

Research Paper

مقاله پژوهشی

Leak Localization in Water Supply Networks through a Calibration Approach Using the Grasshopper Optimization Algorithm and K-means Clustering Integrated with the Genetic Algorithm

مکان‌یابی نشت در شبکه‌های آبرسانی با استفاده از رویکرد واسنجی توسط الگوریتم بهینه‌سازی ملخ و خوشه‌بندی K-means با الگوریتم ژنتیک

Reza Moasheri¹, Reza Ahmadi Kohanali² and Mohammadreza Jalili Ghazizadeh^{3*}

رضا معاشری^۱، رضا احمدی کهنعلی^۲ و محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده^{۳*}

1- Ph.D. Graduate, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

۱- دانش‌آموخته دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

2- M.Sc. Graduate, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

3- Associate Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

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

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

Received: 14/01/2024

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۴

Revised: 28/05/2024

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۰۳/۰۸

Accepted: 14/07/2024

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۴

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

This paper presents a model-based methodology for leak localization in water distribution networks using the Grasshopper Optimization Algorithm (GOA). The approach calibrates a hydraulic model by minimizing the discrepancy between simulated and field pressure measurements. Two distinct methodologies are proposed: The first method accurately locates leaks by assuming a predetermined number of simultaneous leaks. The second method, designed for scenarios where the number of leaks is unknown, integrates the K-means clustering technique with a Genetic Algorithm (GA) to partition the network into zones. A novel strategy is introduced to determine the optimal number of these zones, with the primary goal of identifying the zone most susceptible to leakage. The proposed methodology was tested on the Poulakis and Balerna benchmark networks under 2000 leakage scenarios. Results indicate that the success rate of the first method decreases as the number of simultaneous leaks increases. Overall, the second method outperforms the first, demonstrating the potential to achieve 99% accuracy in leak localization. The framework outlined in this study shows significant promise for effective leakage management in water supply systems.

در این مقاله، روشی مبتنی بر به‌کارگیری مدل هیدرولیکی، برای تعیین محل یا محدوده نشت‌های یک شبکه آبرسانی پیشنهاد شده است که از الگوریتم جدید بهینه‌سازی ملخ (GOA) استفاده می‌کند. این روش براساس مقایسه نتایج داده‌های شبیه‌سازی شده و میدانی فشار، عمل می‌نماید. روش پیشنهادی شامل دو رویکرد مختلف است؛ در رویکرد اول، با فرض مشخص بودن تعداد نشت‌های موجود، محل آن‌ها به‌صورت دقیق شناسایی می‌شود. در رویکرد دوم، بدون نیاز به آگاهی از وجود تعداد نشت‌های هم‌زمان موجود، پهنه‌بندی شبکه مورد مطالعه توسط روش خوشه‌بندی K-means با الگوریتم ژنتیک (GA)، صورت می‌گیرد. در این راستا نیز راهبرد جدیدی برای دستیابی به تعداد پهنه‌های بهینه پیشنهاد شده است. هدف اصلی در استفاده از رویکرد دوم، مکان‌یابی پرنشت‌ترین پهنه موجود است. روش پیشنهادی بر روی دو شبکه مرجع پولاکیس و بالرما تحت ۲۰۰۰ سناریوهای مختلف نشت، پیاده‌سازی شد. نتایج نشان داد که در رویکرد اول با افزایش تعداد نشت‌های هم‌زمان، درصد موفقیت آن کاهش می‌یابد. به‌صورت کلی نیز رویکرد دوم بر رویکرد اول پیشنهادی ارجحیت داشته و قابلیت دستیابی به صحت ۹۹ درصدی مکان‌یابی نشت را دارا است. روش ارائه‌شده در این مقاله، می‌تواند نقش زیادی در کاهش نشت شبکه‌های آبرسانی داشته باشد.

Keywords: Leak Detection, Grasshopper Optimization Algorithm, Genetic Algorithm, Water Supply Networks, K-means Clustering.

کلمات کلیدی: نشت‌یابی، الگوریتم بهینه‌سازی ملخ، الگوریتم ژنتیک، شبکه‌های آبرسانی، خوشه‌بندی K-means.

(2019). این بدان معنا است که وقوع نشت در شبکه‌های آبرسانی منجر به کاهش کارایی شرکت‌های آب و فاضلاب خواهد شد. لذا به دلیل آسیب‌ها و هزینه‌های مرتبط ذکر شده، عملیات نشت‌یابی و تشخیص نشت‌های موجود در یک شبکه آبرسانی، یک نگرانی مهم برای دولت‌ها و سرمایه‌گذاران مختلف محسوب می‌شود. از جمله روش‌های رایج نشت‌یابی می‌توان به روش‌های صوتی، استفاده از گاز ردیاب، روش ترموگرافی، استفاده از هواپیماهای بدون سرنشین، استفاده از اشعه نفوذپذیر در زمین، نشت‌یابی ماهواره‌ای و استفاده از سگ‌های نشت‌یاب اشاره کرد (Hamilton and Charalambous, 2020).

روش‌های مذکور به روش‌های فیزیکی نشت‌یابی معروف هستند. نشت می‌تواند با اجرای این روش‌ها تشخیص داده شده و برطرف شود، اما این امر مستلزم انجام کاری سخت و استفاده از تجهیزات گران و پیشرفته است. در مقابل، تکنیک‌ها یا روش‌های نشت‌یابی با رویکرد شبیه‌سازی - میدانی قرار دارند که کم‌هزینه و کم‌زحمت‌تر بوده و می‌توانند بسیار کارآمد باشند. از طرفی، این تکنیک‌ها به چند نفر که غالباً با استفاده از یک سامانه، به نظارت مستمر بر روی خطوط لوله فعالیت می‌کنند، نیاز ندارد (Zaman et al., 2020). از جمله رایج‌ترین روش‌های نشت‌یابی با رویکرد شبیه‌سازی - میدانی عبارتند از: نشت‌یابی با استفاده از فرآیند واسنجی هیدرولیکی و نشت‌یابی به کمک شبکه‌های عصبی. در ادامه برخی از مهم‌ترین مطالعات مرتبط ارائه شده است.

(2011) Tabesh et al. واسنجی هیدرولیکی شبکه‌های آبرسانی با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) را بررسی کردند. شبکه مورد مطالعه آن‌ها شامل ۱۶ لوله، ۱۲ گره و یک مخزن آب بود. در این پژوهش، با پارامترهای تنظیمی مختلف، ضریب زبری لوله‌ها و مصارف گره‌ها و قطر لوله‌ها، واسنجی شبکه آب مورد مطالعه در ۴ زمان مختلف (حداقل مصرف، حداکثر مصرف، مصرف معمولی و شرایط آتش‌نشانی) مورد بررسی قرار گرفت. اندازه‌گیری میدانی آن‌ها شامل فشارسنجی در ۴ گره مختلف شبکه بود. نتایج آن‌ها نشان داد که انجام عمل واسنجی شبکه در زمانی که دبی لوله‌ها زیاد است (یعنی شرایط آتش‌نشانی) دارای کم‌ترین خطا و در حالت حداقل مصرف دارای بیش‌ترین خطا است. در ادامه با در نظرگیری نشت شبکه در فرآیند شبیه‌سازی در مدل هیدرولیکی شبکه، خطای واسنجی شبکه در زمان حداقل مصارف مشترکین، کاهش یافت.

فغفور مغربی و همکاران (۱۳۹۲) مقدار و موقعیت نشت را در گره‌های شبکه با استفاده از واسنجی هیدرولیکی توسط GA و

به‌صورت کلی، در طول ۴۰ سال گذشته مصرف آب در دنیا در هر سال به میزان تقریباً ۱٪ افزایش پیدا کرده است؛ البته تمرکز چنین افزایش مصرفی، در کشورهای کم‌درآمد و هم‌چنین کشورهای در حال توسعه بوده است (UN-Water, 2023). آبرسانی ثابت و دارای اطمینان، موضوع مهمی در مقوله امنیت جهانی محسوب می‌شود. شبکه‌های آبرسانی، زیرساخت مهمی برای تحویل آب با کمیت، کیفیت و فشار قابل‌قبول به مشترکین هستند (Ferreira et al., 2023). به‌منظور تهیه و در اختیار‌گذاری بخش قابل‌توجهی از آب مورد نیاز، انرژی و هزینه‌های زیادی صرف انتقال، تصفیه و توزیع آن می‌شود. در مقابل بخشی از این آب به دلیل ایجاد نشت در شبکه‌های آبرسانی تلف شده و به مصرف‌کننده نهایی یا مشترکین منتقل نمی‌شود. تقریباً یک‌سوم کل آب استحصال‌شده برای مصارف شهری، به‌علت نشت و ترکیبگی لوله‌ها در شبکه‌های آبرسانی از دست می‌رود و در سامانه‌های درآمد و تأمین مالی گنجانده نمی‌شود. از سوی دیگر، براساس تخمین‌های انجام‌شده توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا (US-EPA)^۱، مقدار متوسط نشت حدود ۱۰ هزار گالن آب در سال به‌ازای هر خانوار بوده و این سبب می‌شود که حدود یک تریلیون گالن آب تصفیه‌شده در سراسر کشور به‌دلیل نشت تلف شود (US-EPA, 2020). هزینه‌های مرتبط با یک نشت کوچک در یک شبکه آبرسانی نیز حدود ۶۴ هزار دلار برآورد شده است (Slowey, 2019).

به‌صورت کلی، نشت یک چالش چندوجهی است که هم‌ایمنی تأمین آب و هم استفاده کارآمد از منابع آب و انرژی برای حمل و نقل را به خطر می‌اندازد و در نتیجه منجر به خسارات اقتصادی و مشکلات محیط‌زیستی می‌شود (Wu et al., 2023). از سوی دیگر، یکی از شاخص‌های ارزیابی شبکه‌های آبرسانی، مقدار آب بدون درآمد (NRW)^۲ است. این شاخص به سه گروه اصلی تلفات واقعی، تلفات ظاهری و مصارف مجاز بدون درآمد تقسیم می‌شود (Sousa et al., 2015).

مقادیر آب بدون درآمد برآوردشده برای کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه به‌ترتیب ۱۵٪ و ۳۵٪ از حجم کل سالیانه ورودی به سامانه است؛ به‌نحوی که در پنج کشور در حال توسعه در آسیا، میانگین آب بدون درآمد حدود ۳۰٪ و در بازه ۴۰-۶۵٪ است (Kanakoudis and Tsitsifli, 2012).

نشت از شبکه‌های آبرسانی بخش مهمی از آب تلفات واقعی را تشکیل می‌دهد (Sadr-Al-Sadati and Jalili Ghazizadeh,

در خطوط لوله توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه (MLP)^۴ پیشنهاد کردند. در این روش، ضریب زبری داری و ویسباخ لوله‌ها با استفاده از اطلاعات مربوط به عدد رینولدز و زبری نسبی (e/D) توسط یک شبکه عصبی پرسپترون چندلایه تخمین زده شده و به همراه داده فشار، به عنوان داده‌های ورودی شبکه عصبی اصلی استفاده می‌شود. خروجی‌های آن نیز شامل محل نشت است.

Hu et al. (2021) در روشی ابتدا یک شبکه آبرسانی را توسط الگوریتم خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی به چندین ناحیه تقسیم کردند. در ادامه توسط شبکه‌های عصبی پیچشی کامل دارای چند مقیاس، محدوده‌های دارای نشت را یافتند. (Fallahi et al. (2021) روشی برای نشت‌یابی شبکه‌های آبرسانی با استفاده از شبکه‌های عصبی پیش‌خور ترکیبی ارائه دادند. این روش قادر به تشخیص یک نشت در شبکه بوده و تغییرات ساعتی دبی نشت در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز را در برمی‌گیرد. روش مذکور بر روی شبکه پولاکیس، پیاده‌سازی شد.

Li et al. (2021) الگوریتمی براساس فرآیند تجزیه و تحلیل بیزین مبتنی بر مدل، برای یافتن مقدار و محل نشت در شبکه‌های آبرسانی ارائه کردند. آن‌ها روش پیشنهادی خود را برای یافتن دو و سه نشت هم‌زمان در دو شبکه تحلیلی مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. معاشری و همکاران (۱۴۰۰) روشی را به منظور نشت‌یابی در شبکه‌های آبرسانی با استفاده از الگوریتم ترکیبی PSOGA ارائه دادند. در روش پیشنهادی، عدم قطعیت در ضرایب زبری لوله‌ها با استفاده از رویکرد واسنجی هم‌زمان قابل‌اعمال است. آن‌ها روش پیشنهادی خود را در یک شبکه تمام حلقوی پیاده‌سازی کردند. نتایج اجرای سناریوهای مختلف نشان داد که روش ارائه‌شده قادر به دست‌یابی به نرخ موفقیت بالای ۹۰٪ در شناسایی پرنشت‌ترین ناحیه شبکه مورد مطالعه است.

Wu et al. (2022) برای تشخیص و پیش‌بینی سطح نشت از الگوریتم XGBoost و به منظور مدل سازی هیدرولیکی از نرم‌افزار ایپانت^۹ استفاده کردند. برای مدل‌سازی و انجام عملیات نشت‌یابی، سناریوهایی تعریف شده و نتایج حاصل از الگوریتم XGBoost با نتایج حاصل از شبکه عصبی back-propagation مقایسه شد. نتایج نشان داد که الگوریتم XGBoost در مکان‌یابی نشت موفق عمل می‌کند. (Snider et al. (2023) یک مدل مکان‌یابی نشت را با استفاده از مدل طبقه‌بندی جنگل تصادفی و الگوریتم مسئله حداکثر پوشش ارائه کردند. در این پژوهش ادعا شده است که این مدل در مقایسه با سایر پیش‌بینی‌های خوشه‌بندی و یادگیری ماشینی، فضای جستجو را بیش از ۳۵٪ کاهش می‌دهد.

الگوریتم کلونی مورچه‌ها (ACO)^۴ یافتند. شبکه مطالعاتی آن‌ها، شبکه معروف پولاکیس (Poulakis et al., 2003) بود. آن‌ها در سه سناریوی مختلف نشت، کارایی روش پیشنهادی خود را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که الگوریتم ACO عملکرد بهتری نسبت به GA در یافتن نشت‌های شبکه دارد.

Faghafur Maghrebi et al. (2014) روشی برای تعیین مقدار و محل نشت در شبکه‌های آبرسانی با استفاده از شبکه‌های عصبی پیشنهاد دادند. در این پژوهش به منظور بهبود فرآیند آموزش شبکه عصبی، از الگوریتم خفاش استفاده شده بود. داده‌های مشاهداتی آن‌ها از نوع فشار و شبکه مورد مطالعه آن‌ها، پولاکیس بود. روش نام‌برده در سه مثال در شبکه عصبی متعارف و شبکه عصبی بهبودیافته با الگوریتم خفاش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از الگوریتم خفاش، نتیجه بهتری از الگوریتم‌های متعارف آموزش شبکه عصبی دارد. (Sousa et al. (2015) روشی برای شناسایی نشت در شبکه‌های آبرسانی با الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA)^۵ و نظریه گراف^۶ پیشنهاد دادند. تابع هدف در این الگوریتم مجموع قدرمطلق اختلاف فشارهای میدانی از فشارهای شبیه‌سازی شده (نتایج تحلیل هیدرولیکی) است. الگوریتم پیشنهادی بر شبکه‌ای با یک مخزن، ۱۰۰ گره، ۱۲۹ لوله و ۲۹ حلقه پیاده‌سازی شد.

عطاری و فغفور مغربی (۱۳۹۷) پژوهشی در ارتباط با نشت‌یابی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی ارائه دادند. در روش مذکور با تولید داده‌های آموزشی و اعمال آن به شبکه عصبی مصنوعی، شبکه قادر خواهد بود که با دریافت فشار گره(ها)، موقعیت و مقدار دقیق نشت گرهی را تعیین کند. شبکه مورد مطالعه آن‌ها، شبکه پولاکیس بود. در این شبکه، تولید داده‌های آموزشی در حالت دو نشت هم‌زمان و با اعمال نشت فرضی برابر ۱۰٪ مصرف گرهی در برخی گره‌های شبکه انجام شده و برداشت میدانی از نوع فشار گرهی بود. نتایج نشان داد که این روش علاوه بر تعیین موقعیت نشت، در اکثر مواقع مقدار نشت گرهی را با خطای متوسط ۱۵٪ شناسایی می‌کند.

Moasheri and Jalili-Ghazizadeh (2020) روشی برای واسنجی هم‌زمان زبری لوله‌ها و نشت‌های مدل هیدرولیکی شبکه‌های آبرسانی ارائه دادند. نشت به عنوان مصرف اضافی گرهی تلقی شده و بعد از گروه‌بندی لوله‌ها به منظور تعیین زبری هر گروه لوله، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری (ICA)^۷، اختلاف فشار و دبی‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده، کمینه شده است.

Pérez-Pérez et al. (2021) رویکردی برای شناسایی نشت

موجود است.

بدین منظور از الگوریتم بهینه‌سازی ملخ (GOA)^{۱۱} استفاده می‌شود. براساس اطلاعات نویسندگان مقاله، این الگوریتم برای نخستین بار در موضوع نشت‌یابی مورد استفاده قرار گرفته است. روش پیشنهادی، دارای دو رویکرد مختلف است؛ در رویکرد اول تعداد نشت‌های موجود، جزء فرض‌های مورد نیاز مسئله است و با اجرای الگوریتم، محل نشت‌های موجود تعیین می‌شود. اما با توجه به مواردی که به آن اشاره شده، رویکرد جدید دوم نیز در این خصوص، برای نخستین بار ارائه شده است. در رویکرد دوم تعداد نشت‌های هم‌زمان ممکن، جزء داده‌های معلوم و مورد نیاز نیست؛ در این رویکرد پهنه‌بندی شبکه و خوشه‌بندی گره‌های آن توسط GA صورت گرفته و آن‌گاه بعد از اجرای الگوریتم نشت‌یابی، پرنشت‌ترین ناحیه موجود در شبکه مورد مطالعه شناسایی می‌شود. رویکرد جدید ارائه شده برای خوشه‌بندی یک شبکه آبرسانی، از جمله نوآوری‌های این پژوهش است.

فرآیند گزارش پرنشت‌ترین ناحیه به‌جای یک نقطه دقیق از محل نشتی‌ها، می‌تواند تأثیر عدم قطعیت‌های موجود در مدل هیدرولیکی نظیر ضرایب زبری لوله‌ها، مصارف گرهی و غیره، بر نتایج را کاهش دهد و از دیدگاه بهره‌برداری از شبکه‌های آبرسانی، مفید و قابل توجه است. از سوی دیگر، در این روش برخلاف اکثر مطالعات پیشین که تحلیل هیدرولیکی در آن‌ها به‌صورت استاتیک (یعنی تصمیم‌گیری تنها بر اساس داده‌های میدانی نظیر فشار در یک زمان مشخص در شبانه‌روز) صورت گرفته است، تحلیل هیدرولیکی یک شبکه آبرسانی به‌صورت پویا (که در آن‌ها از سری زمانی داده‌های میدانی در طول شبانه‌روز استفاده می‌شود) انجام می‌گیرد. بررسی تأثیر شرایط هیدرولیکی شبکه‌های آبرسانی بر روی نتایج، نیز به‌عنوان یکی دیگر از نوآوری‌های این پژوهش است. هم‌چنین روش پیشنهادی در این مقاله بر روی ۲۰۰۰ سناریوی مختلف نشت و بر روی دو شبکه مختلف پیاده‌سازی شده و نتایج آن تحلیل شده است.

۲- مواد و روش انجام کار

در این مقاله، یک رویکرد مبتنی بر واسنجی برای یافتن محل یا محدوده نشت‌های موجود در یک شبکه آبرسانی ارائه شده است. روند انجام کار بدین صورت است که در ابتدا باید مدل هیدرولیکی شبکه مورد مطالعه ساخته شود، لذا در این مرحله مجموعه‌ای از داده‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی هیدرولیکی لازم است. از سوی دیگر، براساس نتایج فشارسنجی میدانی از شبکه و کنترل

نصیری دهج و همکاران (۱۴۰۴) روشی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کپک مخاطی (SMA)^{۱۰} برای مکان‌یابی نشت‌های یک شبکه آبرسانی ارائه دادند. روش پیشنهادی در پانزده سناریوی مختلف وجود تنها یک نشت در شبکه‌های مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفته و توانسته بود محل دقیق آن‌ها را پیدا کند.

درخصوص روش‌های نشت‌یابی با رویکرد شبیه‌سازی - میدانی می‌توان اذعان نمود که روش‌های پیشنهادی براساس شبکه‌های عصبی قادر به یافتن محل نشت‌های کوچک نبوده و نیازمند داده‌های زیادی برای آموزش شبکه هستند؛ از طرف دیگر، در صورتی که این داده‌ها جامع نباشند، سبب بروز خطا در پاسخ خروجی خواهند شد (Moasheri and Jalili-Ghazizadeh, 2020).

هم‌چنین بسیاری از روش‌های ارائه شده نسبت به تعداد نشت‌های هم‌زمان موجود در شبکه، محدودیت دارند؛ درحالی‌که تعداد نشت‌های هم‌زمان موجود در یک شبکه آبرسانی می‌تواند نامشخص باشد. از سوی دیگر، بسیاری از روش‌های پیشین برای یافتن محل دقیق نشت‌ها طراحی شده‌اند؛ با این پیش‌فرض که وقوع نشت تنها در محل گره‌های شبکه اتفاق می‌افتد. درحالی‌که اولاً در واقعیت، امکان وقوع نشت در هر قسمتی از شبکه وجود دارد و ثانیاً به‌دلیل آن‌که الگوریتم‌های فراکاوشی لزوماً قادر به دست‌یابی به بهینه‌ترین پاسخ ممکن نیستند، ممکن است محل برآوردی نشت با این الگوریتم‌ها، با محل دقیق آن‌ها فاصله زیادی داشته باشد. از سوی دیگر، به‌دلیل آن‌که چنین روش‌هایی مستقیم از مدل هیدرولیکی شبکه (در تکنیک استفاده از روش‌های واسنجی) یا غیرمستقیم (در تکنیک استفاده از شبکه‌های عصبی) استفاده می‌کنند و بسیاری از پارامترهای مدل هیدرولیکی در شبکه‌های واقعی می‌توانند دارای عدم قطعیت باشند، دست‌یابی به محل دقیق نشت‌ها، فرآیندی سخت و در بسیاری از موارد شاید غیرممکن باشد.

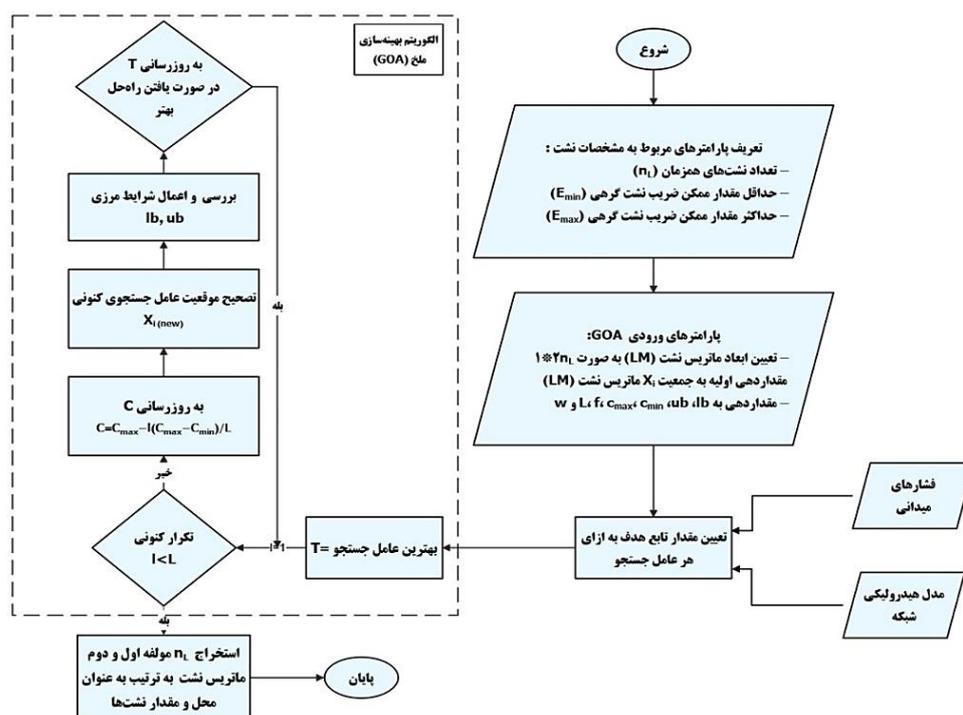
در مطالعه حاضر، یک روش جدید با استفاده از فرآیند واسنجی برای مکان‌یابی نشت‌های یک شبکه آبرسانی پیشنهاد شده است. در این روش، فرض می‌شود که در مدل هیدرولیکی شبکه، نشت‌های موجود اعمال نشده است و اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی شده فشار (خروجی مدل هیدرولیکی) و داده‌های متناظر میدانی فشار (در نتیجه انجام عملیات فشارسنجی میدانی) ناشی از پارامتر نشت است. به‌عبارت دیگر، مبنای اصلی این روش، مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده و میدانی فشار و تلاش برای کمینه کردن اختلاف بین آن داده‌ها، با هدف مکان‌یابی نشت‌های

ژنتیک، استفاده می‌شود؛ بدین صورت که گره‌های شبکه براساس معیار فاصله اقلیدسی در خوشه‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند و لذا تعداد متغیر تصمیم تولیدی و فضای جستجو نیز به اندازه تعداد خوشه‌ها یا گروه‌های گرهی موجود در شبکه آبرسانی مورد مطالعه است. در رویکرد دوم هنگامی که پرنش‌ترین ناحیه به‌درستی تشخیص داده شده باشد، الگوریتم پیشنهادی عملکرد صحیحی را از خود نشان داده است. لازم به ذکر است، از آنجایی که ممکن است درخصوص مقادیر بسیاری از پارامترهای مختلف مدل هیدرولیکی نظیر ضرایب زبری لوله‌ها، تراز هیدرولیکی مخازن و غیره عدم قطعیت وجود داشته باشد و این عدم قطعیت‌ها روی نتایج خروجی الگوریتم نشت‌یابی اثر بگذارند، گزارش پرنش‌ترین ناحیه به‌جای یک نقطه دقیق از نشت‌ها، می‌تواند از جمله مزایای رویکرد دوم روش پیشنهادی باشد؛ این رویکرد، در زمینه بهره‌برداری از شبکه‌های آبرسانی بسیار کاربردی و قابل توجه است.

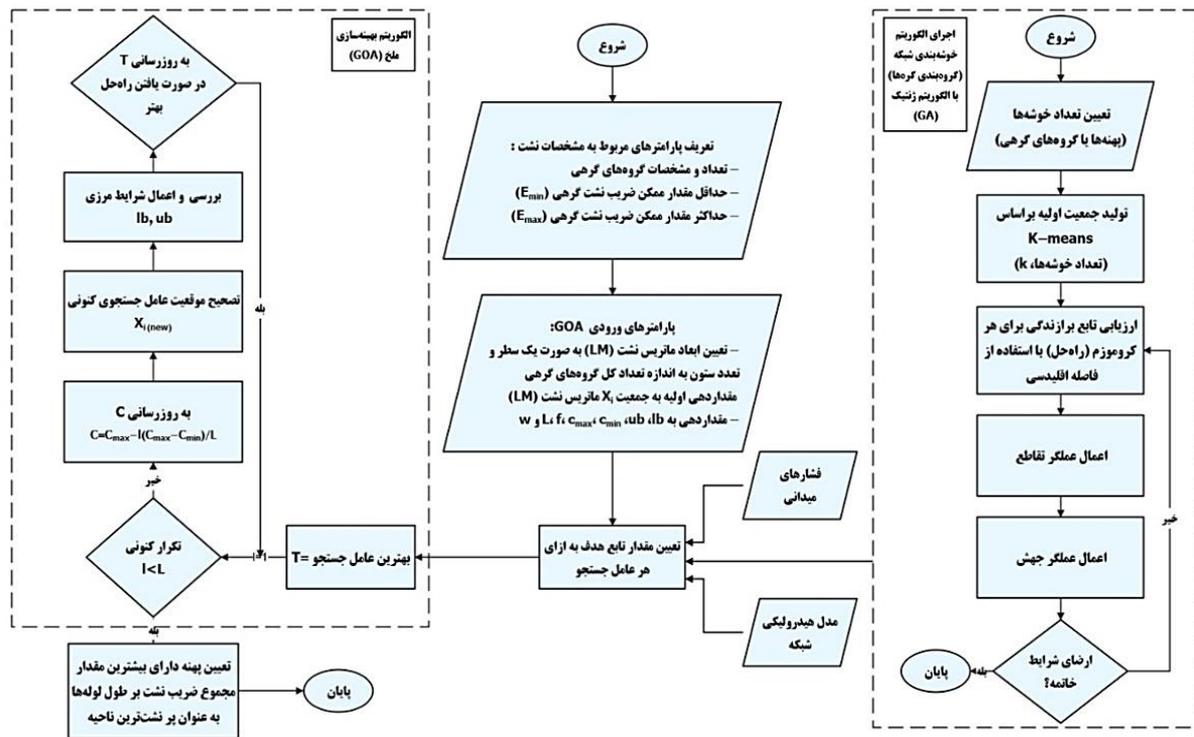
در این پژوهش، مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه‌های مورد مطالعه توسط نرم‌افزار ایپانت انجام شده و روش پیشنهادی در محیط نرم‌افزار متلب^{۱۲} کدنویسی شده است. برای ارتباط پویا بین دو نرم‌افزار مذکور، از تولکیتی استفاده شده که نخستین‌بار توسط Eliades et al. (2016) معرفی شده است. داده‌ها از متلب به ایپانت و بالعکس ارسال شده تا مسئله بهینه‌سازی حل و محل نشت‌ها گزارش شود.

صحت داده‌ها، مجموعه‌ای از داده‌های میدانی در دسترس هستند. درواقع، هدف آن است که نشت‌های موجود شبکه به‌گونه‌ای مکان‌یابی شوند که اختلاف مقادیر شبیه‌سازی و میدانی فشار، کمینه شود؛ به‌صورت دقیق‌تر، هدف کمینه‌کردن تابع هدف توسط الگوریتم بهینه‌سازی ملخ (GOA)، با انتخاب پارامتر ضرایب نشت گرهی (پارامتر E در رابطه (۲)) به‌عنوان پارامتر تنظیمی، است.

روش پیشنهادی شامل دو رویکرد مختلف برای نشت‌یابی است؛ در رویکرد اول (شکل ۱) تعداد نشت مشخص و جزو مفروضات اولیه مسئله به‌شمار می‌رود و لذا الگوریتم با فرض معلوم بودن تعداد نشت مشخص، ضرایب نشت را به گره‌ها اختصاص می‌دهد و نشت‌ها را مکان‌یابی می‌کند. در این رویکرد، تعداد متغیر تصمیم، به اندازه دو برابر تعداد کل نشت‌ها بوده و فضای جستجو به اندازه تمام گره‌های شبکه است. در این رویکرد، هنگامی نتایج خروجی الگوریتم صحیح است که دقیقاً تمام مکان‌های نشتی به‌درستی مکان‌یابی شده باشند. در رویکرد دوم (شکل ۲)، تعداد نشت جزو فرض‌های اولیه حل مسئله نیست و الگوریتم پس از گروه‌بندی گره‌ها (پهنه‌بندی شبکه)، ضرایب نشت را به گروه‌ها تخصیص می‌دهد و پرنش‌ترین محدوده موجود در شبکه را گزارش می‌کند. منظور از پرنش‌ترین محدوده، محدوده‌ای است که مجموع ضرایب نشت گرهی به‌ازای واحد طول لوله‌های موجود در آن ناحیه یا پهنه، بیشینه باشد. در رویکرد دوم، به‌منظور انجام پهنه‌بندی شبکه، از روش خوشه‌بندی K-means با الگوریتم



شکل ۱- روندنمای کلی مراحل انجام کار در رویکرد اول نشت‌یابی



شکل ۲- روندنمای کلی مراحل انجام کار در رویکرد دوم نشت‌یابی

شبکه، $P_{sim,t,nh}$: هد فشاری شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار در گره دارای فشارسنج n در زمان t ام، و $P_{obs,t,nh}$: هد فشاری مشاهده شده میدانی در گره دارای فشارسنج n در زمان t ام هستند.

۲-۲- شبیه‌سازی نشت

برای شبیه‌سازی نشت در شبکه، از رابطه نشت-فشار (رابطه (۲)) استفاده می‌شود.

$$Q_L = EP^2 \quad (2)$$

که Q_L : دبی نشت، E : ضریب نشت، P : فشار آب و L : توان نشت است. واحد تمامی کمیت‌های ذکر شده مطابق سیستم بین‌المللی SI و توان نشت بدون بعد است. در روش پیشنهادی، معلوم بودن توان نشت از جمله فرض‌های مسئله به‌شمار می‌رود.

همان‌طور که مطرح شد، متغیر تصمیم در مسئله اصلی بهینه‌سازی این پژوهش (رابطه (۱))، ضرایب نشت گرهی است. دلیل یافتن ضریب نشت به‌جای دبی نشت، این است که به‌دلیل نوسانات فشار در شبکه، مقدار فشار و در نتیجه مقدار دبی نشت در ساعات مختلف شبانه‌روز متفاوت است. در لوله‌های صلب، تغییرات ضریب نشت (ضریب E در رابطه (۲)) با فشار قابل‌صرفه‌نظر کردن است؛ لذا در پژوهش حاضر با فرض صلب

لازمه ذکر است که تعداد و محل فشارسنج‌ها در یک شبکه آبرسانی، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در نتایج داشته باشد؛ مطالعات متعددی در این خصوص توسط پژوهشگران زیادی در سراسر جهان صورت گرفته است (Ferreira et al., 2022; Khorshidi et al., 2020; Rajabi and Tabesh, 2024). در این مقاله، فرض شده است که در شبکه‌های آبرسانی مورد مطالعه، تعدادی فشارسنج از قبل نصب شده است و روش پیشنهادی تنها مکان‌یابی نشت‌ها، با تعداد و آرایش فشارسنج‌های موجود را بررسی می‌کند.

۲-۱- تابع هدف

تابع هدف شامل کمینه کردن اختلاف داده‌های شبیه‌سازی شده و میدانی فشار است که به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$Cost = \sum_{t=1}^T \left(\frac{\sum_{nh=1}^{NH} |P_{sim,t,nh} - P_{obs,t,nh}|}{NH} \right) \quad (1)$$

که $Cost$: تابع هزینه (یا تابع هدف)، t : شمارشگر زمان، T : تعداد کل زمان‌هایی که داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده است، nh : شمارشگر فشارسنج‌های شبکه، NH : تعداد کل فشارسنج‌های

(۴) از GA استفاده می‌شود. از جمله مزایای چنین رویکردی، کارایی بالای آن نسبت به الگوریتم K-means متعارف، در خوشه‌بندی مجموعه داده‌های بزرگ و پیچیده و قابلیت همگرا شدن آن به نقطه بهینه جهانی هنگام کمینه کردن تابع هدف (رابطه (۴)) است. هم‌چنین استفاده از GA سبب کاهش زمان انجام محاسبات خوشه‌بندی می‌شود؛ به گونه‌ای که این کاهش بالغ بر ۹۶٪ نیز گزارش شده است (Damos et al., 2024). لذا با توجه به مزایای ذکرشده، در این پژوهش به منظور گروه‌بندی گره‌ها یا پهنه‌بندی شبکه از روش خوشه‌بندی K-means با الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. معیار خوشه‌بندی نیز فاصله هندسی گره‌ها از یکدیگر است. فلوچارت کلی این فرآیند در شکل ۲ آورده شده است.

یکی از گام‌های مهم در پیاده‌سازی رویکرد دوم پیشنهادی، تعیین تعداد خوشه‌ها یا گروه‌های گرهی یا پهنه‌ها (k) است. در روش پیشنهادی، ابتدا شبکه آبرسانی مورد مطالعه برای تعداد مختلف گروه‌های گرهی (۲، ۳، ... و k)، خوشه‌بندی یا پهنه‌بندی می‌شود. در ادامه تعداد زیادی سناریوی عمدی نشت در مدل هیدرولیکی شبکه ایجاد می‌شود؛ سپس به‌ازای هر پیکره‌بندی ممکن از گروه‌های گرهی، با اجرای سناریوهای نشت‌یابی، درصد موفقیت الگوریتم برای شناسایی پرنش‌ترین ناحیه تعیین می‌شود. در نهایت، تصمیم‌گیری درخصوص تعداد پهنه‌های مورد نظر صورت می‌گیرد. بدیهی است هر چقدر تعداد گروه‌های گرهی کم‌تر باشد، درصد موفقیت الگوریتم در یافتن پرنش‌ترین ناحیه افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزایش تعداد گروه‌های گرهی، هرچند درصد موفقیت الگوریتم نشت‌یابی کاهش می‌یابد، ولی مساحت ناحیه گزارش‌شده به‌عنوان پرنش‌ترین ناحیه کاهش یافته و این سبب کم شدن هزینه‌های مربوط به مکان‌یابی دقیق نشت‌ها توسط روش‌های فیزیکی خواهد شد. لازم‌به‌ذکر است با توجه به ویژگی‌های هیدرولیکی هر شبکه آبرسانی، باید فرآیند فوق برای آن شبکه صورت گرفته و آنگاه درخصوص تعداد گروه‌های گرهی آن تصمیم‌گیری نمود.

۲-۴- الگوریتم ژنتیک (GA)

از میان تمام الگوریتم‌های موجود فراکاوشی، الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتمی است که از فرآیند تکامل زیستی الهام گرفته و به‌خوبی شناخته شده است. GA از تئوری بقای داروین تقلید می‌کند. این الگوریتم توسط Holland, (1992) معرفی شد. المان‌های پایه GA، شامل کروموزوم‌ها، انتخاب برانندگی و عملگرهای الهام‌گرفته زیستی است. عملگرهای اشاره شده شامل

بودن لوله‌های شبکه، ضریب نشت به‌عنوان یک پارامتر تنظیمی مستقل از فشار، در یک مسئله واسنجی در نظر گرفته شده است. رویکرد مذکور نیز یکی از نوآوری‌های این پژوهش است.

۲-۳- خوشه‌بندی K-means با الگوریتم ژنتیک (GA)

فرآیند خوشه‌بندی یکی از مهم‌ترین مسائل موجود در زمینه داده‌کاوی و یادگیری ماشین است. روش‌های بسیاری درخصوص خوشه‌بندی وجود دارند؛ روش خوشه‌بندی K-means یکی از قوی‌ترین الگوریتم‌های موجود در زمینه خوشه‌بندی است. این روش در مسائل مختلفی مورد استفاده قرار گرفته و نتایج رضایت‌بخشی را به ارمغان آورده است (Wang et al., 2024). خوشه‌بندی، شامل تقسیم مجموعه داده‌های موجود به k خوشه، یافتن حداقل مجموع مربعات خطا بین مجموعه داده‌ها و میانگین یک خوشه و درنهایت تخصیص هر داده به نزدیک‌ترین مرکز خوشه موجود است. به‌صورت ریاضی، در صورتی که مجموعه داده‌های موجود با $X = \{x_i\}$ نمایش داده شوند که در آن $i=1,2,\dots,n$ (n تعداد کل داده‌های موجود) باشد، در خوشه‌بندی X به "k" خوشه $C = \{c_j\}$ که در آن $j=1,2,\dots,k$ تقسیم‌بندی می‌شود و مجموع خطای مربعات هر خوشه $(J(C_k))$ از رابطه (۳) به‌دست آورده می‌شود (Ikotun et al., 2023):

$$J(C_k) = \sum_{x_i \in C_k} \|x_i - \mu_k\|^2 \quad (3)$$

در الگوریتم K-means، هدف این است که مجموع خطای مربعات هر خوشه، کمینه شود؛ به‌عبارت دیگر، هدف کمینه کردن رابطه (۴) است (Ikotun et al., 2023):

$$J(C) = \sum_{y=1}^k \sum_{x_i \in C_k} \|x_i - \mu_k\|^2 \quad (4)$$

درخصوص مسئله مورد بررسی، مجموعه داده‌های موجود، شامل گره‌های شبکه مورد مطالعه است. باید توجه شود K-means اساساً یک الگوریتم خوشه‌بندی ساده است که بر اساس جامعه آماری موجود، در تلاش برای یافتن k خوشه‌های غیرهمسان است. در واقع نام دیگر الگوریتم K-means، الگوریتم لوید^{۱۳} است که یک الگوریتم کاوشی بوده و مبتنی بر تکرار است و عملیات خوشه‌بندی نقاط و تبدیل آن‌ها به گروه‌هایی با یک مرکز را انجام می‌دهد. از سوی دیگر در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی در زمینه ترکیب K-means با GA انجام شده است (Damos et al., 2024)؛ در این رویکرد برای کمینه کردن رابطه

یک از کروموزوم‌های منتخب جهش (با تعداد کل n_m که در آن $n_m = p_m \cdot n_{pop}$ ؛ n_{pop} برابر تعداد کل اعضای جمعیت یا تعداد کل کروموزوم‌های موجود)، به صورت تصادفی انتخاب شده و مقدار آن‌ها بر اساس رابطه (۷) تغییر می‌یابد.

$$r_m^d = x_m^d + \text{sigma} \cdot N(0, 1),$$

$$\text{sigma} = \text{delta} (x_{\max}^d - x_{\min}^d) \quad (7)$$

$$; (m = 1, \dots, n_m)$$

که u : شماره مؤلفه‌هایی از n_m کروموزومی است که قرار است دچار جهش شوند؛ delta : درصدی از عرض فضای جستجو، x_{\min}^d و x_{\max}^d به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار ممکن بعد از d ام کروموزوم x_m و $N(0, 1)$: یک عدد تصادفی است که از توزیع نرمال استاندارد ایجاد می‌شود. در نتیجه اعمال عملگر جهش، n_m کروموزوم جدید تولید می‌شود (جمعیت جهش یافتگان).

در مورد موضوع این پژوهش، هر کروموزوم به معنای هر مقدار در نظر گرفته شده برای مختصات جغرافیایی مرکز خوشه‌ها است. یعنی هر کروموزوم دارای ماتریس با k سطر و ۲ ستون است. معیار برازندگی کروموزوم‌ها مقدار تابع هدف (رابطه (۴)) است؛ بدین معنی که در بین دو کروموزوم موجود، کروموزومی نسبت به دیگری برتری دارد که مقدار تابع هدف مورد نظر به‌زای آن، کم‌تر از دیگری است.

۲-۵- الگوریتم بهینه‌سازی ملخ (GOA)

GOA یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراکاوشی بهینه‌سازی است که توسط Saremi et al. (2017) ارائه شده است. این الگوریتم جدید در بهینه‌سازی مسائل مختلفی استفاده شده و نتایج رضایت‌بخشی گرفته شده است (Aghsami et al., 2024; Thamaraimanalan and Ramalingam, 2024). از سوی دیگر، بر اساس اطلاعات نویسندگان این مقاله، GOA برای نخستین بار است که در حوزه نشت‌یابی در شبکه‌های آبرسانی به‌کار گرفته می‌شود. الگوریتم پیشنهادی از لحاظ ریاضیاتی رفتار گروه‌های ملخ در طبیعت را برای حل مسائل بهینه‌سازی مطابق رابطه (۸) مدل‌سازی می‌کند.

$$\bar{b}_i^d = c \left(\sum_{j=1}^{GH} c \frac{ub_d - lb_d}{2} s \left(\left| b_j^d - b_i^d \right| \right) \frac{b_j - b_i}{d_{ij}} \right) + Td \quad (8)$$

که b_j^d, b_i^d و \bar{b}_i^d : به ترتیب موقعیت کنونی ملخ λ_m و λ_m و موقعیت جدید ملخ λ_m در d امین بعد، ub_d و lb_d : به ترتیب کران

انتخاب، جهش و تقاطع است. هر کروموزوم به معنای پاسخی از مسئله بهینه‌سازی است و بعد آن نیز به اندازه تعداد ابعاد پاسخ مورد نظر است.

در عملگر تقاطع، اجزای هر دو کروموزوم انتخاب شده (در نقش والد)، تغییر می‌یابند تا فرزندان حاصل شود. بدین منظور ابتدا (p_c) درصد از کل جمعیت موجود انتخاب می‌شود که در آن p_c احتمال تقاطع نامیده می‌شود. در این پژوهش، از چرخ انتخاب رولت (RWS)^{۱۴} برای فرآیند انتخاب در این عملگر، استفاده شده است. در این روش احتمال انتخاب کروموزوم‌هایی که بهتر هستند (از نظر مقدار تابع هدف)، بیش‌تر است. برای این موضوع رابطه (۵)، به منظور محاسبه احتمال متناظر با مقدار تابع هدف استفاده شده است.

$$P_i = \frac{\frac{-\beta \cdot \text{Cost}_i}{\max(\text{Cost})}}{\sum(P_i)} \quad (5)$$

که β : ضریب فشار انتخاب^{۱۵} و Cost_i : برابر مقدار تابع هدف به‌زای کروموزوم λ_m است. سپس با فرض این‌که $X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} \\ \vdots & \vdots \\ x_{k1} & x_{k2} \end{bmatrix}$ و $\hat{X} = \begin{bmatrix} x'_{11} & x'_{12} \\ \vdots & \vdots \\ x'_{k1} & x'_{k2} \end{bmatrix}$ دو والد انتخاب شده باشند (هر دو کروموزومی که به‌عنوان والد انتخاب شده‌اند)، کروموزوم‌های فرزندان Y_1 و Y_2 ، با استفاده از رابطه (۶) حاصل می‌شوند.

$$\begin{cases} Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ \vdots & \vdots \\ y_{k1} & y_{k2} \end{bmatrix} \\ \hat{Y} = \begin{bmatrix} y'_{11} & y'_{12} \\ \vdots & \vdots \\ y'_{k1} & y'_{k2} \end{bmatrix} \end{cases} = \begin{cases} y_{vz} = \alpha_{vz} x_{vz} + (1 - \alpha_{vz}) x'_{vz} \\ y'_{vz} = \alpha_{vz} x'_{vz} + (1 - \alpha_{vz}) x_{vz} \end{cases} \quad (6)$$

$$\alpha_{vz} \sim U(-\gamma, 1 + \gamma); \quad v = 1, 2, \dots, k$$

$$z = 1, 2$$

که α_{vz} : به‌عنوان ضرایب موجود در بردار برش (α) و γ : نیز عدد مثبتی است. در نتیجه انجام عملگر تقاطع، n_c کروموزوم جدید تولید می‌شود (جمعیت فرزندان). در عملگر جهش، رابطه (۷) به برخی از بعدهای کروموزوم‌ها، اعمال می‌شود. برای اعمال عملگر جهش، ابتدا p_m درصد از کروموزوم‌های نسل موجود به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. در ادامه $nmu = \lfloor mu \times D \rfloor$ برابر mu درصدی از تعداد مؤلفه‌های هر کروموزوم است که قرار است عملگر جهش روی آن‌ها پیاده‌سازی شود و D شامل بعد هر کروموزوم بوده که در مسئله حاضر برابر $2k$ است) مؤلفه از هر

همگرایی، برابر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. توان نشت نیز در هر دو شبکه ثابت و برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است. برای ایجاد این سناریوها، نشت مورد نظر در مدل هیدرولیکی شبکه مورد نظر اعمال شده و بعد از مدل سازی هیدرولیکی شبکه، نتایج فشار در نقاطی که به عنوان محل های مجهز به فشارسنج در نظر گرفته شده اند، به عنوان داده های میدانی به الگوریتم نشت یابی منتقل شده است. با توجه به تعداد زیاد سناریوهای نشتی، از سامانه رایانش موازی دانشگاه (سرمد) شهید بهشتی، برای پیاده سازی روش پیشنهادی بهره گرفته شده است.

۳-۱- شبکه پولاکیس

شماتیک شبکه پولاکیس در شکل ۳ آورده شده است. در این شبکه، طول لوله های افقی و عمودی به ترتیب برابر ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متر، ضریب هیزن-ویلیامز هر لوله (که صلب در نظر گرفته شده است) برابر ۱۳۰ بوده و دارای ۲۰ حلقه، ۳۰ گره، ۵۰ لوله و یک مخزن (با ارتفاع سطح آب برابر ۱۰۰ متر) است. قطر هر لوله در شکل ۳ نمایان است. دبی متوسط مصرف در تمامی گره های این شبکه برابر ۲۵ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. محل پایش فشار (استخراج داده های میدانی و شبیه سازی شده) نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. در خصوص الگوی ساعتی مصرف مشترکین، فرض شده است که ضریب مصرف از ساعت ۱۲ شب تا ۶ صبح برابر ۰/۵، از ساعت ۶ صبح تا ۱۲ ظهر برابر ۱/۰، از ساعت ۱۲ ظهر تا ۶ بعدازظهر برابر ۲ و از ساعت ۶ بعدازظهر تا ۱۲ شب برابر ۱/۵ است.

۳-۱-۱- رویکرد اول در شبکه پولاکیس

در رویکرد اول فرض بر آن است که تعداد نشت موجود در شبکه از قبل مشخص است و الگوریتم با فرض تعداد معلوم نشت ها و تولید متغیر تصمیم به تعداد مکان و مقدار آن ها، نشت را مکان یابی می کند. در این حالت ۱۰۰۰ سناریوی نشت شامل یک، دو، سه، چهار و پنج نشت فرضی همزمان، هر کدام به تعداد ۲۰۰ سناریو، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. انتخاب محل نشت ها هم کاملاً تصادفی (توسط تابع randi نرم افزار متلب) و با در نظرگیری احتمال یکسان برای همه گره های شبکه، انجام گرفته است. براساس تحلیل آماری مقدار متوسط نشت های مورد مطالعه (شکل (۴))، پارامترهای حداقل، حداکثر، انحراف از معیار، میانگین، چارک اول و چارک سوم به ترتیب حدود ۵/۱۸، ۱۹/۵۶، ۴/۴۳، ۱۲/۹۲، ۸/۸۵ و ۱۶/۷۴ درصد کل دبی ورودی به شبکه پولاکیس بوده است.

بالا و پایین در d آمین فاصله، d_{ij} فاصله بین i آمین و j آمین ملخ، \hat{T}_d : بهترین راه حل کشف شده در d آمین بعد و c : یک ضریب کاهش (رابطه (۹)) و GH : تعداد ملخ ها را مشخص می کند.

$$c = c_{\max} - l \frac{c_{\max} - c_{\min}}{L} \quad (9)$$

که c_{\min} و c_{\max} : مقدار بیشینه و کمینه ضریب c ، l : شماره تکرار کنونی و L : تعداد کل تکرار را نشان می دهند. s : تابعی برای تعریف نمودن قدرت نیروی اجتماعی برای جاذبه و یا دافعه بین ملخ ها است (رابطه (۱۰)).

$$s(r) = fe^{\frac{-r}{w}} - e^{-r} \quad (10)$$

که f : نشان دهنده شدت جاذبه و w : مقیاس طولی جاذبه هستند.

در خصوص موضوع این پژوهش، هر ملخ به منزله یک ماتریس نشت (LM) است. بدین معنی که:

- در رویکرد اول نشت یابی به روش پیشنهادی، هر ملخ به مفهوم ماتریسی دارای یک سطر و $2n_L$ ستون است ($d=2n_L$) که در آن n_L تعداد نشت های همزمان موجود است؛ n_L مؤلفه اول آن نشان دهنده محل نشت ها و n_L مؤلفه دیگر بیانگر مقدار ضرایب نشت متناظر با n_L مؤلفه اول است.
- در رویکرد دوم، هر ملخ به مفهوم ماتریسی دارای یک سطر و G ستون است ($d=G$) که در آن G تعداد کل گروه های گرهی بوده و مقدار هر درایه از این ماتریس، بیانگر مجموع ضرایب نشت گره های گروه متناظر است.

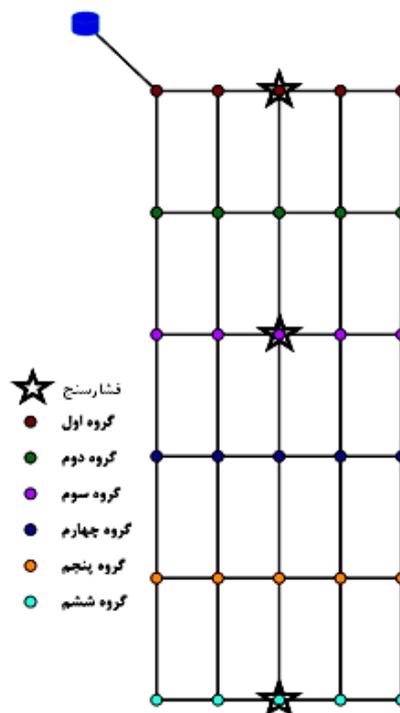
۳- نتایج و بحث

در ادامه صحت سنجی روش پیشنهادی بر روی شبکه های مرجع پولاکیس و بالرما، در حالات استفاده از رویکرد اول و دوم انجام شده است. در هر یک از شبکه های مورد مطالعه، ۱۰۰۰ سناریوی مختلف نشت و پاسخ های نهایی بررسی شدند. لازم به ذکر است که به دلیل ماهیت جستجوی تصادفی الگوریتم های فراکاوشی نظیر GOA، برای مکان یابی نشت ها در هر سناریو، سه بار روش پیشنهادی اجرا شده و نتایج مربوط به تکراری که کمترین مقدار تابع هدف (رابطه (۱)) حاصل شده، مورد استفاده قرار گرفته است. در هر یک از دو شبکه، تعداد تکرار لازم در GOA برای رسیدن به

هرچند با افزایش تعداد نشت‌های ممکن در شبکه، قابلیت رویکرد اول برای تشخیص صحیح مکان‌های نشت کاهش یافته است؛ این احتمالاً به دلیل افزایش فضای جستجوی مورد نیاز توسط الگوریتم است. یعنی الگوریتم باید در حالت n نشت هم‌زمان، پاسخ صحیح را از فضای جستجویی با تعداد $\binom{N}{n}$ (تعداد کل گره‌های شبکه) داده بیابد و بدیهی است که با افزایش تعداد n ، درصد موفقیت آن کاهش یابد. به صورت کلی نیز صحت رویکرد اول در مکان‌یابی نشت‌های شبکه پولاکیس برابر $60/2$ درصد بوده است.

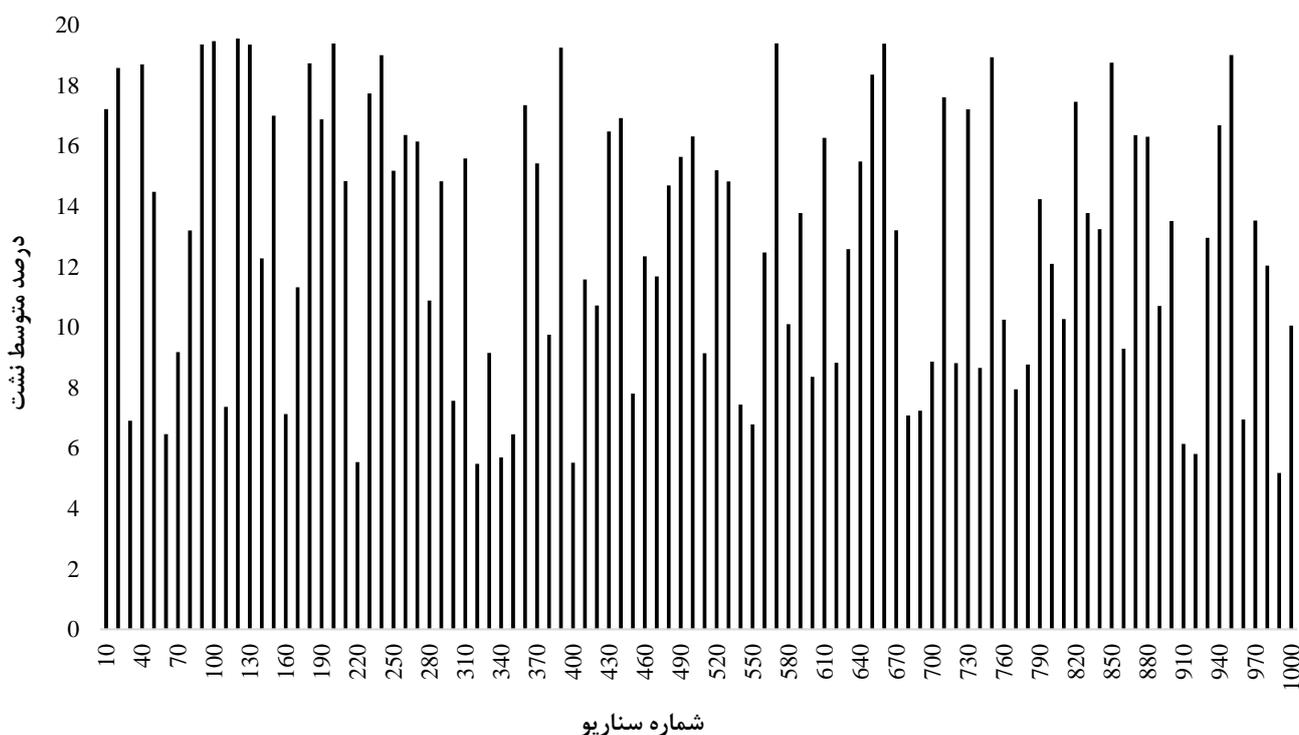
۳-۱-۲- رویکرد دوم در شبکه پولاکیس

یکی از محدودیت‌های رویکرد اول آن است که تعداد نشت‌های موجود در شبکه آبرسانی مورد مطالعه باید معلوم باشد؛ درحالی‌که در شبکه‌های آبرسانی واقعی، تعداد نشت‌های هم‌زمان ممکن نامعلوم است. از سوی دیگر براساس نتایج (شکل ۵) دیده شد که تعیین محل دقیق نشت‌ها با افزایش تعداد نشت‌های هم‌زمان ممکن کاهش می‌یابد؛ لذا در رویکرد دوم، به جای تعیین محل دقیق نشت‌ها، پرنشت‌ترین ناحیه موجود تعیین می‌شود. این هدف از دیدگاه بهره‌برداری بسیار مهم است؛ زیرا با اطلاع از چنین ناحیه‌ای در شبکه می‌توان عملیات نشت‌یابی فیزیکی را در مقیاسی کوچک‌تر (نسبت به کل شبکه) انجام داد و این سبب کاهش هزینه‌های نشت‌یابی خواهد شد.

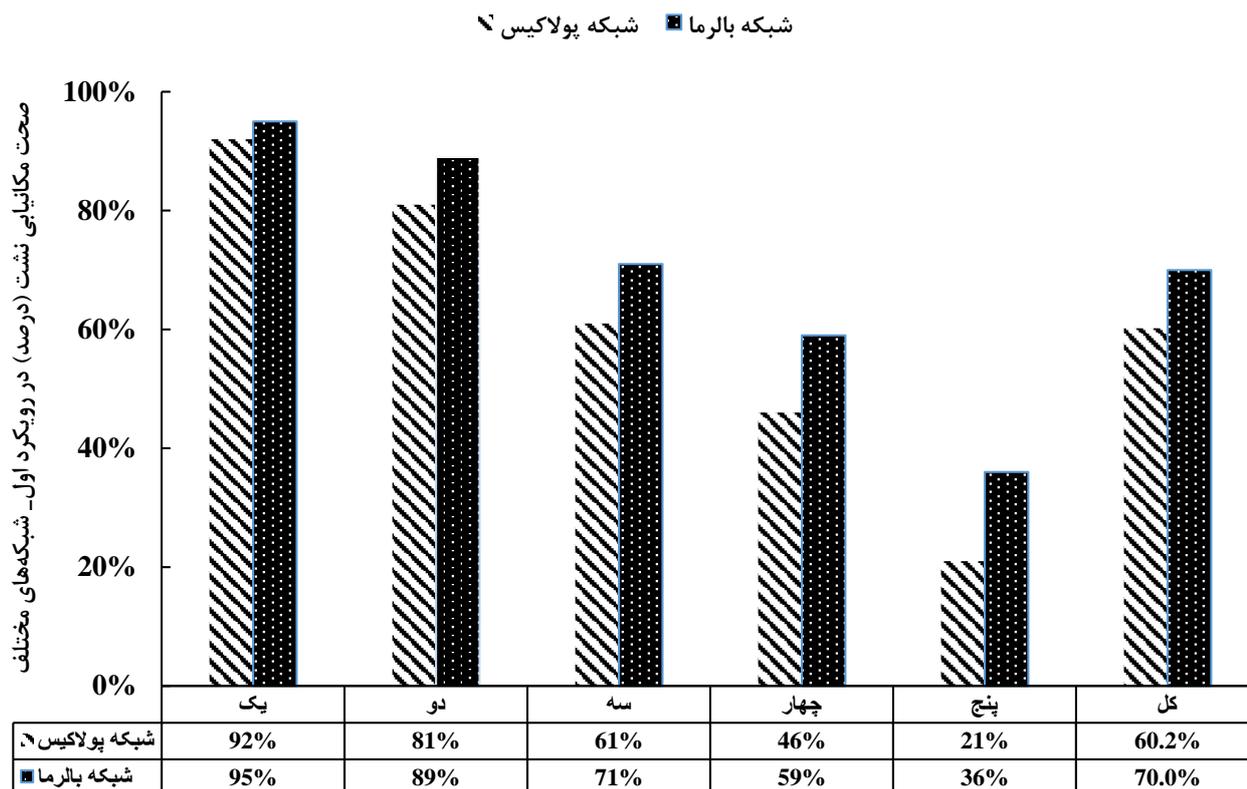


شکل ۳- شبکه پولاکیس

خلاصه نتایج مربوط به پیاده‌سازی سناریوهای فوق در شکل ۵ ارائه شده است. براساس این شکل، مشاهده می‌شود که صحت رویکرد اول در مکان‌یابی یک، دو، سه، چهار و پنج نشت هم‌زمان در شبکه پولاکیس به ترتیب ۹۲، ۸۱، ۶۱، ۴۶ و ۲۱ درصد بوده است. براساس نتایج، الگوریتم صحت قابل‌توجهی (بالای ۹۰ درصد) در سناریوهای دارای یک نشت در شبکه داشته است؛



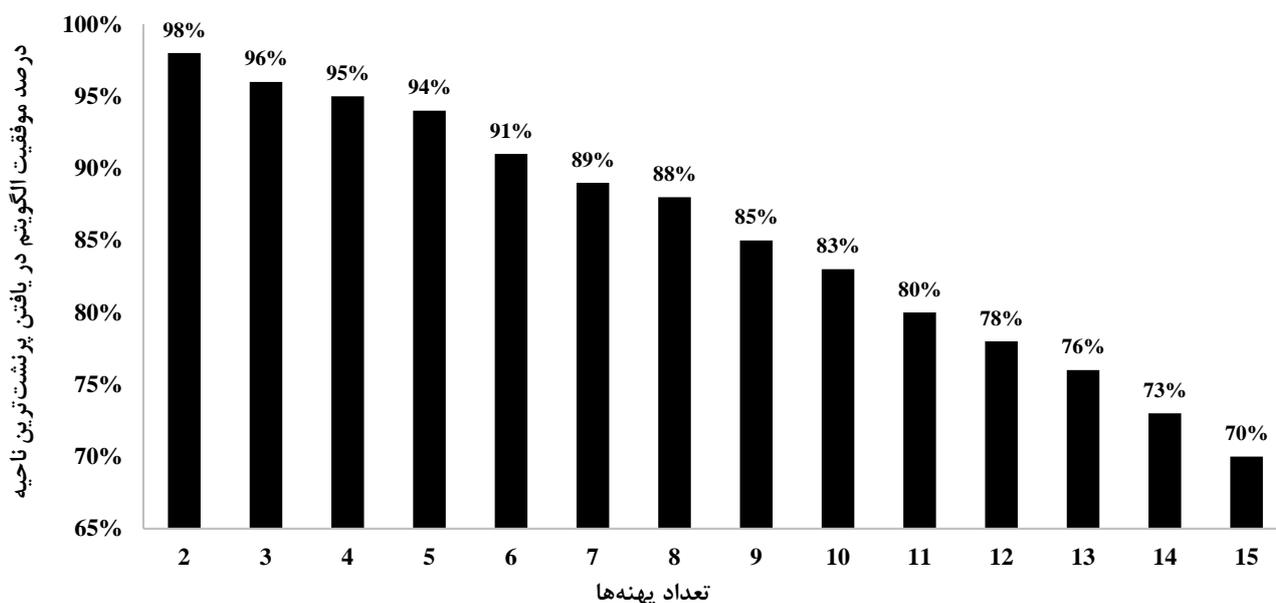
شکل ۴- درصد متوسط نشت‌های مطالعه‌شده در سناریوهای مختلف، شبکه پولاکیس



شکل ۵- خلاصه نتایج مربوط به پیاده‌سازی رویکرد اول نشت‌یابی در شبکه‌های مورد مطالعه

گره‌های گروه تقسیم کرده و ضریب نشت نهایی هر گره را گزارش می‌کند. خلاصه انجام چنین اقدامی در شبکه پولاکیس در شکل ۶ ارائه شده است. در این شکل، درصد موفقیت الگوریتم در تعداد گره‌های گرهی برابر ۲ تا ۱۵ به ترتیب ۹۸ درصد تا ۷۰ درصد بوده است.

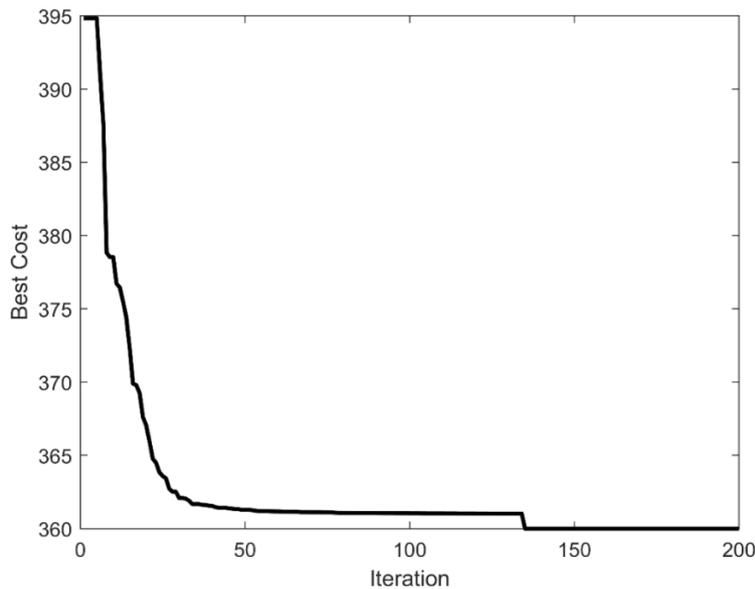
در این روش گروه‌بندی گره‌ها براساس معیار فاصله و براساس روش خوشه‌بندی K-means با الگوریتم ژنتیک (بخش ۲-۳) انجام شده است. به این ترتیب گره‌هایی که فاصله کمتری دارند در یک گروه قرار گرفته و به آن‌ها ضریب نشت یکسانی تعلق می‌گیرد. مدل پس از تخصیص ضرایب نشت به گره‌های مسئله و کمینه کردن تابع هدف، ضریب نشت هر گره را بر تعداد



شکل ۶- خلاصه نتایج مربوط به درصد موفقیت الگوریتم در یافتن پرنشت‌ترین ناحیه در شبکه پولاکیس

کم‌تر از ۹۰٪ باشد. براساس توضیحات بیان‌شده، تعداد پهنه‌ها یا گروه‌های گرهی برابر ۶ در شبکه پولاکیس انتخاب می‌شود. پهنه‌های مختلف شبکه در این حالت، با رنگ‌های مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. به‌ازای چنین پیکره‌بندی از شبکه، درصد موفقیت الگوریتم در یافتن پرنش‌ترین ناحیه، برابر ۹۱٪ بوده است. نمودار همگرایی خروجی روش K-means در شبکه پولاکیس در تعداد پهنه برابر ۶، در شکل ۷ ارائه شده است.

براساس شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد گروه‌های گرهی، درصد موفقیت الگوریتم در یافتن پرنش‌ترین ناحیه کاهش می‌یابد؛ از طرف دیگر، افزایش تعداد گروه‌های گرهی منجر به کاهش هزینه‌های نشت‌یابی، برای مکان‌یابی دقیق نشت در ناحیه هدف خواهد شد. پیشنهاد ارائه‌شده در این مقاله، انتخاب تعداد گروه‌های گرهی از شبکه مورد مطالعه است که به‌ازای آن پیکره‌بندی، درصد موفقیت الگوریتم در یافتن پرنش‌ترین ناحیه حداقل ۹۰٪ بوده و به‌ازای تعداد گروه‌های گرهی بیش‌تر از آن،



شکل ۷- نمودار همگرایی خوشه‌بندی با روش K-means در شبکه پولاکیس در حالت k=6

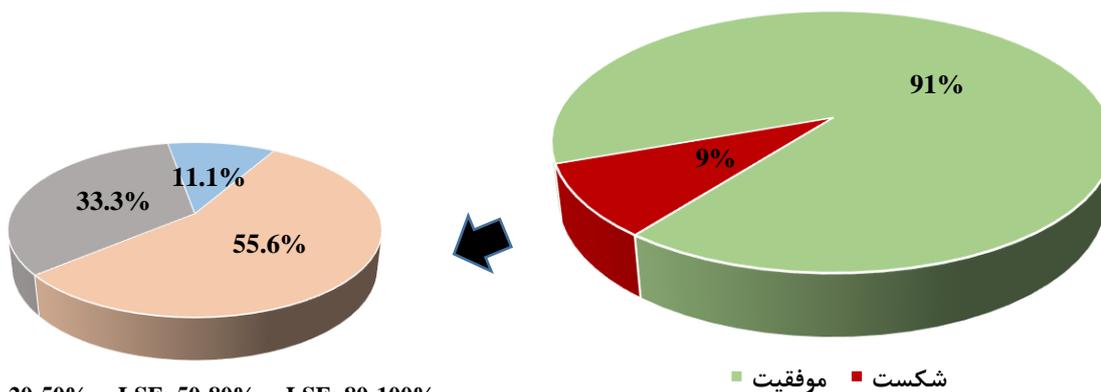
که LSF_i : بیانگر تغییرات مقدار واقعی نشت در سناریوی i ام، $TE_{min,i}$ و $TE_{max,i}$: به‌ترتیب مقدار (درصد) حداکثر و حداقل مجموع ضرایب واقعی نشت در بین دسته‌ها در سناریوی i ام است.

به‌صورت کلی پارامتر LSF، بیانگر اختلاف بیش‌ترین از کم‌ترین مجموع ضرایب واقعی نشت گرهی بین دسته‌های شبکه مورد مطالعه است. هر چقدر این اختلاف بیش‌تر باشد، نشان‌دهنده این است که مقدار نشت پهنه‌های گروه‌های گرهی، تفاوت زیادی با هم دارند و اگر این اختلاف کم‌تر باشد، یعنی مقدار واقعی کل نشت گروه‌های گرهی، تفاوت زیادی با هم ندارند (توزیع مقدار کل نشت در شبکه، یکنواخت‌تر است)؛ بنابراین انتظار می‌رود که فرآیند شناسایی ناحیه‌ای که مقدار نشت‌های آن بیشینه است، کار سخت‌تری باشد. خلاصه تحلیل آماری این پارامتر حاکی از آن است که حداقل پارامتر LSF در بین ۱۰۰۰ سناریو برابر ۲۰ درصد و حداکثر آن برابر ۱۰۰ درصد است.

۳-۱-۲-۱- تحلیل بیش‌تر روی پاسخ پیشنهادی (k=6)

در این قسمت، تحلیل بیش‌تری روی نتایج ۱۰۰۰ سناریوی بررسی‌شده درحالتی که گره‌های شبکه به ۶ گروه تقسیم‌بندی شده (شکل ۶) انجام شده است. در این راستا، پارامتری تحت‌عنوان پارامتر نوسان مکانی مقدار کل نشت (LSF)^{۱۶} تعریف شده است. برای تعیین این پارامتر، مجموع ضرایب واقعی نشت گرهی در هر گروه گرهی محاسبه می‌شود. منظور از ضریب واقعی نشت، ضریب نشتی است که در هنگام ایجاد سناریوهای مورد بررسی (برای شبیه‌سازی سناریو) در مدل هیدرولیکی در نظر گرفته شده است. سپس دو مقدار حداکثر و حداقل مجموع ضرایب واقعی نشت گرهی پهنه‌های مورد نظر به مجموع ضرایب واقعی نشت کل شبکه، به‌دست آورده می‌شود. در ادامه مقدار پارامتر LSF در هر سناریو، براساس رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$LSF_i = TE_{max,i} - TE_{min,i} \quad (11)$$



شکل ۸- خلاصه نتایج برآورد میزان موفقیت الگوریتم با استفاده از رویکرد دوم در یافتن پرنشترین ناحیه شبکه پولاکیس و تحلیل عدم موفقیت‌های آن در گروه‌بندی پیشنهادی ($k=6$)

ناحیه را با درصد موفقیت برابر ۹۹٪ مکان‌یابی نماید.

۳-۲- شبکه بالرما

شبکه آبیاری شهر بالرما در استان آلمریا^{۱۷} (موجود در کشور اسپانیا) قرار دارد. این شبکه دارای ۴ مخزن آب، ۴۴۳ گره و ۴۵۴ لوله (که صلب فرض شده‌اند) و ۸ حلقه و متوسط دبی مصرف این شبکه حدود ۱/۱۵ مترمکعب بر ثانیه است. شماتیک این شبکه و محل پایش فشار در شکل ۹ ارائه شده است. الگوی مصرف آب این شبکه، همانند الگوی مصرف آب شبکه پولاکیس در نظر گرفته شده است.

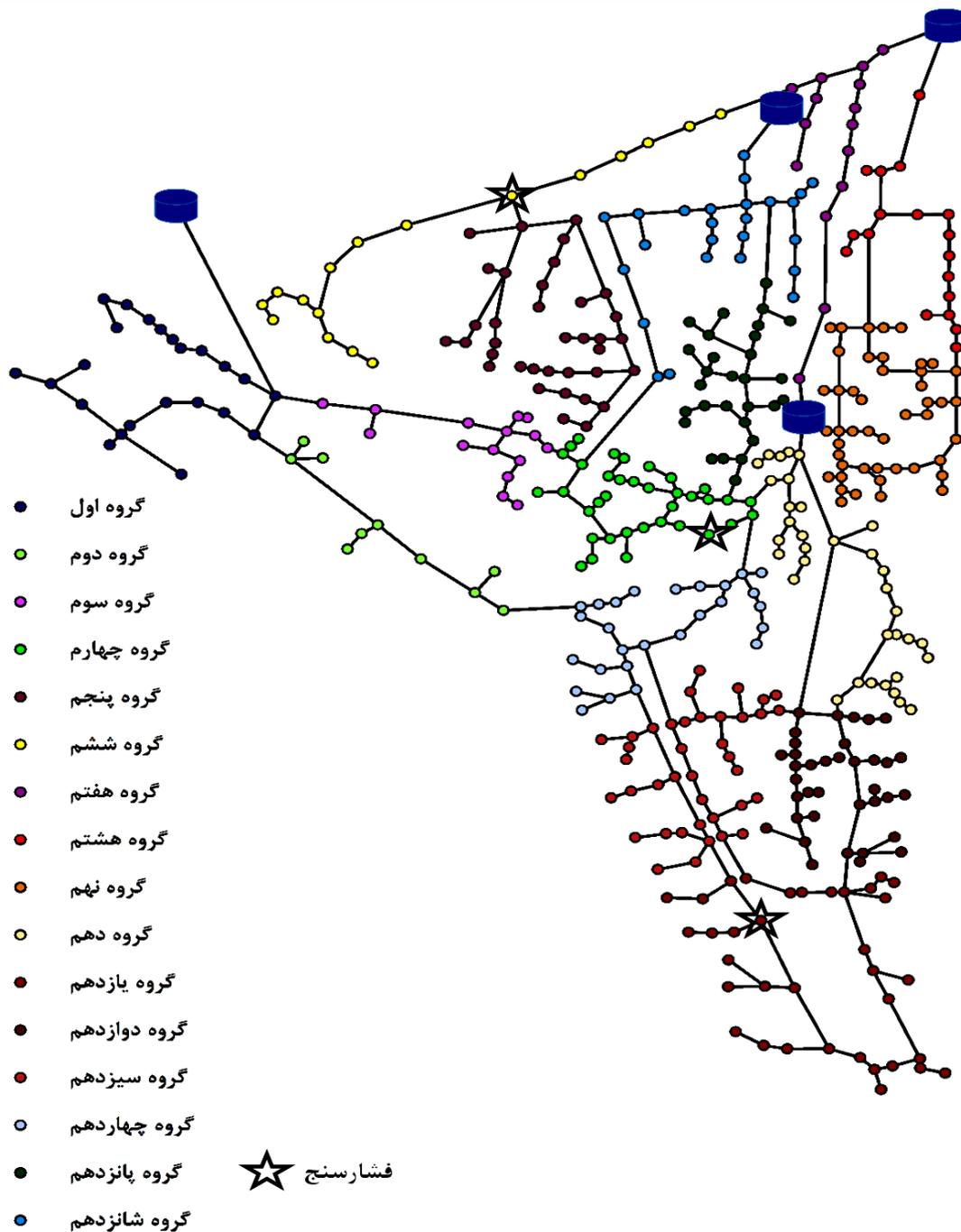
۳-۲-۱- رویکرد اول در شبکه بالرما

در این رویکرد، ۱۰۰۰ سناریوی نشت شامل یک، دو، سه، چهار و پنج نشت فرضی هم‌زمان (هر کدام به تعداد ۲۰۰ سناریو) مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. انتخاب محل و مقدار نشت‌ها، تصادفی و با در نظرگیری احتمال یکسان برای همه گره‌های شبکه، صورت گرفته است. پارامترهای آماری حداقل، حداکثر، انحراف از معیار، میانگین، چارک اول و چارک سوم مربوط به مقدار متوسط نشت در سناریوهای بررسی شده، به ترتیب حدود ۵/۰۷، ۱۹/۹۴، ۴/۳۲، ۱۲/۰۱، ۷/۸۲ و ۱۶/۱۸ درصد کل دبی ورودی به شبکه بالرما بوده است. نتایج مربوط به پیاده‌سازی سناریوهای نشت، در شکل ۵ آورده شده است. براساس این شکل مشاهده می‌شود که درصد موفقیت این رویکرد (در مکان‌یابی نشت‌ها) در سناریوهای دارای یک، دو، سه، چهار و پنج نشت هم‌زمان به ترتیب ۹۵، ۸۹، ۷۱، ۵۹ و ۳۶ درصد بوده است. لذا هر چند الگوریتم، صحت قابل توجهی (۹۵٪) در سناریوهای دارای یک نشت داشته است، اما با افزایش تعداد نشت‌های ممکن در شبکه، قابلیت رویکرد اول برای تشخیص صحیح مکان‌های نشت

در ادامه، تمام سناریوهای مورد بررسی با توجه به مقدار پارامتر LSF به سه دسته تقسیم می‌شوند و درصد عدم موفقیت الگوریتم پیشنهادی در هر بازه LSF، نسبت به تمام عدم موفقیت‌ها در یافتن پرنشترین ناحیه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن در شکل ۸ با نمودار دایره‌ای نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش اختلاف مقدار نشت بین گروه‌های گرهی، توانایی الگوریتم در یافتن پرنشترین ناحیه، افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، درصد زیادی از عدم موفقیت‌های الگوریتم، مربوط به سناریوهایی است که پارامتر LSF در آن‌ها کم‌تر از سناریوهای دیگر است؛ یعنی در سناریوهایی که توزیع مقدار واقعی کل نشت در گروه‌های گرهی، یکنواخت‌تر از بقیه سناریوها است، توانایی الگوریتم در یافتن پرنشترین ناحیه کاهش یافته است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، چنین رفتاری قابل پیش‌بینی بود. قبلاً بیان شده بود که از ۱۰۰ درصد سناریوهایی بررسی شده، الگوریتم موفق شده بود که تنها در ۹۱٪ از آن‌ها، پرنشترین ناحیه را شناسایی کند. به عبارت دیگر نتوانسته بود که در ۹ درصد از سناریوها، آن را شناسایی نماید. براساس شکل ۸، مشاهده می‌شود که حدود ۵۵/۶ درصد از کل عدم موفقیت‌ها در شناسایی پرنشترین ناحیه، مربوط به سناریوهایی است که پارامتر LSF آن‌ها در اولین بازه از تقسیم‌بندی قرار دارد؛ یعنی سناریوهایی که در آن‌ها، نوسانات مقدار کل نشت در گروه‌های مختلف، کم است (حدوداً بین ۲۰ تا ۵۰ درصد). این سناریوها، ۵٪ از کل سناریوهای بررسی شده را شامل می‌شود. در حالی که حدود ۱۱/۱ درصد از کل عدم موفقیت‌ها در شناسایی پرنشترین ناحیه (که حدود ۱ درصد از کل سناریوهای بررسی شده را تشکیل می‌دهد)، مربوط به سناریوهایی است که پارامتر LSF آن‌ها در بازه حدود ۸۰ تا ۱۰۰٪ قرار دارد؛ این بدین معنا است که رویکرد دوم می‌تواند پرنشترین

برابر ۰/۰۰۱۷ متر/متر است؛ درحالی‌که مقدار فوق برای شبکه بالرما حدود ۰/۰۰۵۰ متر/متر است؛ زیاد بودن شیب خط انرژی سبب تغییرات بیش‌تر فشار آب حاکم بر شبکه و در نتیجه وقوع پدیده‌هایی نظیر نشت می‌شود. در این زمینه نیز افزایش حدود ۲/۹ برابر شیب خط انرژی در شبکه بالرما نسبت به شبکه پولاکیس، موجب افزایش صحت نشت‌یابی با رویکرد اول روش پیشنهادی شده است.

کاهش‌یافته است؛ مهم‌ترین علت آن افزایش داده‌های فضای جستجوی الگوریتم، با افزایش تعداد نشت‌های هم‌زمان در شبکه است. به‌صورت کلی نیز صحت رویکرد اول در مکان‌یابی نشت‌های شبکه بالرما برابر ۷۰ درصد بوده است. نکته قابل‌توجه دیگر آن است که صحت رویکرد اول در تشخیص مکان نشت‌ها در شبکه بالرما، بیش‌تر از شبکه پولاکیس بوده است (به‌صورت کلی حدود ۱۰٪)؛ یکی از مهم‌ترین دلایل آن، وضعیت هیدرولیکی حاکم بر شبکه بالرما است. متوسط شیب خط انرژی در شبکه پولاکیس

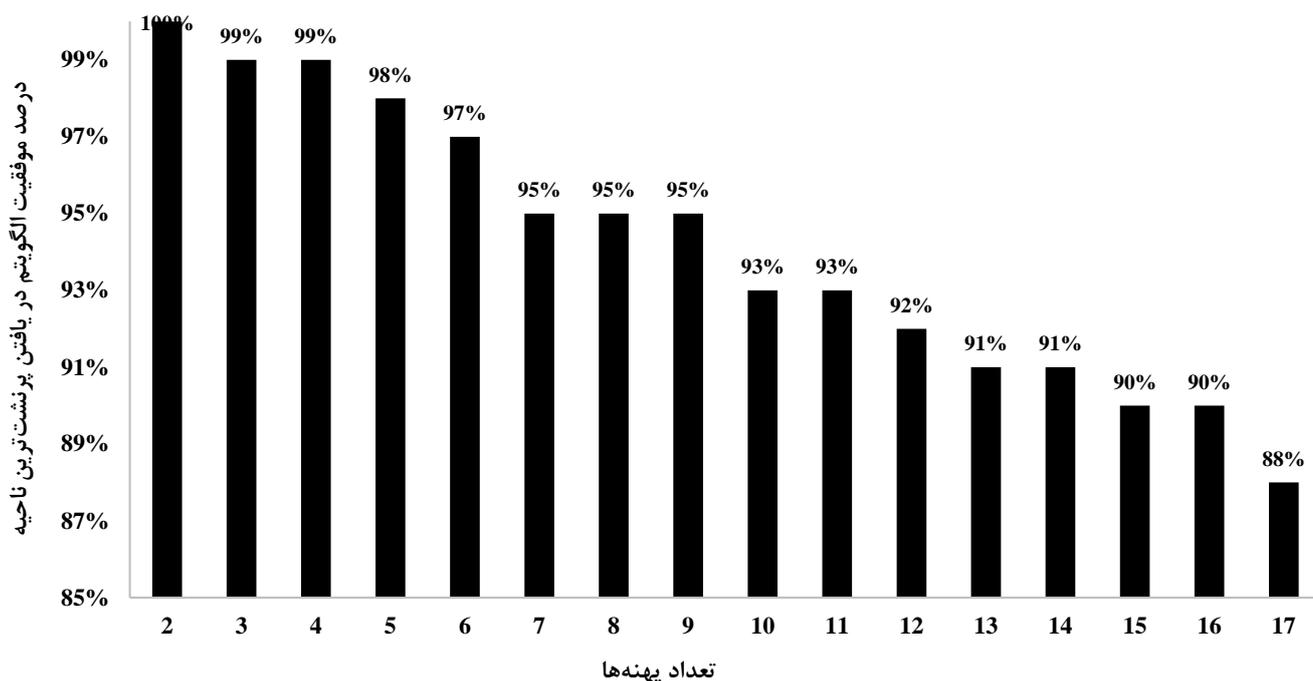


شکل ۹- شبکه بالرما

۳-۲-۲- رویکرد دوم در شبکه بالرما

این حالت پیکره‌بندی پهنه‌های مذکور به رنگ‌های مختلف در شکل ۹ قابل مشاهده است. نکته قابل توجه دیگر آن است که در حالت تعداد پهنه‌های برابر ۶، درصد موفقیت روش پیشنهادی در نشت‌یابی شبکه بالرما برابر ۹۷٪ و در شبکه پولاکیس برابر ۹۱٪ بود. علت آن نیز همان‌طور که قبلاً به آن اشاره شد، زیاد بودن متوسط شیب خط انرژی در شبکه بالرما نسبت به شبکه پولاکیس است که سبب می‌شود تغییرات فشار ناشی از نشت، تأثیر بیش‌تری روی کاهش فشارهای شبکه داشته باشد و در نتیجه شناسایی آن آسان‌تر باشد.

در شکل ۱۰، خلاصه نتایج مربوط به درصد موفقیت رویکرد دوم روش پیشنهادی در مکان‌یابی پرنش‌ترین ناحیه براساس ۱۰۰۰ سناریوی بررسی‌شده، ارائه شده است. براساس نتایج مشاهده می‌شود که در حالت تعداد گروه‌های گرهی برابر ۲ ($k=2$)، درصد موفقیت الگوریتم ۱۰۰ درصد بوده است. از طرف دیگر، در تعداد پهنه‌های برابر ۱۶ و ۱۷، درصد موفقیت الگوریتم برای تشخیص ناحیه هدف به ترتیب ۹۰ و ۸۸٪ برآورد شده؛ برای شبکه بالرما تعداد گروه‌های گرهی برابر ۱۶ انتخاب شده است. در

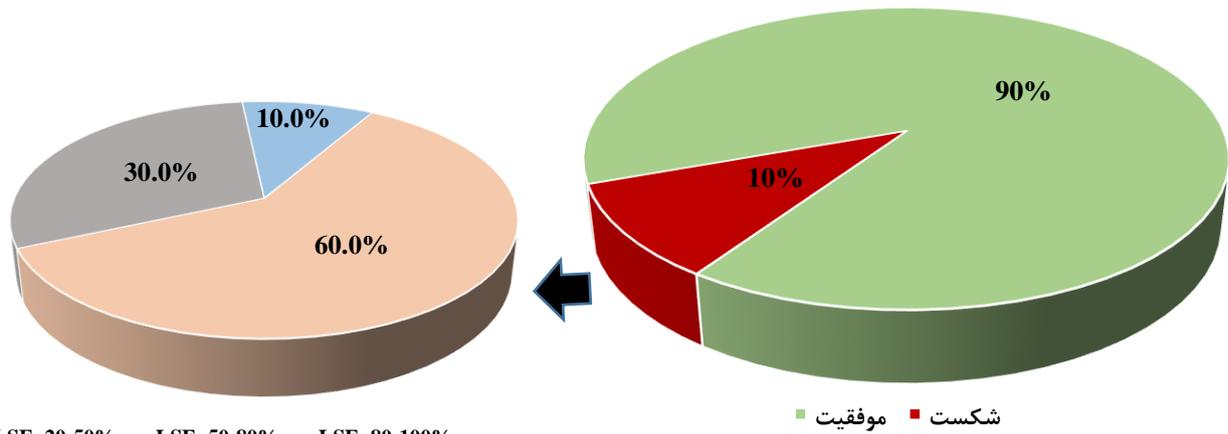


شکل ۱۰- خلاصه نتایج مربوط به درصد موفقیت الگوریتم در یافتن پرنش‌ترین ناحیه در شبکه بالرما

شناسایی نشت ۱۰٪ از سناریوها، ناموفق بود. براساس شکل ۱۱، مشاهده می‌شود که ۶۰٪ از کل عدم موفقیت‌های این الگوریتم در شناسایی پرنش‌ترین ناحیه، مربوط به سناریوهایی است که مقدار پارامتر LSF آن‌ها پایین است؛ یعنی سناریوهایی که در آن‌ها، نوسانات مکانی مقدار کل نشت در پهنه‌های مختلف، کم است (بین ۲۰-۵۰٪). این سناریوها، ۶٪ از کل سناریوهای بررسی‌شده را شامل می‌شود. درحالی‌که ۱۰٪ از کل عدم موفقیت‌ها در شناسایی پرنش‌ترین ناحیه (۱٪ از کل سناریوهای بررسی‌شده)، مربوط به سناریوهایی است که پارامتر LSF آن‌ها در بازه حدود ۸۰-۱۰۰٪ قرار دارد. این بدان معنی است که در صورت بالابودن پارامتر LSF در شبکه مورد مطالعه، الگوریتم پیشنهادی قادر به شناسایی پرنش‌ترین ناحیه با درصد موفقیت ۹۹٪ است.

۳-۲-۲-۱- تحلیل بیش‌تر روی پاسخ پیشنهادی ($k=16$)

در این قسمت، تحلیل بیش‌تری درخصوص قابلیت نشت‌یابی روش پیشنهادی، برای وضعیتی که شبکه بالرما به ۱۶ گروه مطابق با شکل ۹ تقسیم‌بندی شده باشد، ارائه شده است. تمام سناریوهای مورد بررسی با توجه به مقدار پارامتر LSF (حداقل و حداکثر به ترتیب برابر ۲۰ و ۱۰۰ درصد) به ۳ دسته تقسیم‌بندی شده و درصد عدم موفقیت الگوریتم پیشنهادی در هر بازه LSF، نسبت به تمام عدم موفقیت‌ها در یافتن پرنش‌ترین ناحیه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن در شکل ۱۱ با نمودار دایره‌ای نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بین ۱۰۰۰ سناریوی بررسی‌شده، الگوریتم موفق شده بود که در ۹۰٪ از آن‌ها، پرنش‌ترین ناحیه را شناسایی کند. به عبارت دیگر در



شکل ۱۱- خلاصه نتایج برآورد میزان موفقیت الگوریتم با استفاده از رویکرد دوم در یافتن پرنش‌ترین ناحیه شبکه بالرما و تحلیل عدم موفقیت‌های آن در گروه‌بندی پیشنهادی ($k=16$)

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش مبتنی بر واسنجی برای یافتن نشت‌های یک شبکه آبرسانی پیشنهاد شده است که از الگوریتم بهینه‌سازی ملخ (GOA) استفاده می‌کند. مبنای اصلی این روش، مقایسه نتایج فشارهای شبیه‌سازی شده (خروجی مدل هیدرولیکی) و فشارهای متناظر اندازه‌گیری شده (براساس فرآیند فشارسنجی میدانی) در تعدادی از نقاط شبکه، با هدف یافتن محل یا محدوده نشت‌های موجود است. در روش پیشنهادی دو رویکرد مختلف استفاده و مورد بررسی قرار گرفته است. در رویکرد اول، تعداد نشت‌های هم‌زمان موجود در شبکه، از جمله فرض‌های اولیه مسئله است و الگوریتم پیشنهادی محل دقیق نشت‌ها را شناسایی می‌کند. در رویکرد دوم نیاز به در دسترس بودن تعداد نشت‌های موجود نیست و روش ارائه شده پس از پهنه‌بندی شبکه (و در نتیجه گروه‌بندی گره‌ها) توسط روش خوشه‌بندی K-means با الگوریتم ژنتیک (GA)، پرنش‌ترین محدوده موجود در شبکه را گزارش می‌کند.

روش پیشنهادی در شبکه‌های آبرسانی پولاکیس و بالرما تحت ۲۰۰۰ سناریوی مختلف وجود نشت مورد ارزیابی قرار گرفت. در خصوص به‌کارگیری رویکرد اول نشت‌یابی در شبکه پولاکیس، نتایج نشان داد که درصد موفقیت تعیین محل دقیق نشت در سناریوهای دارای یک، دو، سه، چهار و پنج نشت هم‌زمان به ترتیب ۹۲، ۸۱، ۶۱، ۴۶ و ۲۱ درصد بوده است. لذا مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد نشت‌های هم‌زمان ممکن در شبکه، درصد موفقیت به‌کارگیری رویکرد اول کاهش یافته است. علت آن، افزایش فضای جستجوی الگوریتم با افزایش تعداد نشت‌های هم‌زمان ممکن است. درصد موفقیت کلی آن نیز ۶۰/۲ درصد بوده

است. نتایج اعمال رویکرد دوم، نشان داد که در حالت تقسیم شبکه پولاکیس به ۶ پهنه، الگوریتم پیشنهادی توانست در ۹۱٪ کل سناریوها، پرنش‌ترین ناحیه را به‌درستی تشخیص دهد. با تحلیل دقیق‌تر، مشخص شد که درصد بسیار زیادی از عدم موفقیت‌ها ناشی از پایین بودن پارامتر نوسان مکانی نشت (LSF) در شبکه بود. نتایج نشان داد در صورتی که این پارامتر در بازه ۸۰-۱۰۰ باشد، الگوریتم پیشنهادی می‌تواند با درصد موفقیت ۹۹٪، پرنش‌ترین ناحیه را به‌درستی مکان‌یابی نماید. در خصوص شبکه بالرما، نتایج به‌کارگیری رویکرد اول حاکی از آن بود که درصد موفقیت الگوریتم در سناریوهای دارای یک نشت، ۹۵٪ بوده و با افزایش تعداد نشت‌های هم‌زمان به پنج عدد، درصد موفقیت آن به ۳۶٪ کاهش پیدا کرد؛ به‌صورت کلی نیز در ۷۰٪ کل سناریوها موفق عمل کرده است. نتایج پیاده‌سازی رویکرد دوم در شبکه بالرما و در حالتی که کل شبکه توسط الگوریتم خوشه‌بندی ارائه شده به ۱۶ پهنه تقسیم‌بندی شده باشد، نشان داد که الگوریتم پیشنهادی دارای موفقیتی برابر با ۹۰٪ در مکان‌یابی پرنش‌ترین ناحیه بوده است. همچنین قابلیت دستیابی به موفقیت ۹۹ درصدی را در صورت بالابودن (در بازه ۸۰-۱۰۰٪) پارامتر LSF در سناریوهای نشت مورد مطالعه دارد. لذا رویکرد دوم پیشنهادی در این مقاله بر رویکرد اول ارائه شده ارجحیت دارد. نتیجه دیگر آن بود که زیاد بودن مقدار متوسط شیب خط انرژی در شبکه بالرما (با مقدار ۰/۰۵۰ متر در متر) نسبت به شبکه پولاکیس (با مقدار ۰/۰۱۷ متر در متر)، سبب افزایش حدود ۱۰ درصدی موفقیت الگوریتم نشت‌یابی شده است. روش پیشنهادی ارائه شده در این مقاله، می‌تواند مورد استفاده بهره‌برداران شرکت‌های آب و فاضلاب قرار گیرد.

۵- تشکر و قدردانی

از منابع و پشتیبانی مرکز محاسبات رایانش موزی دانشگاه (سرمد) شهید بهشتی تشکر و قدردانی می‌شود.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- United States Environmental Protection Agency
- 2- Non-Revenue Water
- 3- Genetic Algorithm
- 4- Ant Colony Algorithm
- 5- Simulated Annealing
- 6- Graph Theory
- 7- Imperialist Competitive Algorithm
- 8- Multi-layer Perceptron
- 9- Epanet
- 10- Slime Mould Algorithm
- 11- Grasshopper Optimization Algorithm
- 12- Matlab
- 13- Lloyd's Algorithm
- 14- Roulette Wheel Selection
- 15- Selection Pressure
- 16- Leakage Spatial Fluctuation
- 17- Almeria

۷- مراجع

Aghsami, A., Sharififar, S., Moghaddam, N.M., Hazrati, E., and Jolai, F., (2024), "A bi-objective mixed-integer non-linear programming model with Grasshopper optimization algorithm for military-based humanitarian supply chains", *Decision Analytics Journal*, 10(2024), 100409, <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100409>.

Damos, M.A., Zhu, J., Li, W., Khalifa, E., Hassan, A., Elhabob, R., Hm, A., and Ei, E., (2024), "Enhancing the K-means algorithm through a Genetic Algorithm based on survey and social media tourism objectives for tourism path recommendations", *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(2), 40, <https://doi.org/10.3390/ijgi13020040>.

Eliades, D.G., Kyriakou, M., Vrachimis, S., Polycarpou, M.M., (2016), "EPANET-MATLAB toolkit: An open-source software for interfacing EPANET with MATLAB", *14th International Conference on Computing and Control for the Water Industry (CCWI)*, 8, The Netherlands.

Faghafur 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 Engineering and Urbanism*, 4(3), 322-327.

Fallahi, H., Jalili Ghazizadeh, M., Aminnejad, B., Yazdi, J., (2021), "Leakage detection in water distribution networks using hybrid feedforward artificial neural networks", *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 70(5), 637-653, <https://doi.org/10.2166/aqua.2021.140>.

Ferreira, B., Antunes, A., Carriço, N., Covas, D., (2022), "Multi-objective optimization of pressure sensor location for burst detection and network calibration", *Computers and Chemical Engineering*, 162, 107826, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107826>.

Ferreira, B., Antunes, A., Carriço, N., Covas, D., (2023), "NSGA-II parameterization for the optimal pressure sensor location in water distribution networks", *Urban Water Journal*, 20(6), 738-750, <https://doi.org/10.1080/1573062X.2023.2209553>.

Hamilton, S. and Charalambous, B., (2013), *Leak detection: Technology and Implementation*, 112, IWA Publishing.

Holland, J.H., (1992), *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An introductory analysis with applications to biology*, Control and Artificial Intelligence, MIT Press.

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>.

Ikotun, A.M., Ezugwu, A. E., Abualigah, L., Abuhaija, B., and Heming, J., (2023), "K-means clustering algorithms: A comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data",

عطاری، م.، و فغفور مغربی، م.، (۱۳۹۷)، "روش نوین نشت‌یابی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی"، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۹(۱)، ۱۴-۲۶، <https://doi.org/10.22093/wwj.2017.45360.2095>.

فغفور مغربی، م.، حسن‌زاده، ی.، و یزدانی، س.، (۱۳۹۲)، "کالیبراسیون مدل‌های شبکه توزیع آب شهری با استفاده از روش بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها"، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۴(۱)، ۱۰۱-۱۱۱، https://www.wwjournal.ir/article_2344.html?lang=fa.

معاشری، ر.، جلیلی قاضی‌زاده، م.، تشیعی، م.، منوچهری، پ.، و محمودی سوره، ا.، (۱۴۰۰)، "توسعه یک رویکرد مبتنی بر کالیبراسیون-بهینه‌سازی برای مکان‌یابی نشت‌های یک شبکه آبرسانی با در نظرگیری عدم قطعیت ضرایب زبری لوله‌ها"، *اولین همایش ملی مدیریت کیفیت آب و سومین همایش ملی مدیریت مصرف آب*، دانشگاه تهران، تهران.

نصیری دهج، م.، جلیلی قاضی‌زاده، م.، جباری، ابراهیم.، و معاشری، ر.، (۱۴۰۴)، "یافتن محل و مقدار نشت در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم SMA"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، (آماده انتشار)، <https://doi.org/10.22112/jwwse.2023.390328.1358>.

- localization model using a maximum coverage search area algorithm", In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1136(1), 012042, IOP Publishing.
- Sousa, J., Ribeiro, L., Muranho, J., and Sá Marques, A., (2015), "Locating leaks in water distribution networks with Simulated Annealing and Graph Theory", *Procedia Engineering*, 119, 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.854>.
- Tabesh, M., Jamasb, M., and Moeini, R., (2011), "Calibration of water distribution hydraulic models: A comparison between pressure dependent and demand driven analyses", *Urban Water Journal*, 8(2), 93-102, <https://doi.org/10.1080/1573062X.2010.548525>.
- Thamaraimanalan, T., and Ramalingam, S., (2024), "Hybrid Artificial Neural Network-based Grasshopper optimization algorithm for anomaly detection in wireless body area networks", *IETE Journal of Research*, 70(4), 3738-3752, <https://doi.org/10.1080/03772063.2024.2305845>.
- UN-Water., (2023), "Partnerships and cooperation for water", UNESCO, UN World Water Development Report.
- US-EPA., (2020), "Fix a leak week", <https://www.epa.gov/watersense/fix-leak-week>.
- Wang, Z., Hou, S., and Guo, W., (2024), "Inventory management of battery swapping and charging stations considering uncertainty", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 155, 109528, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109528>.
- Wu, J., Ma, D., and Wang, W., (2022), "Leakage identification in water distribution networks based on XGBoost algorithm", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(3), 04021107, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.109810>.
- Wu, Y., Ma, X., Guo, G., Huang, Y., Liu, M., Liu, S., Zhang, J., and Fan, J., (2023), "Hybrid method for enhancing acoustic leak detection in water distribution systems: Integration of handcrafted features and deep learning approaches", *Process Safety and Environmental Protection*, 177, 1366-1376, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.08.011>.
- Zaman, D., Tiwari, M. K., Gupta, A. K., and Sen, D., (2020), "A review of leakage detection strategies for pressurised pipeline in steady-state", *Engineering Failure Analysis*, 109, 104264, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104264>.
- Information Sciences, 622, 178-210, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2022.11.139>.
- Kanakoudis, V., and Tsitsifli, S., (2012), "Urban water services public infrastructure projects: Turning the high level of the NRW into an attractive financing opportunity using the PBSC tool", *Desalination and Water Treatment*, 39(1-3), 323-335, <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.669182>.
- Khorshidi, M.S., Nikoo, M.R., Taravatroy, N., Sadegh, M., Al-Wardy, M., and Al-Rawas, G.A., (2020), "Pressure sensor placement in water distribution networks for leak detection using a hybrid information-entropy approach", *Information Sciences*, 516, 56-71, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.12.043>.
- Li, J., Wu, Y., Zheng, W., and Lu, Ch., (2021), "A model-based Bayesian framework for pipeline leakage enumeration and location estimation", *Water Resources Management*, 35(13), 4381-4397, <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02955-8>.
- 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>.
- Pérez-Pérez, E.J., López-Estrada, F.R., Valencia-Palomo, G., Torres, L., Puig, V., and Mina-Antonio, J.D., (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](https://doi.org/10.1016/S0266-8920(03)00045-6).
- Rajabi, M., and Tabesh, M., (2024), "Pressure sensor placement for leakage detection and calibration of water distribution networks based on multiview clustering and global sensitivity analysis", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 150(5), 04024010, <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-6262>.
- Sadr-Al-Sadati, S.A., and Jalili Ghazizadeh, M., (2019), "The experimental and numerical study of water leakage from high-density", *Polymer Testing*, 74, 274-280, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.01.014>.
- Saremi, S., Mirjalili, S., and Lewis, A., (2017), "Grasshopper optimisation algorithm :Theory and application", *Advances in Engineering Software*, 105, 30-47, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.01.004>.
- Slowey, K., (2019), "Leak detection tech can save contractors the cost of water waste and damage", <https://www.constructiondive.com/news/leak-detection-tech-can-save-contractors-the-cost-of-water-waste-and-damage/558967/>.
- Snider, B., Lewis, G., Chen, A., Vamvakeridou, L., and Savić, D., (2023) "A flexible, leak crew focused



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