

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، رضا معاشری^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
maryam_nasiri@civileng.iust.ac.ir

۲- دانشیار دانشگاه شهید بهشتی، گروه آب و محیط زیست، دانشکده عمران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران (نویسنده مسئول)
m_jalili@sbu.ac.ir

۳- استاد دانشگاه علم و صنعت، گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران jabbari@iust.ac.ir

۴- دانشجوی دکترای دانشگاه شهید بهشتی، گروه آب و محیط زیست، دانشکده عمران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
r_moasheri@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۹

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۸/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۶

چکیده

وقوع نشت در سامانه‌های آبرسانی علاوه بر هدر رفت آب، باعث افزایش هزینه‌های بهره‌برداری و همچنین ورود آلودگی به شبکه می‌گردد. از این رو یافتن نشت چالشی مهم برای شرکت‌های آب و فاضلاب است. اکثر روش‌های مرسوم نشت‌یابی، مستلزم صرف زمان و هزینه‌ی بالا برای یافتن نشت می‌باشند. در مقاله حاضر، یک روش واسنجی-بهینه‌یابی با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری جدید SMA ارائه شده است. روش پیشنهادی بر اساس مقایسه داده‌های فشار یا دبی شبیه‌سازی شده در مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی، محل نشت را برآورد می‌کند. این روش در ۱۵ سناریوی مختلف وجود تک نشت در سه شبکه توزیع آب پیاده‌سازی شد. محل و مقدار نشت در تمامی سناریوها به‌صورت خودکار تعیین گردید. نتایج نشان داد روش ارائه شده 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 سریعاً به همگرایی رسیده و عمل نشت‌یابی به دقت انجام گرفته است. با استناد به نتایج حاصله، با استفاده از این الگوریتم فرا ابتکاری پیشنهادی قدرتمند، نشت موجود در شبکه‌های آب را با دقت بسیار بالا می‌توان یافت.

واژه‌های کلیدی: نشت‌یابی، بهینه‌یابی، الگوریتم‌های فرا ابتکاری، شبکه‌های توزیع آب، واسنجی.

Leakage Detection and localization in Water Distribution Networks Using SMA

Maryam Nasiri Dahaj¹, Mohammadreza Jalili Ghazizadeh*², Ebrahim Jabbari³, Reza Moasheri⁴

1- Msc. Student, Iran University of Science and Technology, Maryam_nasiri@civileng.iust.ac.ir

2- Associate Professor, Shahid Beheshti University, (Corresponding author), m_jalili@sbu.ac.ir

3- Professor, Iran University of Science and Technology, jabbari@iust.ac.ir

4- Ph.D. Student, Shahid Beheshti University, r_moasheri@sbu.ac.ir

Received: 08/04/2023

Revised: 25/10/2023

Accepted: 28/10/2023

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.

شبکه‌های توزیع آب از جمله زیر ساخت‌های مهم شهری هستند که نقشی اساسی را در تامین آب با فشار کافی و کیفیت مناسب ایفا می‌کنند. اکثر شبکه‌های توزیع آب در کشورهای توسعه‌یافته، دهه‌ها قبل ساخته شده‌اند و در حال حاضر علاوه بر قدمت اجزای شبکه، به دلایلی همچون کیفیت پایین مواد اولیه، عدم انجام دوره‌های تعمیر و نگهداری به‌طور مداوم، خوردگی تاسیسات و فشار بالای سامانه با هدر رفت آب مواجه هستند (Capelo et al., 2021). علت اصلی هدر رفت آب در شبکه‌های آبرسانی، وقوع نشت می‌باشد که تقریباً ۷۰ درصد از کل هدر رفت 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 درصد گزارش شده است درحالیکه در برخی از کشورهای در حال توسعه این مقدار به بیش از ۵۰ درصد نیز می‌رسد (Puust et al., 2010).

بطور کلی وجود نشت در شبکه‌های توزیع آب باعث کاهش کیفیت آب به دلیل افزایش احتمال ورود آلودگی، کاهش فشار، اتلاف انرژی و افزایش هزینه‌ها می‌گردد از این رو تشخیص به‌موقع نشت و اقدام برای رفع آن چالش اصلی شرکت‌های خدمات آبرسانی می‌باشد. روش‌های متنوعی جهت شناسایی نشت (ها) وجود دارد که بنابر طبقه‌بندی مرسوم، روش‌های نشت‌یابی به دو گروه اصلی "فیزیکی" و "شبه‌سازی-میدانی" طبقه‌بندی می‌شوند. نشت‌یابی فیزیکی خود به دو دسته‌ی روش‌های صوتی و غیرصوتی تقسیم‌بندی می‌شود. روش‌های صوتی شامل روش‌هایی مانند میله‌های شنیداری و دستگاه ارتباط دهنده نشت و صدا است. روش‌های غیرصوتی نیز شامل روش‌هایی مانند استفاده از گاز ردیاب و ترموگرافی است (Wan et al., 2022).

نشت‌یابی می‌تواند با به‌کارگیری روش‌های فیزیکی با دقت نسبتاً مناسبی انجام شود اما این امر مستلزم استفاده از تجهیزات خاص و پیشرفته است. همچنین عوامل دیگری همچون زمان بر بودن، نیاز به نیروی متخصص، هزینه بر بودن و وجود محدودیت‌های خاص هر روش باعث شده است که در سال‌های اخیر به روش‌های غیرفیزیکی از جمله روش‌های شبه‌سازی-میدانی توجه ویژه‌ای شود. از جمله روش‌های شبه‌سازی-میدانی به انجام فرآیند واسنجی-بهبندی 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 بر مبنای آن، مقدار و موقعیت نشت در گره‌های شبکه با استفاده از واسنجی هیدرولیکی توسط الگوریتم ژنتیک و کلونی مورچه‌ها انجام می‌شود. نتایج نشان داد که الگوریتم کلونی مورچه‌ها با تعداد برداشت فشارسنجی کمتری به نتیجه می‌رسد. الگوریتم ژنتیک در برخی مواقع پاسخ غیر صحیح را گزارش می‌کند و به‌صورت کلی الگوریتم کلونی مورچه‌ها عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک در یافتن نشت‌های شبکه دارد. در تحقیق دیگری (Maghrebi et al. (2014 روشی برای تعیین مقدار و محل نشت با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی بهبود یافته با الگوریتم خفاش را 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 جهت شناسایی نشت در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم شبه‌سازی تبرد و نظریه گراف پیشنهاد دادند. تابع هدف در این پژوهش، مجموع قدر مطلق اختلاف فشارهای میدانی و فشارهای شبه‌سازی شده می‌باشد 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 زیر ناحیه تقسیم می‌گردد و سپس به تعداد زیر ناحیه‌ها، از طبقه بند کننده‌های فازی-عصبی، برای شناسایی نشت در هر ناحیه استفاده می‌گردد. این روش در تعیین محل نشت‌های شبکه آبرسانی در لهستان به کار برده شد و نتایج خروجی نشان‌دهنده رضایت از این روش است. (Hajibandeh and Nazif (2018 روشی را با عنوان روش منطقه بندی 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 قرار گرفت. م. شکفته و همکاران (۲۰۲۰) تحقیقی جهت یافتن نشت با استفاده از تئوری گراف و شبکه عصبی و نتایج فشارسنجی، نشت در هر ناحیه تخمین زده می‌شود. (Moasheri and Jalili-Ghazizadeh (2020 روشی جهت 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، به کمینه کردن اختلاف فشار و دبی‌های اندازه‌گیری و شبه‌سازی شده، پرداخته شده می‌شود. (Hu et al. (2021 روش جدیدی جهت نشت‌یابی شبکه‌های آبرسانی پیشنهاد دادند. در این روش، ابتدا شبکه آب توسط الگوریتم خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی، به چندین ناحیه تقسیم می‌گردد. در ادامه توسط شبکه‌های عصبی پیچشی کامل دارای چند مقیاس، به یافتن محدوده‌های دارای نشت پرداخته می‌شود. روش پیشنهادی با روش‌هایی از قبیل ماشین بردار پشتیبان مورد مقایسه قرار گرفت و نتایج حاکی از برتری آن نسبت به سایر

روش‌ها است. از دیگر پژوهش‌های انجام شده پیرامون روش شبیه‌سازی- میدانی می‌توان به مقالات (Lijuan et al. (2012)، بوستانی و خدانشناس (۱۳۹۴)، (Pérez-Pérez et al. (2021) و Marzola et al. (2022) اشاره نمود.

بسیاری از پژوهش‌های انجام شده پیرامون موضوع نشت‌یابی با استفاده از روش شبیه‌سازی-میدانی، بر روی یک شبکه پیاده‌سازی شده‌اند درحالی‌که جهت اطمینان از عملکرد روش، باید از شبکه‌های مختلف و مقادیر متفاوت نشت استفاده گردد. قابل ذکر است که در اکثر تحقیقات صورت گرفته، نشت به عنوان مصرف اضافی در گره در نظر گرفته شده‌است که در واقع در نظر گرفتن یک دبی ثابت برای نشت صحیح نمی‌باشد و بهتر است مقدار نشت به گونه‌ای در نظر گرفته شود که حتما وابسته به فشار باشد. همچنین استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی مستلزم در دسترس بودن داده‌های فراوان جهت آموزش شبکه عصبی می‌باشد. اگر چنانچه در مرحله آموزش، مقدار و دقت داده‌ها در حد کافی نباشند باعث ایجاد نتیجه نامطلوب خواهند شد. در پژوهش حاضر سعی شده‌است تا حدی محدودیت‌ها و مشکلات تحقیقات پیشین پوشش داده‌شود و روش جدیدی برای تعیین مقدار و محل دقیق نشت در شبکه‌های توزیع آب ارائه شود. در روش پیشنهاد شده، نشت به صورت تابعی از فشار و ضریب نشت گرهی در سه شبکه معروف پولاکیس، هانوی و بالرما در نظر گرفته می‌شود. در ادامه با استفاده از الگوریتم جدید Slime Mould Algorithm که اخیراً توسعه داده شده است و به واسطه اعتبارسنجی‌های انجام شده برای آن در مقاله‌ی مربوطه، عملکرد بسیار خوبی در حل مسائل پیچیده‌ی بهینه‌یابی دارد، به واسنجی شبکه و یافتن نشت پرداخته می‌شود (Li et al., 2020). الگوریتم مذکور در زمینه‌های مختلف علوم و مهندسی به کار گرفته شده و عملکرد آن در حوزه‌های متنوع بررسی شده‌است. (Chakraborty and Ray (2023) با استفاده از الگوریتم SMA به کمینه سازی هزینه‌ی یک ریزش‌بنکه پرداختند. 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 از نمونه دیگری از تحقیقات انجام شده 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 و سپس مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی به اجزای آن‌ها اختصاص داده می‌شود. تحلیل شبکه‌ها بر اساس نرم‌افزار ایپانت انجام می‌شود که این نرم‌افزار از روش گرادیان برای تحلیل شبکه‌های آبرسانی استفاده می‌کند. در مطالعه حاضر، نشت‌ها به صورت مبتنی بر فشار و تقاضاها به صورت ثابت در نظر گرفته می‌شوند. در گام بعدی، سناریوهای وجود نشت در شبکه‌ها بصورت تصادفی و خودکار تعریف شده‌اند. بدین معنا که فرض می‌گردد در هر شبکه ۵ سناریوی وجود تک نشت با مقادیری در حدود ۵ تا ۱۰ درصد دبی ورودی به شبکه و در گره‌های تصادفی وجود دارد. نشت با توجه 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 به عنوان داده‌های میدانی برداشت می‌شوند. همچنین فرض بر این است که در هر سه شبکه مورد بررسی، فشارهای موجود از فشار استاندارد کم‌تر نمی‌باشد.

$$Q = KP^\alpha \quad (1)$$

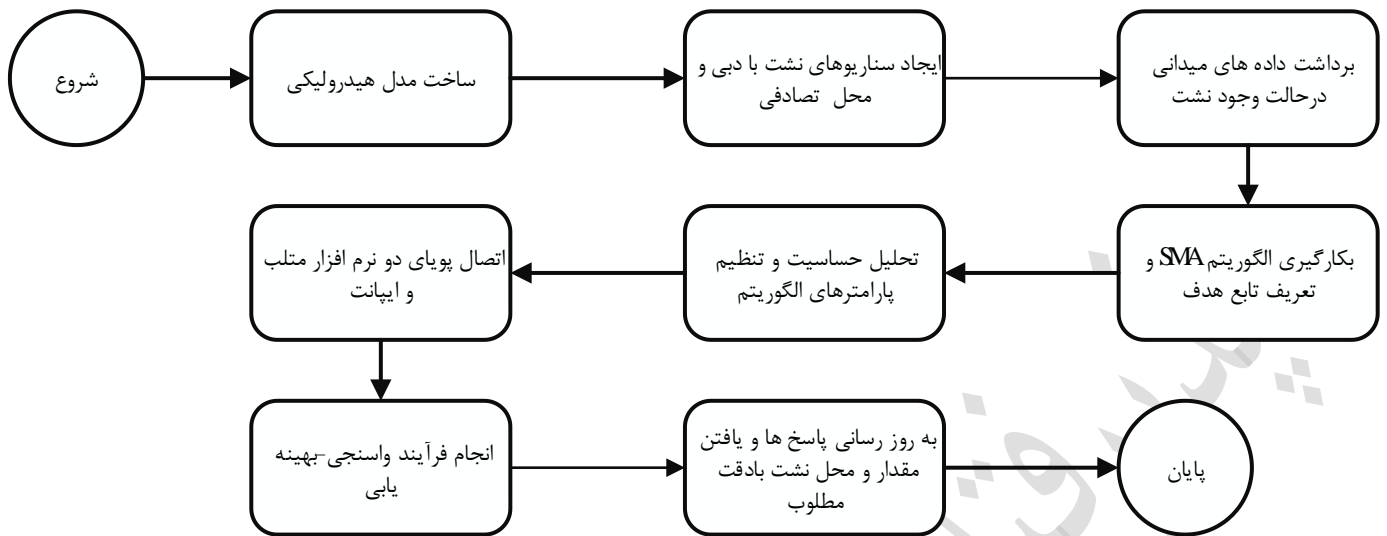
در رابطه فوق، Q مقدار دبی نشت، K مقدار ضریب نشت گرهی، P مقدار فشار موجود در شبکه در حالت وجود نشت و α توان فشار می‌باشد.

الگوریتم SMA با تعریف تابع هدفی که در رابطه شماره ۲ آورده شده‌است، در محیط نرم افزار متلب کد نویسی شد و پارامترهای الگوریتم با انجام تحلیل حساسیت تعیین گردید. سپس جهت ارتباط بین دو نرم افزار متلب و ایپانت از یک ابزار جانبی که نخستین بار توسط (Eliades et al. (2016) معرفی شد، استفاده گردید. در گام آخر، واسنجی مدل هیدرولیکی شبکه‌ها و بهینه‌یابی تابع هدف تعریف شده انجام می‌پذیرد و در نهایت محل و مقدار نشت مشخص می‌گردد. فلوچارت روند روش پیشنهادی در شکل شماره ۱ ارائه شده‌است.

$$f(x) = \text{Minimize} \left(\frac{\sum_{nh=1}^{NH} \left| \frac{Hsim_{nh} - Hobs_{nh}}{Hobs_{nh}} \right| + \sum_{nf=1}^{NF} \left| \frac{Fsim_{nf} - Fobs_{nf}}{Fobs_{nf}} \right|}{NH + NF} \right) \quad (2)$$

در رابطه فوق $f(x)$ تابع هدف، nh شمارشگر فشارسنج‌های شبکه، NH تعداد کل فشارسنج‌های شبکه، Hsim_{nh} تراز هیدرولیکی شبیه سازی شده توسط نرم افزار در گره دارای فشار سنج nh ام، Hobs_{nh} تراز هیدرولیکی مشاهداتی در گره دارای فشارسنج nh ام، nf شمارشگر دبی سنج

های شبکه، NF تعداد کل دبی سنج های شبکه، Fsim_{nf} دبی جریان شبیه سازی شده توسط نرم افزار در لوله ی دارای دبی سنج nf ام، Fobs_{nf} دبی اندازه گیری شده میدانی در لوله دارای دبی سنج nf ام می باشد.



شکل ۱- فلوچارت روند روش پیشنهادی جهت یافتن نشت

۲-۱- معرفی الگوریتم SMA

ایده ی اصلی این الگوریتم، بر اساس رفتار نوسانی کپک مخاطی در طبیعت می باشد. در واقع ایده این الگوریتم عمدتاً رفتار و تغییرات مورفولوژیکی کپک مخاطی در جستجوی علوفه را شبیه سازی می کند. الگوریتم SMA از وزن های تطبیقی برای شبیه سازی فرآیند تولید بازخورد مثبت و منفی موج انتشار کپک مخاطی مبتنی بر موج بیولوژیکی استفاده می کند تا مسیر بهینه برای اتصال مواد غذایی را با توانایی جست و جوی بالای خود فراهم کند. کپک مخاطی می تواند با توجه به بوی موجود در هوا به غذا نزدیک شود. برای بیان این رفتار به شکل ریاضی، روابط زیر پیشنهاد شده است:

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}_b(t) + \vec{vb} \cdot (\vec{W} \cdot \vec{X}_A(t) - \vec{X}_B(t)), & r < p \\ \vec{vc} \cdot \vec{X}(t), & r \geq p \end{cases} \quad (3)$$

که در آن \vec{vb} یک پارامتر در محدوده $[-a, a]$ می باشد و \vec{vc} به طور خطی از یک تا صفر روند کاهشی دارد. همچنین t بیانگر شماره تکرار، \vec{X}_b مکان با بیشترین غلظت بو که تاکنون یافت شده است و \vec{X} موقعیت کپک مخاطی می باشند. \vec{X}_A و \vec{X}_B نیز بیانگر دو نمونه است که به صورت تصادفی از کپک مخاطی انتخاب شده اند و \vec{W} وزن کپک مخاطی می باشد. همچنین p و \vec{vb} دارای روابطی به شرح زیر هستند:

$$p = \tanh|S(i) - DF| \quad (4)$$

$$\vec{vb} = [-a, a] \rightarrow a = \operatorname{arctanh}\left(-\left(\frac{t}{\max_t}\right) + 1\right) \quad (5)$$

در این رابطه، $S(i)$ بیانگر برازندگی \vec{X} ، DF بیانگر بهترین برازندگی بدست آمده در کلیه تکرارها و \max_t حداکثر تکرار می باشد.

رابطه \vec{W} نیز در زیر آمده است:

$$\vec{W}(\operatorname{SmellIndex}(i)) = \begin{cases} 1 + r \cdot \log\left(\frac{bF - S(i)}{bF - \omega F} + 1\right) & , \text{ شرایط} \\ 1 - r \cdot \log\left(\frac{bF - S(i)}{bF - \omega F} + 1\right) & , \text{ دیگر} \end{cases} \quad (6)$$

که در آن "شرایط" بیانگر آن است که رتبه $S(i)$ در نیمه اول جمعیت قرار دارد، r یک مقدار تصادفی بین ۰ و ۱ می باشد، bF بهترین مقدار بدست آمده در تکرار جاری، ωF بدترین مقدار بدست آمده در تکرار جاری و $\operatorname{SmellIndex}$ نشان دهنده دنباله ای صعودی از برازندگی های بدست آمده می باشد. جهت توصیف به روز رسانی موقعیت کپک مخاطی نیز رابطه ی ریاضی زیر ارائه شده است:

$$\vec{X}^* = \begin{cases} \text{rand.}(UB - LB) + LB, \text{rand} < z \\ \vec{X}_b(t) + \text{vb.}(\overline{W} \cdot \vec{X}_A(t) - \vec{X}_B(t)), r < p \\ \vec{vc.} \vec{X}(t), r \geq p \end{cases}$$

در رابطه ۷، \vec{X}^* بیانگر موقعیت جدید کپک مخاطی، UB و LB حدود بالا و پایین محدوده‌ی جست‌وجو، rand و r مقدار تصادفی بین ۰ و ۱ هستند.

این الگوریتم نیز همانند سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری، با دریافت جمعیت اولیه و حداکثر تکرار، شروع به کار می‌کند. پس از آن موقعیت اولیه کپک مخاطی و در ادامه برازندگی کلیه کپک‌های مخاطی محاسبه می‌شود. در گام بعدی، برازندگی‌های بدست آمده مرتب سازی شده و بهترین و بدترین برازندگی به‌روز رسانی می‌شود. سپس وزن براساس روابط ریاضی محاسبه می‌شود. در مرحله آخر نیز بهترین برازندگی و بهترین موقعیت به‌روز رسانی شده تا به بهترین پاسخ دست یافته‌شود (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 شده‌است؛ که نتایج بیانگر عملکرد بسیار موفق آن در بدست آوردن مقدار بهینه مسائل مختلف در مقایسه با رقبا می‌باشد. لذا در پژوهش حاضر نیز از این الگوریتم جهت بهینه‌یابی تابع هدف استفاده می‌گردد.

۲-۲- نشت یابی با استفاده از الگوریتم SMA

روش‌های بهینه‌یابی دیگری توسط نصیری دهج (۱۴۰۲) مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج نشان داد الگوریتم SMA در بین دیگر روش‌ها در یافتن تک نشت موجود در شبکه‌ها عملکرد بهتری دارد. لذا از نتایج آن در تحقیق حاضر استفاده شده‌است. به‌طور کلی الگوریتم SMA در انجام فرآیند نشت‌یابی، روندی مطابق با مراحل زیر دارد.

- ۱) دریافت جمعیت اولیه و حداکثر تعداد تکرار به عنوان ورودی
- ۲) در نظر گرفتن مقدار ضریب نشت گرهی تصادفی (k در رابطه ۱) برای هر گره (تولید متغیرهای تصادفی اولیه)
- ۳) محاسبه تفاوت فشارهای شبیه‌سازی شده و میدانی و محاسبه تابع هدف از طریق رابطه ۲ (محاسبه برازندگی هر جواب)
- ۴) به‌روزرسانی بهترین برازندگی
- ۵) محاسبه وزن کپک مخاطی (\vec{W}) براساس رابطه ۶
- ۶) به‌روز رسانی پارامترهای p، vc و vb براساس توضیحات بخش ۲-۲
- ۷) تولید ضرایب نشت گرهی جدید (به‌روزرسانی موقعیت کپک مخاطی) به توجه به رابطه ۷
- ۸) در صورت ارضا نشدن شرایط توقف، به مرحله ۳ بازگشته و روند الگوریتم تکرار می‌شود؛ در غیر اینصورت بهینه‌یابی پایان یافته و بهترین جواب یافت شده، ارائه می‌شود.

فرآیند واسنجی و بهینه‌یابی تابع هدف (رابطه ۱) در هر یک از سناریوها به‌وسیله الگوریتم مذکور، با دریافت مقدار جمعیت اولیه برابر با ۵۰ شروع می‌شود. در صورتیکه مقدار تابع هدف به صفر همگرا شود، فرآیند به پایان رسیده و نشت‌یابی انجام می‌پذیرد. به عبارت دیگر شرایط خاتمه الگوریتم دو مورد شامل ۱) رسیدن به مقدار حداکثر تکرار (۵۰۰ تکرار) و ۲) حاصل شدن مقدار صفر برای تابع هدف، در نظر گرفته شده‌است. هر یک از شرایط خاتمه رخ دهند، روند الگوریتم متوقف شده و بهترین جواب حاصله ارائه خواهد شد.

تعداد متغیرهای مسئله در هر شبکه برابر با تعداد گره‌های آن شبکه می‌باشد. برای شبکه پولاکیس، بالما و هانوی تعداد متغیرها به ترتیب برابر با ۳۰، ۴۴۳ و ۳۱ می‌باشد و حدود بالا و پایین این متغیرها در الگوریتم به صورت بازه‌ی صفر تا حداکثر مقدار ضریب نشت گرهی تعریف می‌شوند. خلاصه‌ای از مشخصات مسائل نشت‌یابی مورد بررسی، در جدول شماره ۱ آورده شده‌است.

جدول ۱- خلاصه‌ای از مشخصات مسائل نشت‌یابی مورد بررسی

شماره	حداکثر ضریب نشت	شبکه مورد بررسی	تعداد متغیرها	تابع هدف
۱	۱۰/۱۴			
۲	۱۱/۲۵	پولاکیس	۳۰	رابطه ۲
۳	۶/۰۸			

		۹/۱۲	۴
		۶/۷۶	۵
		۱۷/۴۲	۶
		۱۹/۳۶	۷
	بالرما	۱۰/۴۵	۸
۴۴۳		۱۵/۶۸	۹
		۱۱/۶۱	۱۰
		۷۷/۵۲	۱۱
		۸۶/۱۴	۱۲
	هانوی	۴۶/۵۱	۱۳
۳۱		۶۹/۷۷	۱۴
		۵۱/۶۸	۱۵

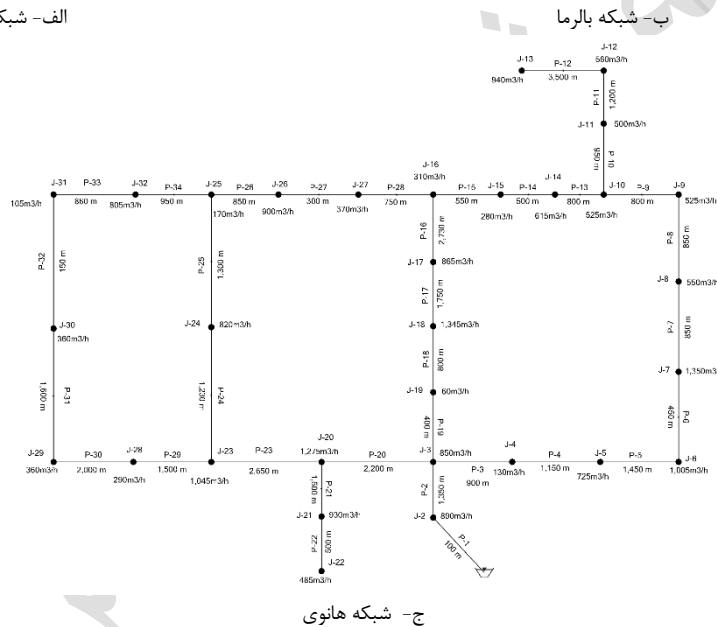
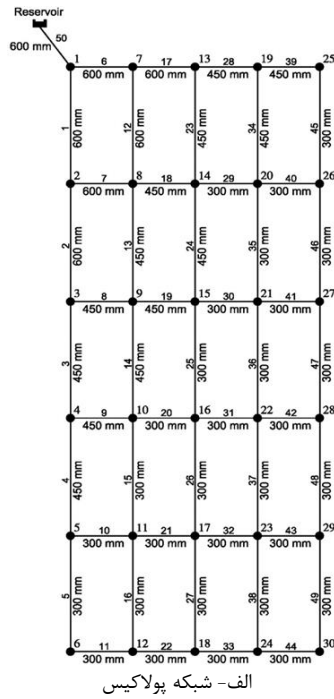
به منظور افزایش کیفیت پاسخ‌های حاصل از الگوریتم، پارامترهای تنظیم کننده جست‌وجوی گسترده (explore) و جست‌وجوی محلی (exploit) در الگوریتم SMA تحت تحلیل حساسیت قرار داده شده‌اند. مقادیر مختلف این پارامترها با در نظر گرفتن حدود پیشنهادی در مقاله مربوطه، بر روی یکی از شبکه‌ها (بالرما) بررسی شد. سه پارامتر شامل اندازه جمعیت، تعداد تکرار و پارامتر Z به عنوان عوامل موثر بر عملکرد الگوریتم در نظر گرفته شدند. 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 بررسی شدند. در این شرایط ۲۷ ترکیب مختلف از پارامترها شکل گرفت که بر روی هر کدام ۵ بار اجرا گرفته شد. نتایج نشان داد، 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.

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

۳- شبکه‌های مورد مطالعه

در این مطالعه از سه شبکه جهت بررسی روش پیشنهادی استفاده شده‌است. اولین شبکه، پولاکیس می‌باشد که نمای کلی آن در شکل ۲-الف آورده شده است (Poulakis et al., 2003). در این شبکه، طول لوله‌های افقی و عمودی به ترتیب 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 در نظر گرفته شده است. در شبکه پولاکیس فرض شده‌است، در گره‌های ۱۳، ۱۵ و ۱۸ فشارسنج و در ورودی شبکه دبی سنج وجود دارد.

شبکه مورد مطالعه بعدی، شبکه بالرما می‌باشد که در استان آلمریا (کشور اسپانیا) قرار دارد. شبکه بالرما نخستین بار توسط Reza and Martínez (2006) ارائه شد. این شبکه دارای ۴ مخزن آب، ۴۴۳ گره و 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، دبی سنج با هدف پایش شبکه قرار گرفته شده‌است. شبکه سوم، شبکه هانوی می‌باشد که نمای کلی آن در شکل ۲-ج مشاهده می‌شود (Fujiwara and Khang, 1990). این شبکه شامل ۳۱ گره، ۳۴ لوله، ۳ حلقه بوده و دارای یک مخزن با رقوم ثابت سطح آب برابر ۱۰۰ متر است. ضرایب هیزن ویلیامز لوله‌ها برابر ۱۳۰ است. در شبکه هانوی نیز جهت پایش دبی و فشار در شبکه، فرض شده‌است در گره‌های ۵، ۱۲ و ۳۰ فشارسنج و در ورودی شبکه دبی سنج وجود دارد.



شکل ۲- نمای شبکه‌های مورد مطالعه

۴- نتایج و بحث

در پژوهش حاضر، مقدار و محل نشت در هر یک از سناریوها بصورت تصادفی تعیین و روش پیشنهادی طی ۱۵ سناریوی وجود تک نشت در سه شبکه پیاده‌سازی شد. هر سناریو بر روی الگوریتم SMA، با استفاده از یک کامپیوتر لپ تاپ دارای هفت هسته با سرعت پردازش ۲.۸ گیگاهرتز و ۱۶ گیگ رم، یکبار اجرا گردید. نتایج حاصل از اجرای سناریوهای مختلف در سه شبکه توزیع آب در جدول شماره ۲ آورده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود در کلیه سناریوها مقدار تابع هدف در زمان کوتاهی به صفر رسیده‌است. صفر بودن مقدار تابع هدف بیانگر کیفیت الگوریتم SMA در نشت‌یابی و یافتن مقدار و محل دقیق نشت می‌باشد. با افزایش تعداد گره‌های شبکه، تعداد متغیرهای مسئله افزایش یافته و مسئله پیچیده‌تر شده‌است. بنابراین الگوریتم طی تعداد تکرار بیشتری توانسته محل نشت را بیابد و به مقدار تابع هدف به صفر برسد. در واقع در شبکه بالما با صرف زمان محاسبات بالاتر و تعداد ارزیابی بیشتر تابع هدف، مقدار بهینه مسئله را بدست آورده‌است. 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 گرفته‌است.

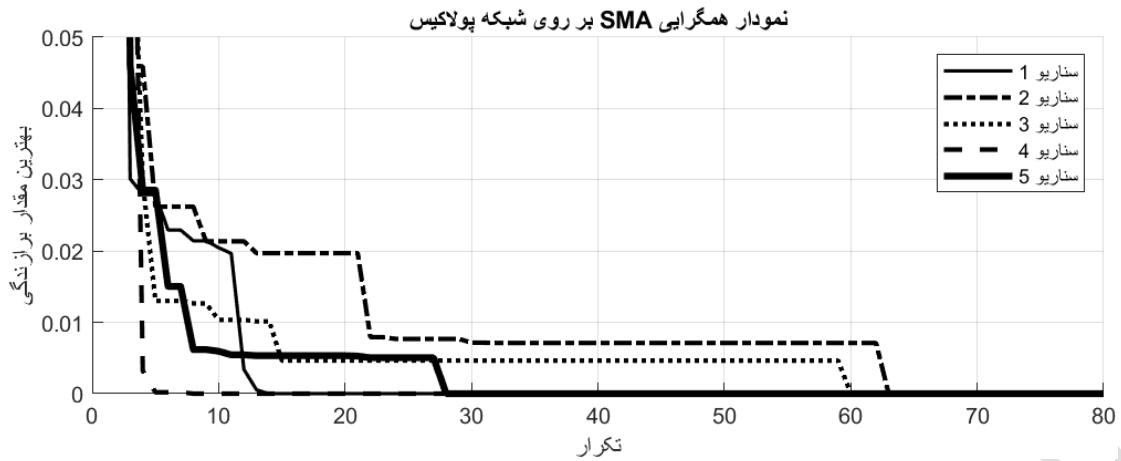
جدول ۲- نتایج نشت یابی با استفاده از الگوریتم SMA

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

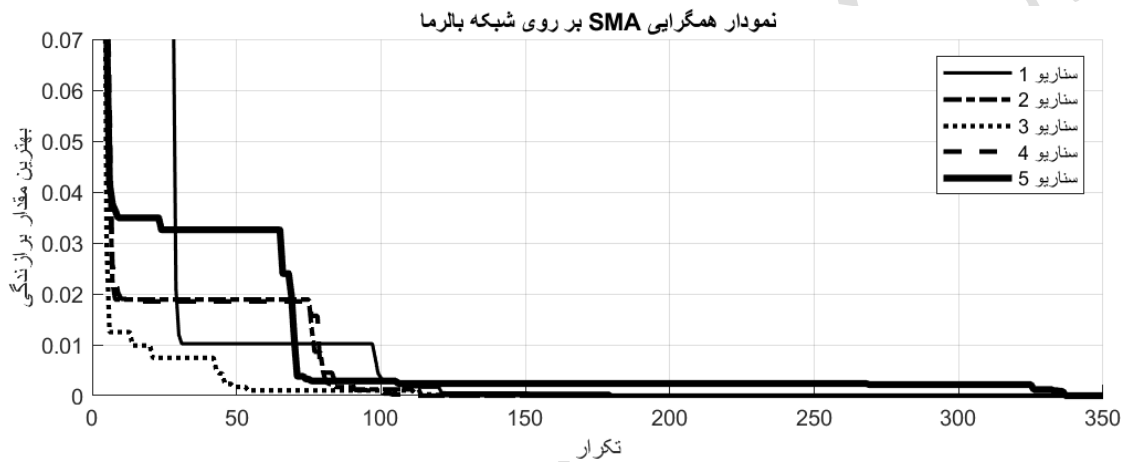
نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که در شبکه‌های مورد بررسی، هرچه گره دارای نشت از مخزن دورتر بوده و به عبارتی گره دارای نشت به انتهای شبکه نزدیکتر بوده‌است، به دلیل افزایش افت‌های ناشی از طول مسیر، عمل نشت‌یابی سریع‌تر انجام شده و الگوریتم بهتر توانسته‌است محل و مقدار نشت را بیابد. متفاوت بودن مقدار نشت در هریک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

به‌طور کلی 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 قابل قبول می‌باشد؛ ولی باید توجه داشت حجم محاسباتی الگوریتم با افزایش تعداد گره‌های شبکه رابطه مستقیم، و با افزایش فاصله نشت از مخازن رابطه عکس دارد.

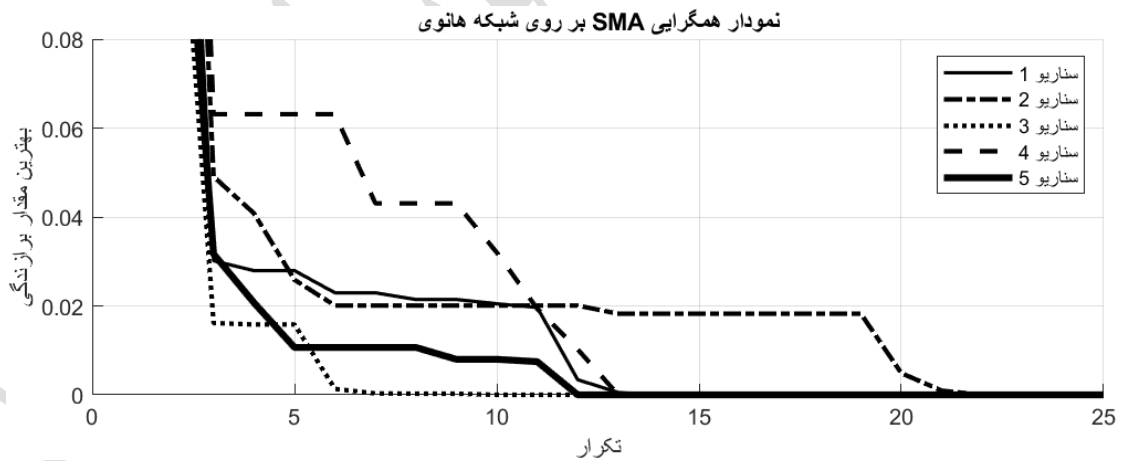
در شکل‌های شماره ۳ تا ۵، نمودار همگرایی ۱۵ سناریو در سه شبکه یاد شده نشان داده شده‌است. با استناد به این نتایج می‌توان دریافت در کلیه سناریوهای اجرا شده بر روی شبکه هانوی، به علت کوچک بودن ابعاد شبکه همگرایی به سرعت صورت گرفته‌است. درحالی‌که در شبکه بالرما به علت وسعت شبکه و تعداد زیاد گره‌ها، همگرایی طی تعداد تکرار بیشتری از روند الگوریتم انجام شده‌است. اما به‌طور کلی، در هر سه شبکه عملیات واسنجی-بهینه‌یابی با استفاده از الگوریتم SMA به‌طور دقیق و با انجام تعداد ارزیابی مناسب صوت گرفته‌است.



شکل ۳- نمودار همگرایی الگوریتم SMA طی ۵ سناریو بر روی شبکه پولاکس

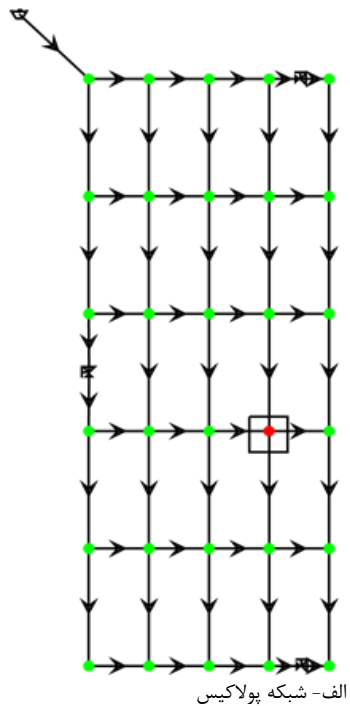


شکل ۴- نمودار همگرایی الگوریتم SMA طی ۵ سناریو بر روی شبکه بالما



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

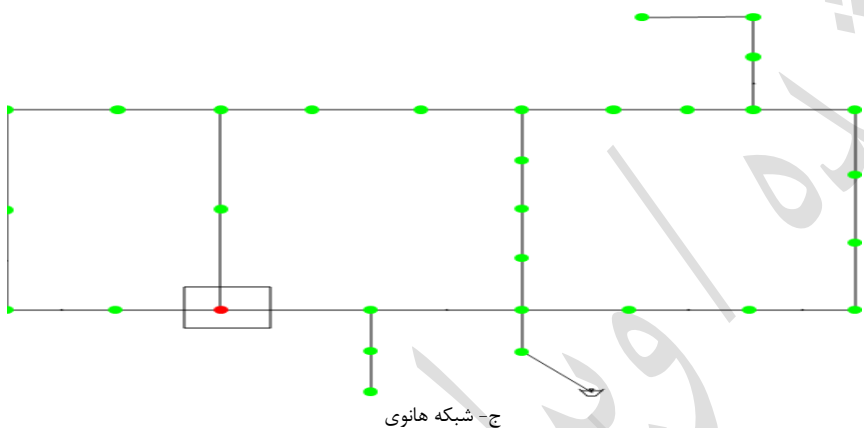
در شکل ۶ برای هر یک از شبکه ها، شمایی از نتایج حاصل از نشت یابی به روش مذکور برای یک سناریو به عنوان نمونه (سناریوهای شماره ۱، ۱ و ۵ به ترتیب در شبکه پولاکس، بالما و هانوی) آورده شده است. در این شکل ها نماد مربع بیانگر محل نشت در نظر گرفته شده طی سناریوی مورد نظر، گره دارای رنگ قرمز بیانگر محل نشت یافت شده توسط روش پیشنهادی و گره های دارای رنگ سبز بیانگر عدم وجود نشت هستند که توسط الگوریتم تشخیص داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، عمل نشت یابی توسط روش ارائه شده در پژوهش حاضر، بدون خطا صورت گرفته است و محل نشت در نظر گرفته شده و نشت تشخیص داده شده توسط روش پیشنهادی بر یکدیگر منطبق هستند. باتوجه به نتایج حاصل از یافتن نشت موجود در شبکه ها با استفاده از الگوریتم SMA و دقت این الگوریتم در مسائل نشت یابی، پیشنهاد می شود در تحقیقات آتی عملکرد این الگوریتم در شبکه های آبرسانی دارای بیش از یک نشت نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.



الف- شبکه پولاکیس



ب- شبکه بالرما



ج- شبکه هانوی

- محل نشت فرضی
- گره دارای نشت
- گره فاقد نشت

راهنمای شکل

شکل ۶- 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 ارائه شده محل نشت‌های مخفی با استفاده از روش واسنجی-بهینه‌یابی یافت می‌شود. سناریوهای وجود نشت به صورت تصادفی تعریف شده و از الگوریتم SMA جهت بهینه‌یابی تابع هدف استفاده شد. کارآیی روش پیشنهادی در سه شبکه توزیع آب با ابعاد متفاوت طی ۱۵ سناریوی وجود تک نشت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد این روش در یافتن تک نشت موجود در شبکه‌ها، عملکرد بسیار مناسبی دارد و قادر به یافتن محل و مقدار نشت به‌طور دقیق می‌باشد. در شبکه بالرما به‌طور میانگین طی ۱۹۱ تکرار و صرف ۳۶۶ ثانیه زمان، الگوریتم به همگرایی رسیده و عمل نشت‌یابی انجام گرفته‌است. در حالیکه در شبکه هانوی به علت کوچک بودن ابعاد شبکه و کمتر بودن تعداد گره‌ها به‌طور میانگین طی ۱۴ تکرار و صرف ۷ ثانیه زمان، همگرایی صورت گرفته‌است. زمانی که محل نشت در موقعیتی دورتر از ورودی شبکه باشد، تشخیص نشت توسط الگوریتم به دلیل 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 تک نشت موجود با دقت مناسبی تشخیص داده می‌شود. به‌طور کلی با استناد به نتایج حاصله با استفاده از ظرفیت این الگوریتم فرا ابتکاری قدرتمند، نشت موجود در شبکه را با دقت بسیار بالا و با صرف کمترین زمان می‌توان یافت و برای رفع آن اقدام نمود.

بوستانی، آ. و خدانشناس، س.، (۱۳۹۴)، "بررسی روش نشت یابی در شبکه آب تحت فشار بر مبنای رابطه فشار-نشت (ارائه کد بهینه یابی مکان یابی نشت)". آب و توسعه پایدار، 59-66, (1)10

مغربی، ف.، حسن زاده، ی. و یزدانی، س.، (۱۳۹۰)، "کالیبراسیون مدل های شبکه توزیع آب شهری با استفاده از روش بهینه یابی کلونی مورچه ها". آب و فاضلاب، ۱۱۱-۱۰۱. نصیری دهج، م. (۱۴۰۲)، "یافتن محل شکستگی در شبکه های توزیع آب با استفاده از تحلیل داده های فشار"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه های 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", *Journal of Water*, 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", *Journal of Energy*, 127842, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127842>.
- El-zahab, S. and Zayed, T., (2019), "Leak detection in water distribution networks: an introductory overview", *Journal of Smart Water*, 4, 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", *Journal of Neural Computing and Applications*, 35, 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", *Journal of Water resources research*, 26, 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", *Journal of Water Resources Management*, 32, 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", *Journal of 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", *Journal of 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". *Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering: Theory and Practice*. Springer, 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", *Journal of Civil Eng Urban*, 4, 322-327.
- 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", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148, 04021096, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001503](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", *Journal of Water Resources Management*, 34, 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". *Journal of 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", *Journal of Probabilistic Engineering Mechanics*, 18, 315-327, [https://doi.org/10.1016/s0266-8920\(03\)00045-6](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, 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", *Journal of Water resources research*, 42, <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., Kuanestani, 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". *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148, 03122002, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001597](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*, 1-11, [https://doi.org/10.1061/40941\(247\)180](https://doi.org/10.1061/40941(247)180) .

پدیدارنده / ویرایش نشده