک نشت تنها و دو نشت همزمان، با خطای کمتر از ۸ درصد تعیین شد. نتایج کلی نشان می‌دهد که می‌توان از روش توسعه داده شده برای یافتن مقدار و محل دو نشت همزمان در شبکه‌های توزیع آب استفاده کرد. این روش می‌تواند برای بهره‌برداران در یافتن محل و مقدار نشت‌های گزارش نشده مورد استفاده قرار گیرد.

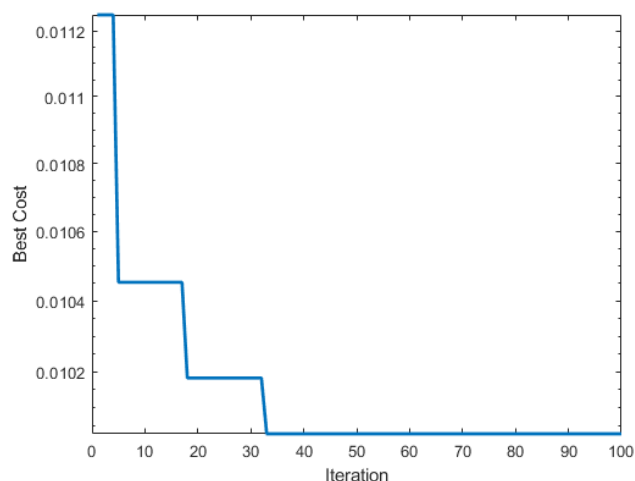
مراجع

[1] R. Puust, Z. Kapelan, D.A. Savic, T. Koppel, A review



شکل ۷. تغییرات تابع هدف جمعیت بهینه کرم شب تاب در برابر تعداد تکرار برای مثال قسمت ۳-۵

Fig. 7. Objective function changing of the firefly optimal population against the iteration number (example 3-5)



شکل ۸. تغییرات تابع هدف جمعیت بهینه کرم شب تاب در برابر تعداد تکرار برای مثال قسمت ۳-۶

Fig. 8. Objective function changing of the firefly optimal population against the iteration number (example 3-6)

کرده و عملکرد قابل قبولی در یافتن مقدار آن‌ها داشته است. در شکل ۷، خروجی الگوریتم کرم شب تاب برای یافتن بهترین مقدار تابع هدف در مقابل تعداد تکرار انجام شده، نشان داده شده است.

۳-۶- دو نشت-گره‌های ۱۹ و ۲۵

بدین منظور، ۱/۳۳ و ۱/۸۴ لیتر بر ثانیه به ترتیب به دبی برداشت گره‌های ۱۹ و ۲۵ اضافه کرده و بعد از مدل کردن شبکه،

- Leak Detection in Viscoelastic Pipeline Using Inverse Transient Analysis, *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab (in persian)*, 29(5) (2018) 85-97 (in persian).
- [11] M. Attari, M. Zaki Pour, M. Faghafur Maghrebi, Determination of the position and amount of leakage in water supply networks by using the combination of pressure metering and flow metering by neural networks, in: *Second National Conference ways of the front of Water Crisis in Iran and the Middle East Shiraz, Scientific Conferences Center Neghar Conference, 2015 (in persian)*.
- [12] A. Boostani, S.R. Khodashenas, Studying a leakage detection method in pressurized water networks based on the pressure-leakage relation (Presentation of Optimization Code for Locating Leakage), *Journal of Water and Sustainable Development*, 2(1) (2015) 59-66 (in persian).
- [13] S. Sophocleous, D. A. Savić, Z. Kapelan, O. Giustolisi, A two-stage calibration for detection of leakage hotspots in a real water distribution network, in: *XVIII International Conference on Water Distribution Systems Analysis, WDSA2016, Elsevier, 2017, pp. 168-176*.
- [14] E. Hajibandeh, S. Nazif, Pressure Zoning Approach for Leak Detection in Water Distribution Systems Based on a Multi Objective Ant Colony Optimization, *Water Resources Management*, 32(7) (2018) 2287-2300.
- [15] R. Moasheri, M. Jalili Ghazizadeh, Locating of Probabilistic Leakage Areas in Water Distribution Networks by a Calibration Method Using the Imperialist Competitive Algorithm, *Water Resources Management*, 34(1) (2020) 35-49.
- [16] M. Shekofteh, M. Jalili Ghazizadeh, J. Yazdi, A methodology for leak detection in water distribution networks using graph theory and artificial neural network, *Urban Water Journal*, 17(6) (2020) 525-533.
- [17] Z. Poulakis, D. Valougeorgis, C. Papadimitriou, Leakage detection in water pipe networks using a Bayesian probabilistic framework, *Probabilistic of methods for leakage management in pipe networks, Urban Water Journal*, 7(1) (2010) 25-45.
- [2] N. Samir, R. Kansoh, W. Elbarki, A. Fleifle, Pressure control for minimizing leakage in water distribution systems, *Alexandria Engineering Journal*, 56(4) (2017) 601-612.
- [3] Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, *The Guide to Recognizing and Investigating the Effective Factors in Unaccounted-For Water the Unaccounted and Approaches to its Reduction, 2012 (in persian)*.
- [4] M. Attari, M. Faghfour Maghrebi, New Method for Leakage Detection by Using Artificial Neural Networks, *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab (in persian)*, 29(1) (2018) 14-26 (in persian).
- [5] M. Faghafur Maghrebi, M. Attari, The new leak detection method in the water supply network using the minimum pressure metering in the presence of two simultaneous leaks, in: *Seventh National Congress on Civil Engineering, Zahedan, Sistan and Baluchestan University 2013 (in persian)*.
- [6] A. Candelieri, D. Conti, F. Archetti, A Graph based Analysis of Leak Localization in Urban Water Networks, *Procedia Engineering*, 70 (2014) 228-237.
- [7] M. Faghafur Maghrebi, M. Aghaebrahimi, H. Taherian, M. Attari, Determining the amount and location of leakage in water supply networks using a neural network improved by the bat optimization algorithm, *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 4(3) (2014) 322-327.
- [8] J. Sousa, L. Ribeiro, J. Muranho, A.S. Marques, Locating Leaks in Water Distribution Networks with Simulated Annealing and Graph Theory, *Procedia Engineering*, 119 (2015) 63-71.
- [9] M. Faghafur Maghrebi, Y. Hasanzadeh, S. Yazdani, Calibration of Water Supply Systems Based on Ant Colony Optimization, *Water & Wastewater, Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab (in persian)*, 24(1) (2013) 101-111 (in persian).
- [10] M. Rahmanshahi, M. Fathi-Moghadam, A. Haghighi,

- [19] Y. Xin-She, *Engineering Optimization : an introduction with metaheuristic applications*, John Wiley & Sons, Inc, 2010.
- [18] Matlab 2017b (9.3.0.713579) 64-bit (win 64), in, September 17, 2017.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Moasheri, M.R. Jalili-Ghazizadeh, Identifying Position and Amount of Two Simultaneous Leaks in Water Supply Networks by a Two-step Algorithm, Amirkabir J. Civil Eng., 52(5) (2020) 1175-1186.

DOI: [10.22060/ceej.2018.15272.5867](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.15272.5867)



