Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 10, No. 4, PP. 29-40, Winter 2025
DOI: 10.22112/jwwse.2023.390328.1358

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال دهم، شماره ۴، صفحات ۲۹-۴۰، زمستان ۱۴۰۴

Research Paper

Leakage Detection and Localization in Water Distribution Networks Using SMA

Maryam Nasiri Dahaj[1], Mohammadreza Jalili Ghazizadeh[2*], Ebrahim Jabbari[3] and Reza Moasheri[4]

1- M.Sc. Student, Water and Hydraulic Structures Engineering Department, School of Civil Engineering, University of Science and Technology, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Water and Environmental Engineering Department, School of Civil Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

3- Professor, Water and Hydraulic Structures Engineering Department, School of Civil Engineering, University of Science and Technology, Tehran, Iran.

4- Ph.D. Student, Water and Environmental Engineering Department, School of Civil Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

*Corresponding Author, Email: m_jalili@sbu.ac.ir

Received: 08/04/2023
Revised: 25/10/2023
Accepted: 28/10/2023
© IWWA

Abstract

The occurrence of leakage in water supply systems, in addition to water loss, increases the costs of operation as well as pollution entering the network. Therefore, finding leaks is a crucial challenge for water utilities. In most of the conventional methods, leak detection is costly and time consuming. In this paper, a calibration-optimization method is presented using a new meta-heuristic algorithm (SMA). The proposed method is based on comparing simulated and field data of pressure and flow. This method was implemented for 15 different scenarios of single leak in three water distribution networks. The amount and location of leakage in all scenarios were defined automatically. The results showed that the presented method is able to estimate the location and amount of leakage in the networks with high accuracy and independent of the dimensions and specifications of the networks and also without dependence on the amount and location of the leakage. In the studied networks, the algorithm has reached convergence in less than 90 iterations fast and the leak detection has been performed accurately. Based on the obtained results, leak location in water networks can be found with very high accuracy using the proposed powerful algorithm.

Keywords: Leak Detection, Optimization, Metaheuristic Algorithms, Water Distribution Network, Calibration.

مقاله پژوهشی

یافتن محل و مقدار نشت در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم SMA

مریم نصیری دهج[۱]، محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده[۲*]، ابراهیم جباری[۳] و رضا معاشری[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

۲- دانشیار دانشگاه شهید بهشتی، گروه آب و محیط‌زیست، دانشکده عمران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳- استاد دانشگاه علم و صنعت، گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

۴- دانشجوی دکترای دانشگاه شهید بهشتی، گروه آب و محیط‌زیست، دانشکده عمران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول، ایمیل: m_jalili@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۹
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۸/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۶
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

وقوع نشت در سامانه‌های آب‌رسانی علاوه بر هدررفت آب، باعث افزایش هزینه‌های بهره‌برداری و همچنین ورود آلودگی به شبکه می‌شود. از این‌رو یافتن نشت، چالشی مهم برای شرکت‌های آب و فاضلاب است. اکثر روش‌های مرسوم نشت‌یابی، مستلزم صرف زمان و هزینه بالا برای یافتن نشت هستند. در مقاله حاضر، یک روش واسنجی-بهینه‌یابی با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری جدید SMA ارائه شده است. روش پیشنهادی براساس مقایسه داده‌های فشار یا دبی شبیه‌سازی‌شده در مدل و داده‌های اندازه‌گیری‌شده میدانی، محل نشت را برآورد می‌کند. این روش در ۱۵ سناریوی مختلف وجود تک‌نشت در سه شبکه توزیع آب پیاده‌سازی شد. محل و مقدار نشت در تمامی سناریوها به‌صورت خودکار تعیین شد. نتایج نشان داد روش ارائه‌شده قادر است محل و مقدار نشت موجود در شبکه‌ها را با دقت بالا و مستقل از ابعاد و مشخصات شبکه و همچنین بدون وابستگی به مقدار و محل نشت، تخمین بزند. در شبکه‌های مورد مطالعه به‌طور میانگین با کم‌تر از ۹۰ تکرار، الگوریتم به‌سرعت به همگرایی رسیده و عمل نشت‌یابی به‌دقت انجام گرفته‌است. با استناد به نتایج حاصله، با استفاده از این الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی قدرتمند، نشت موجود در شبکه‌های آب را با دقت بسیار بالا می‌توان یافت.

کلمات کلیدی: نشت‌یابی، بهینه‌یابی، الگوریتم‌های فراابتکاری، شبکه‌های توزیع آب، واسنجی.

۱- مقدمه

شبکه‌های توزیع آب ازجمله زیرساخت‌های مهم شهری هستند که نقشی اساسی را در تأمین آب با فشار کافی و کیفیت مناسب ایفا می‌کنند. اکثر شبکه‌های توزیع آب در کشورهای توسعه‌یافته، در دهه‌های قبل ساخته شده‌اند و درحال‌حاضر، علاوه‌بر قدمت اجزای شبکه، به‌دلایلی هم‌چون کیفیت پایین مواد اولیه، عدم انجام دوره‌های تعمیر و نگهداری به‌طور مداوم، خوردگی تأسیسات و فشار بالای سامانه با هدررفت آب مواجه هستند (Capelo et al., 2021). علت اصلی هدررفت آب در شبکه‌های آب‌رسانی، وقوع نشت است که تقریباً ۷۰٪ از کل هدررفت آب را به خود اختصاص می‌دهد (El-Zahab and Zayed, 2019). مقدار نشت، تابع شرایط مختلف بوده و مقادیر گوناگونی را می‌تواند داشته باشد؛ برای مثال در کشور هلند مقدار نشت بین ۳٪ تا ۷٪ گزارش شده است درحالی‌که در برخی از کشورهای درحال توسعه، این مقدار به بیش از ۵۰٪ نیز می‌رسد (Puust et al., 2010).

به‌طورکلی وجود نشت در شبکه‌های توزیع آب موجب کاهش کیفیت آب به‌دلیل افزایش احتمال ورود آلودگی، کاهش فشار، اتلاف انرژی و افزایش هزینه‌ها می‌شود؛ از این‌رو تشخیص به‌موقع نشت و اقدام برای رفع آن، چالش اصلی شرکت‌های خدمات آب‌رسانی است. روش‌های متنوعی برای شناسایی نشت(ها) وجود دارد که بنابر طبقه‌بندی مرسوم، روش‌های نشت‌یابی به دو گروه اصلی "فیزیکی" و "شبیه‌سازی-میدانی" تقسیم می‌شوند. نشت‌یابی فیزیکی، خود به دو دسته روش‌های صوتی و غیرصوتی تقسیم‌بندی می‌شود. روش‌های صوتی شامل روش‌هایی مانند میله‌های شنیداری و دستگاه ارتباط‌دهنده نشت و صدا است. روش‌های غیرصوتی نیز شامل روش‌هایی مانند استفاده از گاز ردیاب و ترموگرافی است (Wan et al., 2022).

نشت‌یابی می‌تواند با به کارگیری روش‌های فیزیکی با دقت نسبتاً مناسبی انجام شود، اما این امر مستلزم استفاده از تجهیزات خاص و پیشرفته است. هم‌چنین عوامل دیگری همچون زمان‌بر بودن، نیاز به نیروی متخصص، هزینه‌بر بودن و وجود محدودیت‌های خاص هر روش باعث شده است که در سال‌های اخیر به روش‌های غیرفیزیکی ازجمله روش‌های شبیه‌سازی-میدانی توجه ویژه‌ای شود. ازجمله روش‌های شبیه‌سازی-میدانی به انجام فرآیند واسنجی-بهینه‌یابی و استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توان اشاره نمود.

Wu and Sage (2008) واسنجی شبکه آب را به‌منظور شناسایی نشت‌های آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام دادند. آن‌ها در دو مثال با داده‌های میدانی موجود نیز، روش خود را مورد صحت‌سنجی قرار دادند.

مغربی و همکاران (۱۳۹۰) پژوهشی ارائه دادند که برمبنای آن، مقدار و موقعیت نشت در گره‌های شبکه با استفاده از واسنجی هیدرولیکی توسط الگوریتم ژنتیک و کلونی مورچه‌ها انجام می‌شود. نتایج نشان‌داد که الگوریتم کلونی مورچه‌ها با تعداد برداشت فشارسنجی کم‌تری به نتیجه می‌رسد. الگوریتم ژنتیک در برخی مواقع، پاسخ غیرصحیح را گزارش می‌کند و به‌صورت کلی الگوریتم کلونی مورچه‌ها عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک در یافتن نشت‌های شبکه دارد.

در تحقیق دیگری مغربی و همکاران (۱۳۹۲)، روشی برای تعیین مقدار و محل نشت با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی بهبودیافته با الگوریتم خفاش پیشنهاد دادند. نتایج آن‌ها نشان داد استفاده از الگوریتم خفاش، نتیجه بهتری در آموزش شبکه عصبی نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد.

Sousa et al. (2015) روشی برای شناسایی نشت در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و نظریه گراف پیشنهاد دادند. تابع هدف در این پژوهش، مجموع قدرمطلق اختلاف فشارهای میدانی و فشارهای شبیه‌سازی‌شده است و نتایج کلی، حاکی از رضایت‌بخش بودن این روش بود.

Wachla et al. (2015) از یک روش عصبی-فازی برای تعیین محل نشت‌های شبکه استفاده کردند. در این روش شبکه موجود به چند زیرناحیه تقسیم شد. سپس به تعداد زیرناحیه‌ها، از طبقه‌بندکننده‌های فازی-عصبی، برای شناسایی نشت در هر ناحیه استفاده شد. این روش در تعیین محل نشت‌های شبکه آب‌رسانی در لهستان به‌کار برده شد و نتایج خروجی نشان‌دهنده رضایت از این روش است.

حاجی‌بنده و نظیف (۱۳۹۶) روشی را با عنوان روش منطقه‌بندی فشاری به‌منظور تعیین نشت در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان چندهدفه ارائه دادند. کارآیی روش پیشنهادی در دو شبکه مورد بررسی قرارگرفت. شکفته و همکاران (۱۳۹۸) تحقیقی برای یافتن نشت با استفاده از تئوری گراف و شبکه عصبی ارائه دادند. در این روش ابتدا با استفاده از تئوری گراف، شبکه به‌صورت فرضی به دو ناحیه مجزا تقسیم شده و توسط شبکه‌های عصبی و نتایج فشارسنجی، نشت در هر ناحیه تخمین زده می‌شود.

معاشری و جلیلی قاضی‌زاده (۱۳۹۸) روشی برای واسنجی هم‌زمان زبری لوله‌ها و نشت‌های مدل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب ارائه دادند. در روش پیشنهادی، نشت به‌عنوان مصرف

اضافی گرهی تلقی شده و بعد از گروه‌بندی لوله‌ها به‌منظور تعیین زبری هر گروه لوله، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری، اختلاف فشار و دبی‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده، کمینه می‌شوند.

Hu et al. (2021) روش جدیدی برای نشت‌یابی شبکه‌های آب‌رسانی پیشنهاد دادند. در این روش، ابتدا شبکه آب توسط الگوریتم خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی، به چندین ناحیه تقسیم می‌شود. در ادامه به‌وسیله شبکه‌های عصبی پیچشی کامل دارای چند مقیاس، محدوده‌های دارای نشت یافت می‌شوند. روش پیشنهادی با روش‌هایی از قبیل ماشین بردار پشتیبان مورد مقایسه قرارگرفت و نتایج حاکی از برتری آن نسبت به سایر روش‌ها است. از دیگر پژوهش‌های انجام‌شده پیرامون روش شبیه‌سازی-میدانی می‌توان به Lijuan et al. (2012)، بوستانی و خداشناس (۱۳۹۴)، Pérez-Pérez et al. (2021) و Marzola et al. (2022) اشاره نمود.

بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده پیرامون موضوع نشت‌یابی با استفاده از روش شبیه‌سازی-میدانی، برروی یک شبکه پیاده‌سازی شده‌اند؛ درحالی‌که برای اطمینان از عملکرد روش، باید از شبکه‌های مختلف و مقادیر متفاوت نشت استفاده شود. شایان ذکر است که در اکثر تحقیقات صورت‌گرفته، نشت به‌عنوان مصرف اضافی در گره درنظر گرفته‌شده است. درواقع درنظرگرفتن یک دبی ثابت برای نشت صحیح نیست و بهتر است مقدار نشت به‌گونه‌ای درنظر گرفته‌شود که حتماً وابسته به فشار باشد. هم‌چنین استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی، مستلزم در دسترس بودن داده‌های فراوان برای آموزش شبکه عصبی است. اگر در مرحله آموزش، مقدار و دقت داده‌ها در حد کافی نباشند، موجب ایجاد نتیجه نامطلوب خواهند شد.

در پژوهش حاضر، سعی شده است تا حدی محدودیت‌ها و مشکلات تحقیقات پیشین پوشش داده شود و روش جدیدی برای تعیین مقدار و محل دقیق نشت در شبکه‌های توزیع آب ارائه شود. در روش پیشنهادشده، نشت به‌صورت تابعی از فشار و ضریب نشت گرهی در سه شبکه معروف پولاکیس، هانوی و بالرما درنظر گرفته می‌شود. در ادامه با استفاده از الگوریتم جدیدِ Slime Mould Algorithm که اخیراً توسعه داده شده است و به‌واسطه اعتبارسنجی‌های انجام‌شده برای آن در مقاله مربوطه، عملکرد بسیار خوبی در حل مسائل پیچیده بهینه‌یابی دارد، واسنجی شبکه و یافتن نشت، صورت می‌گیرد (Li et al., 2020). الگوریتم مذکور در زمینه‌های مختلف علوم و مهندسی به‌کار گرفته‌شده و عملکرد آن در حوزه‌های متنوع بررسی‌شده است.

Chakraborty and Ray (2023) با استفاده از الگوریتم SMA هزینه یک ریزشبکه را کمینه‌سازی نمودند. در پژوهش دیگری Bardhan and Asteris (2023) برای ساخت شبکه عصبی مصنوعی از چهار الگوریتم استفاده کردند که یکی از آن‌ها، الگوریتم SMA بود. مطالعه‌ای که توسط Farhat et al. (2023) انجام شد نیز نمونه دیگری از تحقیقات انجام‌شده با استفاده از الگوریتم SMA است. در تحقیق حاضر نیز قابلیت این الگوریتم در مسائل حوزه نشت‌یابی بررسی می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق ابتدا مدل هیدرولیکی شبکه‌های مورد مطالعه در نرم‌افزار EPANET مدل‌سازی شده، سپس مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی به اجزای آن‌ها اختصاص داده می‌شود. تحلیل شبکه‌ها براساس نرم‌افزار ایپانت انجام می‌شود. این نرم‌افزار از روش گرادیان برای تحلیل شبکه‌های آب‌رسانی استفاده می‌کند. در مطالعه حاضر، نشت‌ها، مبتنی بر فشار و تقاضاها ثابت درنظر گرفته می‌شوند. در گام بعدی، سناریوهای وجود نشت در شبکه‌ها به‌صورت تصادفی و خودکار تعریف شده‌اند. بدین معنا که فرض می‌شود در هر شبکه، ۵ سناریوی وجود تک‌نشت با مقادیری در حدود ۵ تا ۱۰٪ دبی ورودی به شبکه و در گره‌های تصادفی وجود دارد. نشت باتوجه به رابطه (۱) محاسبه می‌شود. پس از تعریف سناریوهای وجود نشت در هر شبکه، در نقاط مختلفی از شبکه‌ها و ورودی مخازن، عمل فشارسنجی و دبی‌سنجی انجام گرفته و داده‌ها به‌عنوان داده‌های میدانی برداشت می‌شوند. هم‌چنین فرض بر این است که در هر سه شبکه مورد بررسی، فشارهای موجود از فشار استاندارد کم‌تر نیست.

$$Q = KP^{\alpha} \qquad (۱)$$

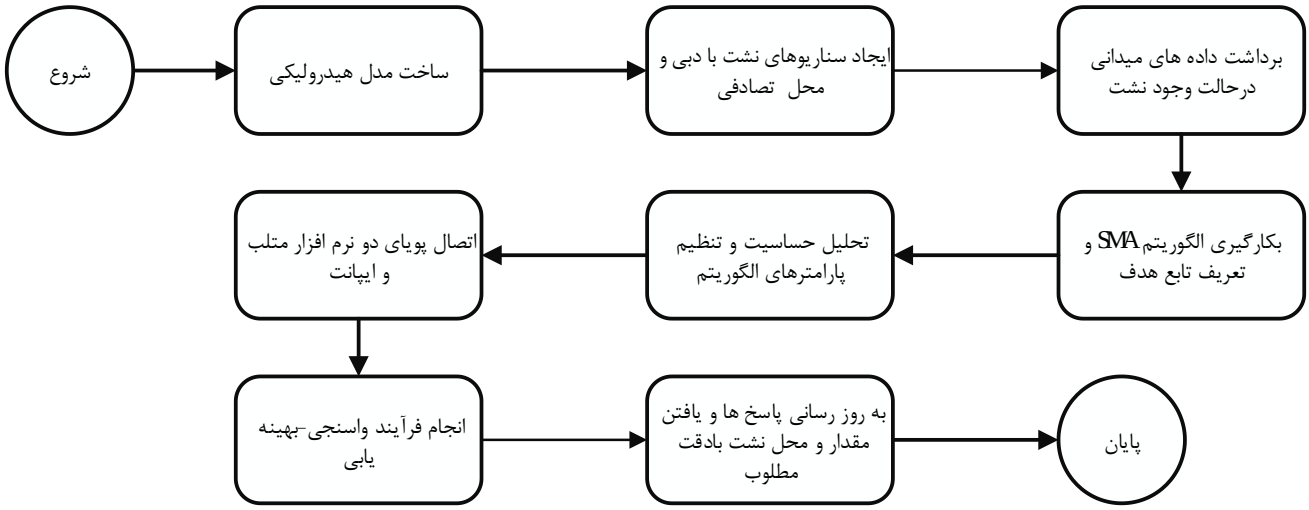
که Q: مقدار دبی نشت، K: مقدار ضریب نشت گرهی، P: مقدار فشار موجود در شبکه در حالت وجود نشت و α: توان فشار است.

الگوریتم SMA با تعریف تابع هدفی که در رابطه (۲) آورده شده است، در محیط نرم‌افزار متلب کدنویسی شد و پارامترهای الگوریتم با انجام تحلیل حساسیت تعیین شدند. سپس برای ارتباط بین دو نرم‌افزار متلب و ایپانت از یک ابزارجانبی که نخستین بار توسط Eliades et al. (2016) معرفی شد، استفاده شد. در گام آخر، واسنجی مدل هیدرولیکی شبکه‌ها و بهینه‌یابی تابع هدفِ تعریف‌شده، انجام و درنهایت محل و مقدار نشت

مشخص می‌شود. روندنمای روش پیشنهادی در شکل ۱ ارائه شده است.

$$Minimize(f(x) = \frac{\sum_{nh=1}^{NH}\left|\frac{Hsim_{nh}-Hobs_{nh}}{Hobs_{nh}}\right| + \sum_{nf=1}^{NF}\left|\frac{Fsim_{nf}-Fobs_{nf}}{Fobs_{nf}}\right|}{NH+NF}) \quad (۲)$$

که $f(x)$: تابع هدف، nh: شمارشگر فشارسنج‌های شبکه، NH: تعداد کل فشارسنج‌های شبکه، $Hsim_{nh}$: تراز هیدرولیکی شبیه‌سازی‌شده توسط نرم‌افزار در گره دارای فشارسنج nhام، $Hobs_{nh}$: تراز هیدرولیکی مشاهداتی در گره دارای فشارسنج nhام، nf: شمارشگر دبی‌سنج‌های شبکه، NF: تعداد کل دبی‌سنج‌های شبکه، $Fsim_{nf}$: دبی جریان شبیه‌سازی‌شده توسط نرم‌افزار در لوله دارای دبی‌سنج nfام، $Fobs_{nf}$: دبی اندازه‌گیری‌شده میدانی در لوله دارای دبی‌سنج nfام هستند.



شکل ۱- روندنمای روش پیشنهادی برای یافتن نشت

۲-۱- معرفی الگوریتم SMA

ایده اصلی این الگوریتم، براساس رفتار نوسانی کپک مخاطی در طبیعت است. درواقع ایده این الگوریتم عمدتاً رفتار و تغییرات مورفولوژیکی کپک مخاطی در جست‌وجوی علوفه را شبیه‌سازی می‌کند. الگوریتم SMA از وزن‌های تطبیقی برای شبیه‌سازی فرآیند تولید بازخورد مثبت و منفی موج انتشار کپک مخاطی مبتنی بر موج بیولوژیکی استفاده می‌کند تا مسیر بهینه برای اتصال مواد غذایی را با توانایی جست‌وجوی بالای خود فراهم کند. کپک مخاطی می‌تواند با توجه به بوی موجود در هوا به غذا نزدیک شود. برای بیان این رفتار به‌صورت ریاضی، روابط زیر پیشنهاد شده است.

$$\overrightarrow{X(t+1)} = \begin{cases} \overrightarrow{X_b(t)} + \overrightarrow{vb}.(\overrightarrow{W}.\overrightarrow{X_A(t)} - \overrightarrow{X_B(t)}), r < p \\ \overrightarrow{vc}.\overrightarrow{X(t)}, r \geq p \end{cases} \quad (۳)$$

که $\overrightarrow{vb}$: یک پارامتر در محدوده [-a , a] است و $\overrightarrow{vc}$ به‌طور خطی از یک تا صفر روند کاهشی دارد. هم‌چنین t: شماره تکرار، $\overrightarrow{X_b}$: مکان با بیش‌ترین غلظت بو که تاکنون یافت شده است و $\vec{X}$: موقعیت کپک مخاطی است. $\overrightarrow{X_A}$ و $\overrightarrow{X_B}$: بیانگر دو نمونه است که به‌صورت تصادفی از کپک مخاطی انتخاب شده‌اند و $\overrightarrow{W}$: وزن کپک مخاطی است. p و $\overrightarrow{vb}$ از روابط (۴) و (۵) و $\overrightarrow{W}$ نیز از رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$p = tanh|S(i) - DF| \quad (۴)$$

$$\overrightarrow{vb} = [-a, a] \rightarrow a = arctanh(-\left(\frac{t}{max_t}\right) + 1) \quad (۵)$$

که $S(i)$: برازندگی $\vec{X}$، DF: بیانگر بهترین برازندگی به‌دست‌آمده در کلیه تکرارها و max_t: حداکثر تکرار است.

$$\overrightarrow{W(SmellIndex(\iota))} = \begin{cases} 1 + r.log\left(\frac{bF - S(i)}{bF - \omega F} + 1\right) & \text{شرایط} \\ 1 - r.log\left(\frac{bF - S(i)}{bF - \omega F} + 1\right) & \text{دیگر} \end{cases} \quad (۶)$$

که "شرایط" بیانگر آن است که رتبه $S(i)$ در نیمه اول جمعیت قرار دارد، r: یک مقدار تصادفی بین ۰ و ۱ است، bF: بهترین مقدار به‌دست‌آمده در تکرار جاری، ωF: بدترین مقدار به‌دست‌آمده در تکرار جاری و $SmellIndex$: نشان‌دهنده دنباله‌ای صعودی از برازندگی‌های به‌دست‌آمده است. برای توصیف به‌روزرسانی موقعیت کپک مخاطی نیز رابطه (۷) ارائه شده است.

$$\overrightarrow{X^*} = \begin{cases} rand.(UB - LB) + LB, rand < z \\ \overrightarrow{X_b(t)} + \overrightarrow{vb}.(W.\overrightarrow{X_A(t)} - \overrightarrow{X_B(t)}), r < p \\ \overrightarrow{vc}.\overrightarrow{X(t)}, r \geq p \end{cases} \quad (۷)$$

که $\overrightarrow{X^*}$: بیانگر موقعیت جدید کپک مخاطی، UB و LB: حدود بالا و پایین محدوده جست‌وجو و $rand$ و r: مقدار تصادفی بین ۰ و ۱ هستند.

این الگوریتم نیز همانند سایر الگوریتم‌های فراابتکاری، با دریافت جمعیت اولیه و حداکثر تکرار، شروع به‌کار می‌کند. پس از آن، موقعیت اولیه کپک مخاطی و در ادامه برازندگی کلیه کپک‌های مخاطی محاسبه می‌شود. در گام بعدی، برازندگی‌های به‌دست آمده، مرتب‌سازی شده و بهترین و بدترین برازندگی به‌روزرسانی می‌شود. سپس وزن براساس روابط ریاضی محاسبه می‌شود. در مرحله آخر نیز بهترین برازندگی و بهترین موقعیت، به‌روزرسانی شده تا به بهترین پاسخ برسد (Li et al., 2020).

در تحقیق مربوط به معرفی این الگوریتم، عملکرد SMA با بررسی ۳۷ مسئله شامل توابع متنوع ریاضی و مسائل مختلف مهندسی اعتبارسنجی شده است؛ که نتایج، بیانگر عملکرد بسیار موفق آن در به‌دست آوردن مقدار بهینه مسائل مختلف در مقایسه با رقبا است. لذا در پژوهش حاضر نیز از این الگوریتم برای بهینه‌یابی تابع هدف استفاده می‌شود.

۲-۲- نشت‌یابی با استفاده از الگوریتم SMA

روش‌های بهینه‌یابی دیگری نیز توسط نصیری دهج (۱۴۰۲) مورد بررسی قرارگرفتند و نتایج نشان داد الگوریتم SMA در بین دیگر روش‌ها در یافتن تک‌نشت موجود در شبکه‌ها عملکرد بهتری دارد. لذا از نتایج آن در تحقیق حاضر استفاده‌شده است. به‌طورکلی الگوریتم SMA در انجام فرآیند نشت‌یابی، روندی مطابق با مراحل زیر دارد.

۱- دریافت جمعیت اولیه و حداکثر تعداد تکرار به‌عنوان ورودی؛

۲- درنظرگرفتن مقدار ضریب نشت گرهی تصادفی (k در رابطه (۱)) برای هر گره (تولید متغیرهای تصادفی اولیه)؛

۳- محاسبه تفاوت فشارهای شبیه‌سازی‌شده و میدانی و محاسبه تابع هدف از طریق رابطه (۲) (محاسبه برازندگی هر جواب)؛

۴- به‌روزرسانی بهترین برازندگی؛

۵- محاسبه وزن کپک مخاطی ($\overrightarrow{W}$) براساس رابطه (۶)؛

۶- به‌روزرسانی پارامترهای p، vc و vb براساس توضیحات بخش ۲-۲؛

۷- تولید ضرایب نشت گرهی جدید (به‌روزرسانی موقعیت کپک مخاطی) با توجه به رابطه (۷)؛

۸- در صورت ارضا نشدن شرایط توقف، به مرحله ۳ بازگشته و روند الگوریتم تکرار می‌شود؛ در غیراین‌صورت، بهینه‌یابی پایان‌یافته و بهترین جواب یافت‌شده، ارائه می‌شود.

فرآیند واسنجی و بهینه‌یابی تابع هدف (رابطه (۱)) در هریک از سناریوها به‌وسیله الگوریتم مذکور، با دریافت مقدار جمعیت اولیه برابر با ۵۰ شروع می‌شود. درصورتی‌که مقدار تابع هدف به صفر همگرا شود، فرآیند به پایان رسیده و نشت‌یابی انجام می‌گیرد. به‌عبارت دیگر، شرایط خاتمه الگوریتم دو مورد شامل ۱- رسیدن به مقدار حداکثر تکرار (۵۰۰ تکرار) و ۲- حاصل‌شدن مقدار صفر برای تابع هدف، درنظر گرفته‌شده است. اگر هریک از شرایط خاتمه رخ دهند، روند الگوریتم متوقف شده و بهترین جواب حاصل ارائه خواهد شد.

تعداد متغیرهای مسئله در هر شبکه برابر با تعداد گره‌های آن شبکه است. برای شبکه پولاکیس، بالرما و هانوی تعداد متغیرها به‌ترتیب برابر با ۳۰، ۴۴۳ و ۳۱ است و حدود بالا و پایین این متغیرها در الگوریتم به‌صورت بازه صفر تا حداکثر مقدار ضریب نشت گرهی تعریف می‌شوند. خلاصه‌ای از مشخصات مسائل نشت‌یابی مورد بررسی، در جدول ۱ ارائه شده است.

به‌منظور افزایش کیفیت پاسخ‌های حاصل از الگوریتم، پارامترهای تنظیم‌کننده جست‌وجوی گسترده (Explore) و جست‌وجوی محلی (Exploit) درالگوریتم SMA تحت تحلیل حساسیت قرارداده شده‌اند. مقادیر مختلف این پارامترها با درنظرگرفتن حدود پیشنهادی توسط Li et al. (2020)، بر روی یکی از شبکه‌ها (بالرما) بررسی شد. سه پارامتر شامل اندازه جمعیت، تعداد تکرار و پارامتر Z به‌عنوان عوامل مؤثر بر عملکرد الگوریتم درنظر گرفته‌شدند. مقادیر جمعیت برابر با ۱۰۰، ۵۰ و ۲۰، تعداد تکرار برابر با ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ و مقدار Z برابر با ۰/۰۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ بر روی یکی از مسائل شبکه بالرما بررسی‌شدند. در این شرایط ۲۷ ترکیب مختلف از پارامترها شکل گرفت که بر روی هرکدام پنج‌بار اجرا انجام‌شد. نتایج نشان‌داد، بهترین عملکرد الگوریتم در جمعیت ۵۰، تکرار ۵۰۰ و Z برابر با ۰/۰۳ حاصل می‌شود. لذا از این مقادیر برای پیش‌برد تحقیق حاضر استفاده شد.

جدول ۱- خلاصه‌ای از مشخصات مسائل نشت‌یابی مورد بررسی

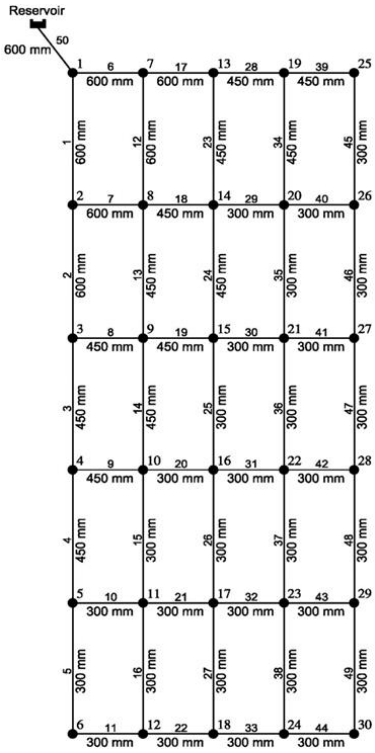
شماره	حداکثر ضریب نشت	شبکه مورد بررسی	تعداد متغیرها	تابع هدف
۱	۱۰/۱۴	پولاکیس	۳۰	رابطه (۲)
۲	۱۱/۲۵			
۳	۶/۰۸			
۴	۹/۱۲			
۵	۶/۷۶			
۶	۱۷/۴۲	بالرما	۴۴۳	
۷	۱۹/۳۶			
۸	۱۰/۴۵			
۹	۱۵/۶۸			
۱۰	۱۱/۶۱			
۱۱	۷۷/۵۲	هانوی	۳۱	
۱۲	۸۶/۱۴			
۱۳	۴۶/۵۱			
۱۴	۶۹/۷۷			
۱۵	۵۱/۶۸			

باتوجه به این‌که الگوریتم‌های فرابتکاری دارای ماهیت تصادفی هستند و معمولاً به نتایج حاصل از یک‌بار اجرای الگوریتم بر روی یک مسئله اکتفا نمی‌شود، در این تحقیق الگوریتم SMA بر روی هر سناریوی وجود نشت تنها یک‌بار اجرا شده است؛ زیرا هدف از این تحقیق، سنجش توانایی این الگوریتم در یافتن دقیق محل تک‌نشت با کم‌ترین هزینه محاسباتی و زمانی است. بنابراین نتایج حاصل از یک بار اجرای الگوریتم بر روی سناریوهای متنوع وجود تک‌نشت در سه شبکه مورد بررسی قرارگرفته‌اند. هم‌چنین باید توجه داشت با بررسی ۳۷ مسئله مجزا و انجام چندین اجرا بر روی آن‌ها، اثبات‌شده که الگوریتم SMA دارای انحراف معیار کوچکی در نتایج بوده و لذا نتایج تک‌اجرای آن تا حد زیادی قابل‌اعتماد است (Li et al., 2020).

۳- شبکه‌های مورد مطالعه

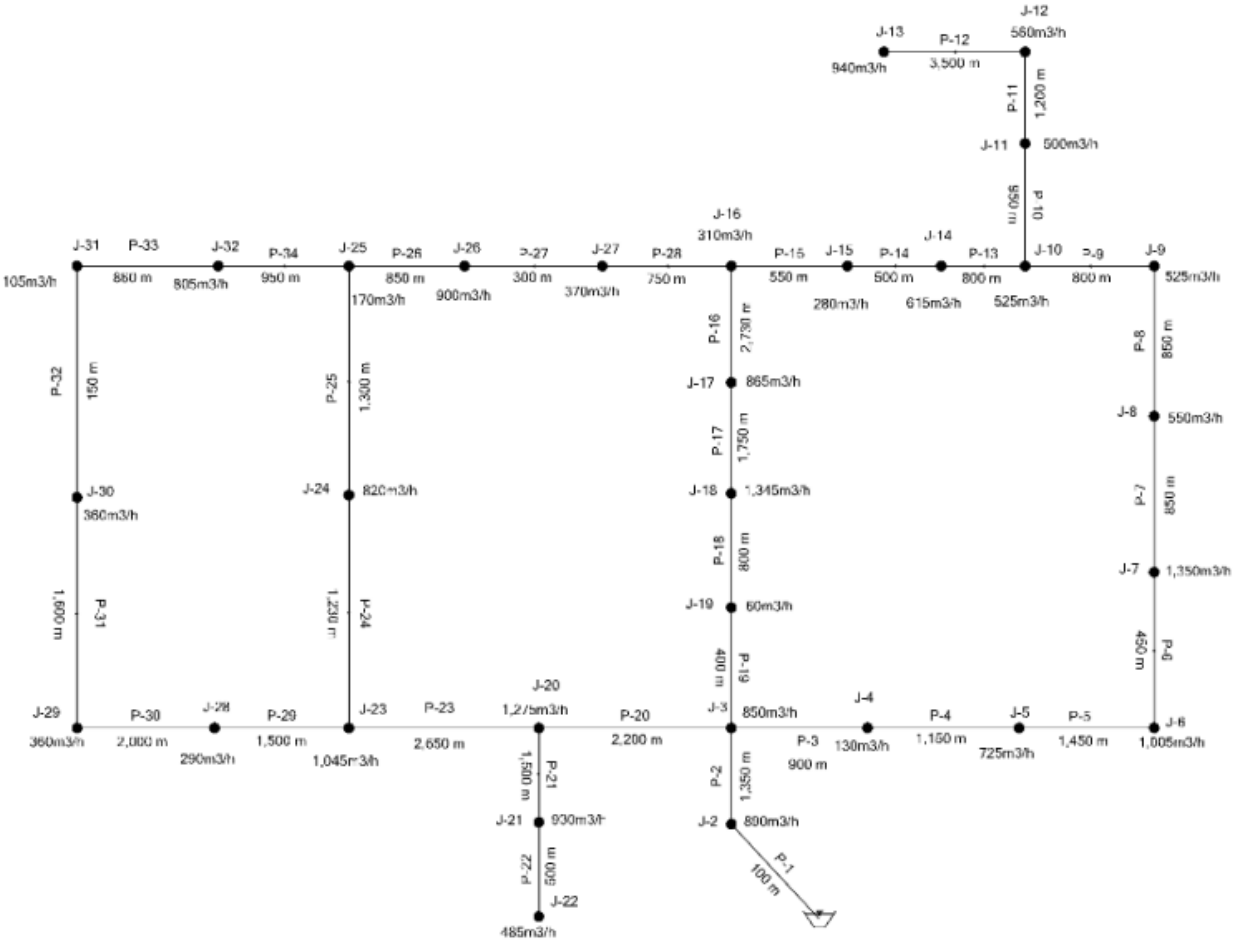
در این مطالعه، از سه شبکه برای بررسی روش پیشنهادی استفاده شده است. اولین شبکه، پولاکیس است که نمای کلی آن در شکل ۲-الف آورده شده است (Poulakis et al., 2003). در این شبکه، طول لوله‌های افقی و عمودی به‌ترتیب برابر ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متر، ضریب هیزن-ویلیامز هر لوله برابر ۱۳۰ بوده و دارای ۲۰ حلقه، ۳۰ گره، ۵۰ لوله و یک مخزن (با ارتفاع سطح آب برابر ۱۰۰ متر) است. دبی متوسط مصرف در کلیه گره‌های این شبکه برابر ۲۵ لیتر بر ثانیه درنظر گرفته‌شده است. در شبکه پولاکیس فرض‌شده است در گره‌های ۱۳، ۱۵ و ۱۸ فشارسنج و در ورودی شبکه دبی‌سنج وجود دارد.

شبکه مورد مطالعه بعدی، شبکه بالرما است که در استان آلمریا (کشور اسپانیا) قراردارد. شبکه بالرما نخستین‌بار توسط Reca and Martínez (2006) ارائه شد. این شبکه دارای چهار مخزن آب، ۴۴۳ گره، ۴۵۴ لوله و ۸ حلقه است. متوسط سالانه دبی مصرف این شبکه برابر ۲۵/۲ میلیون گالن در روز (حدود ۱/۱۵ مترمکعب بر ثانیه) است. در این شبکه نیز در گره‌های ۱۴۵، ۱۸۰، ۳۵۷ و ۳۹۲ فشارسنج و در ورودی‌های شبکه، دبی‌سنج با هدف پایش شبکه قرارگرفته است. شبکه سوم، شبکه هانوی است که نمای کلی آن در شکل ۲-ج مشاهده می‌شود (Fujiwara and Khang, 1990). این شبکه شامل ۳۱ گره، ۳۴ لوله، ۳ حلقه و دارای یک مخزن با رقوم ثابت سطح آب برابر ۱۰۰ متر است. ضرایب هیزن ویلیامز لوله‌ها برابر ۱۳۰ است. در شبکه هانوی نیز برای پایش دبی و فشار در شبکه، فرض شده است در گره‌های ۵، ۱۲ و ۳۰ فشارسنج و در ورودی شبکه دبی‌سنج وجود دارد.



(الف) شبکه پولاکیس

(ب) شبکه بالرما



(ج) شبکه هانوی

شکل ۲- نمای شبکه‌های مورد مطالعه

۴- نتایج و بحث

در پژوهش حاضر، مقدار و محل نشت در هریک از سناریوها به‌صورت تصادفی تعیین و روش پیشنهادی طی ۱۵ سناریوی وجود تک‌نشت در سه شبکه پیاده‌سازی شد. هر سناریو بر روی الگوریتم SMA، با استفاده از یک لپ‌تاپ دارای هفت هسته با سرعت پردازش ۲/۸ گیگاهرتز و ۱۶ گیگ رم، یک‌بار اجرا شد. نتایج حاصل از اجرای سناریوهای مختلف در سه شبکه توزیع آب در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در کلیه سناریوها مقدار تابع هدف در زمان کوتاهی به صفر رسیده است. صفر بودن مقدار تابع هدف بیانگر کیفیت الگوریتم SMA در نشت‌یابی و یافتن مقدار و محل دقیق نشت است. با افزایش تعداد گره‌های شبکه، تعداد متغیرهای مسئله افزایش یافته و مسئله پیچیده‌تر شده است. بنابراین الگوریتم طی تعداد تکرار بیش‌تری توانسته محل نشت را بیابد و مقدار تابع هدف به صفر برسد. درواقع در شبکه بالرما با صرف زمان محاسبات بالاتر و تعداد ارزیابی بیش‌تر تابع هدف، مقدار بهینه مسئله را به‌دست آورده است. درحالی‌که در شبکه‌های پولاکیس و هانوی که به مراتب تعداد گره‌های کم‌تری دارند، همگرایی در تعداد تکرار پایین و با صرف زمان محاسبات کم‌تر صورت گرفته است.

جدول۲- نتایج نشت‌یابی با استفاده از الگوریتم SMA

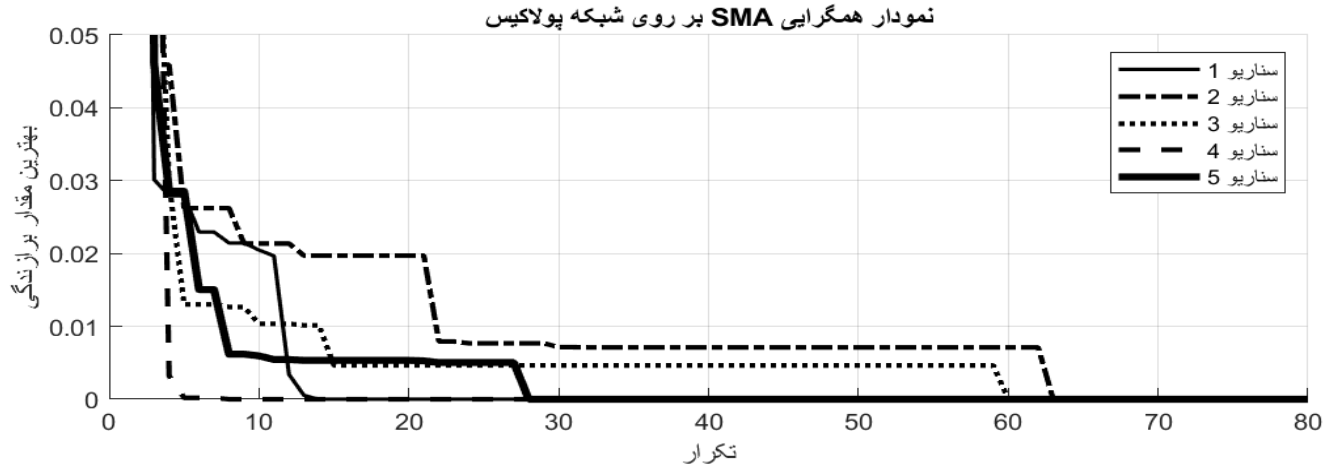
نام شبکه	مشخصات مسئله			مشخصات الگوریتم			نتایج	
	شماره اجرا	گره دارای نشت	مقدار ضریب نشت ($^{0.5}$متر/(ثانیه/لیتر))	تعداد جمعیت	تکرار توقف	تعداد ارزیابی	مقدار تابع هدف	مدت‌زمان اجرا (ثانیه)
پولاکیس	۱	۲۰	۱۰/۱۴	۵۰	۲۵	۱۲۵۰	۰	۲۸
	۲	۹	۱۱/۲۵	۵۰	۶۳	۳۱۵۰	۰	۷۵
	۳	۲۴	۶/۰۸	۵۰	۶۰	۳۰۰۰	۰	۶۸
	۴	۶	۹/۱۲	۵۰	۸	۴۰۰	۰	۱۱
	۵	۲۲	۶/۷۶	۵۰	۲۸	۱۴۰۰	۰	۳۲
بالرما	۱	۴۳	۱۷/۴۲	۵۰	۲۴۳	۱۲۱۵۰	۰	۵۳۶
	۲	۳۵۱	۱۹/۳۶	۵۰	۱۱۴	۵۷۰۰	۰	۱۶۹
	۳	۱۱۴	۱۰/۴۵	۵۰	۱۵۲	۷۶۰۰	۰	۳۱۸
	۴	۴۰۳	۱۵/۶۸	۵۰	۱۱۱	۵۵۵۰	۰	۲۲۷
	۵	۲۰۸	۱۱/۶۱	۵۰	۳۳۷	۱۶۸۵۰	۰	۵۷۹
هانوی	۱	۲	۷۷/۵۲	۵۰	۱۴	۷۰۰	۰	۸
	۲	۷	۸۶/۱۴	۵۰	۲۲	۱۱۰۰	۰	۱۳
	۳	۲۵	۴۶/۵۱	۵۰	۱۰	۵۰۰	۰	۵
	۴	۱۱	۶۹/۷۷	۵۰	۱۳	۶۵۰	۰	۶
	۵	۲۲	۵۱/۶۸	۵۰	۱۲	۶۰۰	۰	۶

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که در شبکه‌های مورد بررسی، هرچه گره دارای نشت، از مخزن دورتر بوده و به‌عبارتی گره دارای نشت به انتهای شبکه نزدیک‌تر باشد، به‌دلیل افزایش افت‌های ناشی از طول مسیر، عمل نشت‌یابی سریع‌تر انجام شده و الگوریتم بهتر توانسته است محل و مقدار نشت را بیابد. متفاوت‌بودن مقدار نشت در هریک از سناریوها و عملکرد موفق الگوریتم در یافتن نشت در کلیه سناریوها، بیانگر آن است که کوچک و یا بزرگ بودن مقدار نشت تأثیر قابل‌توجهی در سرعت و دقت نشت‌یابی با استفاده از روش پیشنهادی در این تحقیق ندارد.

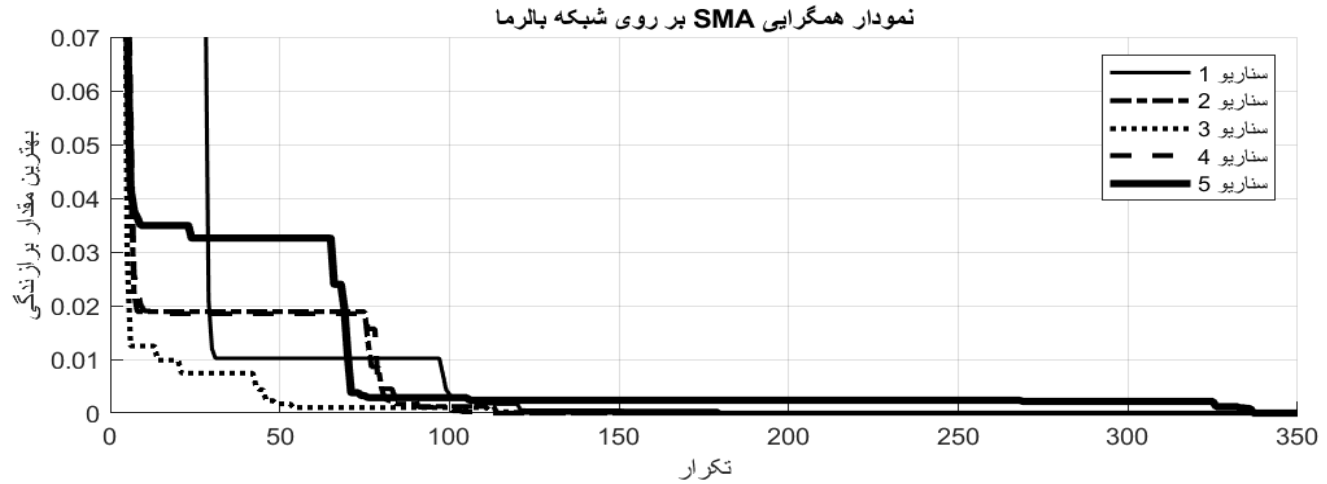
به‌طورکلی با استناد به نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی سه شبکه مختلف با شرایط متفاوت می‌توان دریافت، روش مذکور مستقل از تعداد گره‌ها، شرایط شبکه، محل و مقدار نشت عمل می‌کند و تحت هر شرایطی قادر به یافتن مقدار و محل نشت به‌طور دقیق و با سرعت قابل‌قبول است. ولی باید توجه داشت حجم محاسباتی الگوریتم با افزایش تعداد گره‌های شبکه رابطه مستقیم، و با افزایش فاصله نشت از مخازن

رابطه عکس دارد.

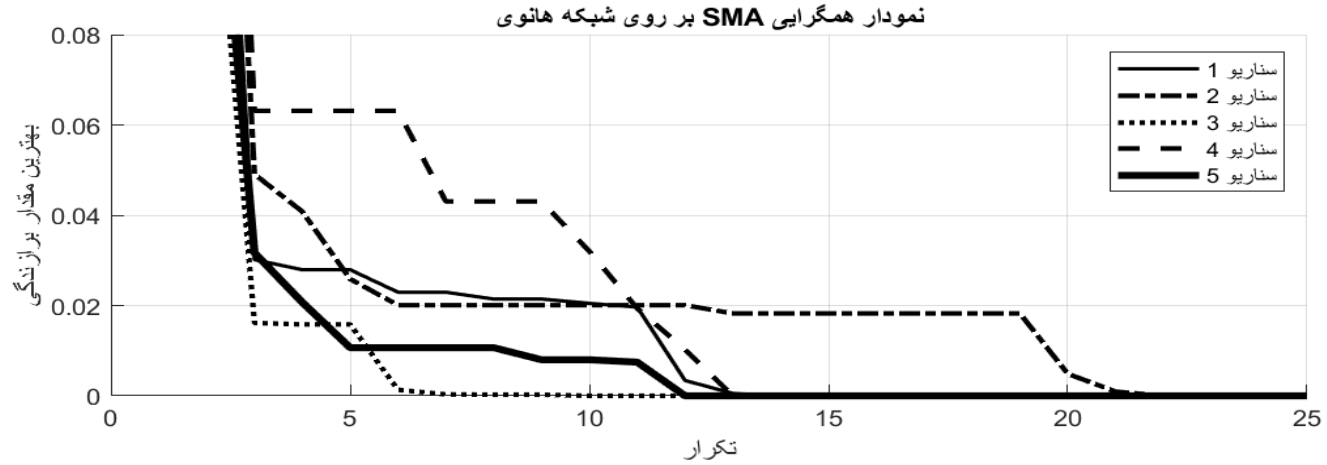
در شکل‌های ۳ الی ۵، نمودار همگرایی ۱۵ سناریو در سه شبکه یادشده نشان داده شده است. با استناد به این نتایج می‌توان دریافت در کلیه سناریوهای اجراشده بر روی شبکه هانوی، به‌علت کوچک بودن ابعاد شبکه، همگرایی به‌سرعت صورت گرفته است. درحالی‌که در شبکه بالرما به‌علت وسعت شبکه و تعداد زیاد گره‌ها، همگرایی طی تعداد تکرار بیش‌تری از روند الگوریتم انجام‌شده است. اما به‌طورکلی، در هر سه شبکه عملیات واسنجی-بهینه‌یابی با استفاده از الگوریتم SMA به‌طور دقیق و با تعداد ارزیابی مناسب انجام‌شده است.



شکل۳- نمودار همگرایی الگوریتم SMA طی ۵ سناریو بر روی شبکه پولاکیس

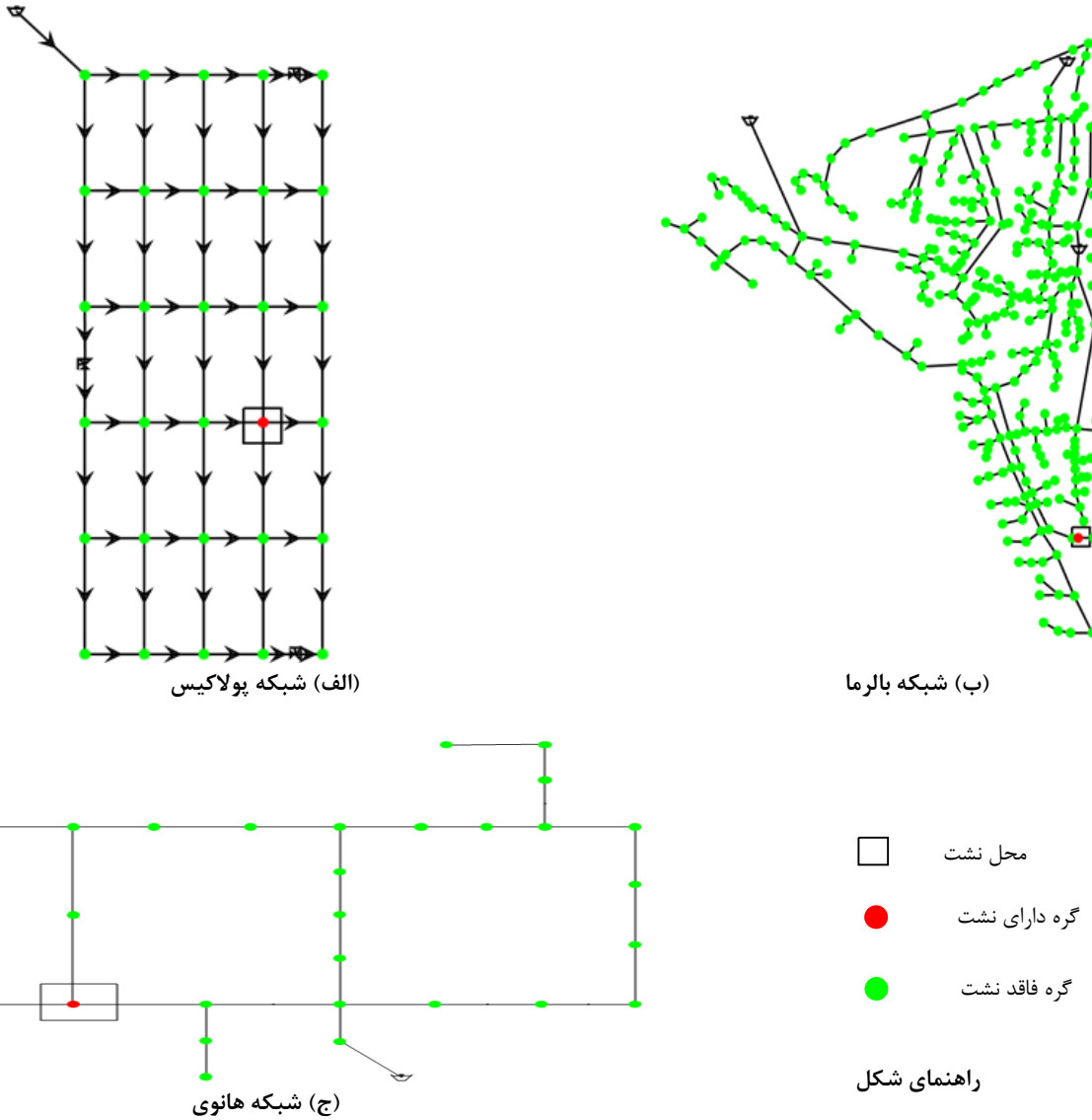


شکل۴- نمودار همگرایی الگوریتم SMA طی ۵ سناریو بر روی شبکه بالرما



شکل۵- نمودار همگرایی الگوریتم SMA طی ۵ سناریو بر روی شبکه هانوی

در شکل ۶ برای هریک از شبکه‌ها، شمایی از نتایج حاصل از نشت‌یابی به‌روش مذکور برای یک سناریو به‌عنوان نمونه (سناریوهای شماره ۱، ۱ و ۵ به‌ترتیب در شبکه پولاکیس، بالرما و هانوی) آورده شده است. در این شکل‌ها نماد مربع، بیانگر محل نشت درنظرگرفته‌شده طی سناریوی مورد نظر؛ گره دارای رنگ قرمز، بیانگر محل نشت یافت‌شده توسط روش پیشنهادی و گره‌های دارای رنگ سبز، بیانگر عدم وجود نشت هستند که توسط الگوریتم تشخیص داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، عمل نشت‌یابی توسط روش ارائه‌شده در پژوهش حاضر، بدون خطا صورت گرفته است و محل نشت درنظرگرفته‌شده و نشت تشخیص داده‌شده توسط روش پیشنهادی، بر یکدیگر منطبق هستند. با توجه به نتایج حاصل از یافتن نشت موجود در شبکه‌ها با استفاده از الگوریتم SMA و دقت این الگوریتم در مسائل نشت‌یابی، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی عملکرد این الگوریتم در شبکه‌های آب‌رسانی دارای بیش از یک نشت نیز مورد ارزیابی قرارگیرد.



(الف) شبکه پولاکیس

(ب) شبکه بالرما

(ج) شبکه هانوی

شکل۶- نمایش تصویری نشت‌یابی توسط روش پیشنهادی

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک روش جدید برای تعیین مقدار و محل وقوع نشت در شبکه‌های توزیع آب پیشنهاد شد. در روش ارائه‌شده، محل نشت‌های مخفی با استفاده از روش واسنجی-بهینه‌یابی یافت می‌شود. سناریوهای وجود نشت به‌صورت تصادفی تعریف شده و از الگوریتم SMA برای بهینه‌یابی تابع هدف استفاده شد. کارایی روش پیشنهادی در سه شبکه توزیع آب با ابعاد متفاوت طی ۱۵ سناریوی وجود تک‌نشت مورد بررسی قرارگرفت. نتایج نشان‌داد این روش در یافتن تک‌نشت موجود در شبکه‌ها، عملکرد

بسیار مناسبی دارد و قادر به یافتن محل و مقدار نشت به‌طور دقیق است. در شبکه بالرما به‌طور میانگین طی ۱۹۱ تکرار و صرف ۳۶۶ ثانیه زمان، الگوریتم به همگرایی رسیده و عمل نشت‌یابی انجام گرفته است. درحالی‌که در شبکه هانوی به‌علت کوچک بودن ابعاد شبکه و کم‌تر بودن تعداد گره‌ها به‌طور میانگین طی ۱۴ تکرار و صرف ۷ ثانیه زمان، همگرایی صورت گرفته است. زمانی که محل نشت در موقعیتی دورتر از ورودی شبکه باشد، تشخیص نشت توسط الگوریتم به‌دلیل افزایش افت‌های ناشی از طول مسیر، ساده‌تر بوده و طی تعداد تکرار کم‌تری، الگوریتم به نتیجه مطلوب می‌رسد. نشت‌یابی با استفاده از روش مذکور، مستقل از ابعاد و شرایط شبکه، مقدار و محل نشت بوده و تحت هر شرایطی محل و مقدار تک‌نشت موجود با دقت مناسبی تشخیص داده می‌شود. به‌طورکلی با استناد به نتایج حاصل با استفاده از ظرفیت این الگوریتم فراابتکاری قدرتمند، نشت موجود در شبکه را با دقت بسیار بالا و با صرف کم‌ترین زمان می‌توان یافت و برای رفع آن اقدام نمود.

۶- مراجع

بوستانی، آ.، و خداشناس، س.، (۱۳۹۴)، "بررسی روش نشت‌یابی در شبکه آب تحت‌فشار برمبنای رابطه فشار-نشت (ارائه کد بهینه‌یابی مکان‌یابی نشت)"، *آب و توسعه پایدار*، ۱۰(۱)، ۵۹-۶۶.

شکفته، م.، جلیلی قاضی‌زاده، م.، و یزدی، ج.، (۱۳۹۹)، "تئوری شناسایی محدوده نشت در نواحی مجزای شبکه‌های توزیع آب با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی"، *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۶(۳)، ۴۷-۶۲.

مغربی، ف.، حسن‌زاده، ی.، و یزدانی، س.، (۱۳۹۰)، "کالیبراسیون مدل‌های شبکه توزیع آب شهری با استفاده از روش بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها"، *آب و فاضلاب*، ۲۴(۱)، ۱۰۱-۱۱۱.

نصیری دهج، م.، (۱۴۰۲)، "یافتن محل شکستگی در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از تحلیل داده‌های فشار"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

Bardhan, A., and Asteris, P.G., (2023), "Application of hybrid ANN paradigms built with nature inspired meta-heuristics for modelling soil compaction parameters", *Journal* of *Transportation Geotechnics*, 41, 100995, https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.100995.

Capelo, M., Brentan, B., Monteiro, L., and Covas, D., (2021), "Near–real time burst location and sizing in water distribution systems using Artificial Neural Networks", *Water*, 13(13), 1841, https://doi.org/10.3390/w13131841.

Chakraborty, A., and Ray, S., (2023), "Operational cost minimization of a microgrid with optimum battery energy storage system and plug-in-hybrid electric vehicle charging impact using slime mould algorithm", *Energy*, 278, 127842, https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127842.

Eliades, D.G., Kyriakou, M., Vrachimis, S., and Polycarpou, M.M., (2016), "EPANET-MATLAB toolkit: An open-source software for interfacing EPANET with MATLAB", *Proceedings of 14th International Conference on Computing and Control for the Water Industry (CCWI2016)*, Amsterdam, The Netherlands و (pp. 7-9)

El-zahab, S., and Zayed, T., (2019), "Leak detection in water distribution networks: An introductory overview", *Smart Water*, 4(1), 1-23, https://doi.org/10.1186/s40713-019-0017-x.

Farhat, M., Kamel, S., Atallah, A.M., Abdelaziz, A.Y., and Tostado-Veliz, M., (2023), "Developing a strategy based on weighted mean of vectors (INFO) optimizer for optimal power flow considering uncertainty of renewable energy generation", *Neural Computing and Applications*, 35(19), 13955-13981, https://doi.org/10.1007/s00521-023-08427-x.

Fujiwara, O., and Khang, D.B., (1990), "A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks", *Water Resources Research*, 26(4), 539-549, https://doi.org/10.1029/wr026i004p00539.

Hajibandeh, E., and Nazif, S., (2018), "Pressure zoning approach for leak detection in water distribution systems based on a multi objective ant colony optimization", *Water Resources Management*, 32(7), 2287-2300, https://doi.org/10.1007/s11269-018-1929-1.

Hu, X., Han, Y., Yu, B., Geng, Z., and Fan, J., (2021), "Novel leakage detection and water loss management of urban water supply network using multiscale neural networks", *Cleaner Production*, 278, 123611, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123611.

Li, S., Chen, H., Wang, M., Heidari, A.A., and Mirjalili, S., (2020), "Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization", *Future Generation Computer Systems*, 111, 300-323, https://doi.org/10.1016/j.future.2020.03.055.

Lijuan, W., Hongwei, Z., and Hui, J., (2012), "A leak detection method based on EPANET and genetic algorithm in water distribution systems", In: *Software Engineering and Knowledge Engineering: Theory and Practice*, 1, 459-465, https://doi.org/10.1007/978-3-642-03718-4_57.

Maghrebi, M.F., Aghaebrahimi, M.R., Taherian, H., and Attari, M., (2014), "Determining the amount and location of leakage in water supply networks using a neural network improved by the Bat optimization algorithm", *Civil Engineering and Urbanism*, 4(3), 322-327.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.

Marzola, I., Mazzoni, F., Alvisi, S., and Franchini, M., (2022), "Leakage detection and localization in a water distribution network through comparison of observed and simulated pressure data", *Water Resources Planning and Management*, 148(1), 04021096, https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001503.

Moasheri, R., and Jalili-Ghazizadeh, M., (2020), "Locating of probabilistic leakage areas in water distribution networks by a calibration method using the imperialist competitive algorithm", *Water Resources Management*, 34(1), 35-49, https://doi.org/10.1007/s11269-019-02388-4.

Perez-Perez, E., Lopez-Estrada, F.R., Valencia-Palomo, G., Torres, L., Puig, V., and Mina-Antonio, J., (2021), "Leak diagnosis in pipelines using a combined artificial neural network approach", *Control Engineering Practice*, 107, 104677, https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104677.

Poulakis, Z., Valougeorgis, D., and Papadimitriou, C., (2003), "Leakage detection in water pipe networks using a Bayesian probabilistic framework", *Probabilistic Engineering Mechanics*, 18(4), 315-327, https://doi.org/10.1016/s0266-8920(03)00045-6.

Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D., and Koppel, T., (2010), "A review of methods for leakage management in pipe networks", *Urban Water Journal*, 7(1), 25-45, https://doi.org/10.1080/15730621003610878.

Reca, J., and Martinez, J., (2006), "Genetic algorithms for the design of looped irrigation water distribution networks", *Water Resources Research*, 42(5), 1-9, https://doi.org/10.1029/2005WR004383.

Sousa, J., Ribeiro, L., Muranho, J., and Marques, A.S., (2015). "Locating leaks in water distribution networks with simulated annealing and graph theory", *Journal of Procedia Engineering*, 119, 63-71, https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.854.

Wachla, D., Przystalka, P., and Moczulski, W., (2015), "A method of leakage location in water distribution networks using artificial neuro-fuzzy system", *IFAC-PapersOnLine*, 48, 1216-1223, https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.692.

Wan, X., Kuhanestani, P.K., Farmani, R., and Keedwell, E., (2022), "Literature review of data analytics for leak detection in water distribution networks: A focus on pressure and flow smart sensors", *Water Resources Planning and Management*, 148(10), 03122002, https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001597.

Wu, Z.Y., and Sage, P., (2008), "Water loss detection via genetic algorithm optimization-based model calibration", *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*, pp. 1-11, Cincinnati, Ohio, USA, August 27-30, https://doi.org/10.1061/40941(247)180.