

The Performance of Differential Evolution Algorithm for Leak Detection in Water Distribution Networks Considering the Uncertainty of Nodal Demands

Shahrzad Madani Esfahani¹, Jafar Yazdi^{2*}

1- Master's student, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University.

2- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Water and Environment, Shahid Beheshti University.

*j_yazdi@sbu.ac.ir

Received: 15 May 2023
Accepted: 4 August 2023
Discussion: 21 June 2024



J. Hydraul.
Iranian Hydraulic Association
Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: One of the most important components of non-revenue water is leakage in the water supply network, and leak detection is one of the necessary measures to reduce non-revenue water and manage consumption. In this research, an optimization formulation has been developed for the leak detection in water networks, assuming the lack of information on the number of leaks and pressure measurement data. The search problem within this context has been effectively addressed using the differential evolution algorithm. The results showed that the success rate of the model is 100% in the case of certainty of input data and the existence of one node, and by considering the hourly changes of nodal demand and increasing the number of leaks up to ten and twenty leak nodes, 95% and 94.5% have been obtained, respectively. In scenarios with an unknown number of leaks, the model's success in finding the number of leaks is 94%. The model's success in the uncertainty of nodal requirements with the number of known leaks reaches 91% with the increase of leaks and 86% with the number of unknown leaks.

Methodology: In this study, Epanet hydraulic solver was used for network hydraulic simulation, and the link of this software with MATLAB programming software was used for leakage modeling and location. Different scenarios, as outlined in Tables 1 and 2, have been established to address the leak detection problem. The performance of the developed model has been evaluated in each of these scenarios. These scenarios are defined by combining different states of nodal demand (fixed and variable), the number of leaks and the uncertainty of the input data. To do the work (Figure 5), there are two separate simulation models. One model represents the actual leakage in which the number, amount and position of the leakage nodes are known. The second model is for performing the leakage detection task in which the leakage nodes are unknown and found by trial and error. The second model produces answers that represent the number and location of leaks. The solutions derived from the model are incorporated into the objective function, which is then recalculated based on the pressure at the monitoring node. This procedure is iteratively repeated, with new solutions superseding the previous ones. The process continues until a solution is obtained that minimizes the discrepancy with the pressure at the base node in the initial model. This method has been applied across various scenarios, where the decision

variables include the number, magnitude, and location of the leakages.

Results and Discussion: Tables 4 and 5 show the results of running the model in 12 scenarios defined in the certainty of nodal needs. In the first to eighth scenarios, with constant and variable consideration of nodal demand and considering a leak in the network, the algorithm's performance was 100%. As the monitoring node moved away from the leak node in the ninth scenario, the model's performance decreased by 20%. By applying many leaks in the 10th and 11th scenarios, the performance of the model becomes 95% and 94.5%. In the twelfth scenario, the number of unknown leaks is considered, and the number of leak nodes varies from 5 to 20 leaks in the defined sub-scenarios. According to Table 5, the overall performance percentage of the twelfth sub-scenario to find the leak location is 96.60%, and the number of leaks in each iteration was obtained correctly. Table 6 shows the results of running the model in scenarios 13 and 14 defined in the uncertainty of nodal needs.

In these two scenarios, as in the twelfth scenario, the number of leaks in the network was initially low, and gradually in the next sub-scenarios, the number of leaks increased to 20. In scenario 14, the number of leaks was obtained by the correct model, but the leak's location was different. However, in all scenarios 9 to 14, the location of the leak found by the model was close to the actual leak location in the original model. The overall performance percentage of the 13th scenario is 92.25% and of the 14th scenario is 91.47%.

Conclusion : In this research, the identification of the leak location with scenarios with a high number of leaks has been investigated. For this purpose, different scenarios with the number of known and unknown leaks were investigated and the uncertainty of nodal needs was investigated. By increasing the number of simultaneous leaks up to 10 and 20 cases, the model's performance decreased by 5% and 5.5%. Although the model's performance has decreased with the increase of leakage nodes and the consequent increase in the complexity of the problem, the same success rate can also help to increase the efficiency of water resources by reducing network leakage. The model's success rate in finding the number of leaks in scenarios with an unknown number of leaks is approximately 96%. By comparing known and unknown leak scenarios, it can be seen that there is no difference in the algorithm's performance in finding the number of leaks. However, the main challenge is finding the leak's location. In the 13th and 14th scenarios where the uncertainty of nodal needs was considered, the algorithm's performance is above 90%.

Future research can focus on optimizing the placement of monitoring gauges within the water distribution network to enhance leak detection efficiency. Also, the accuracy of the monitoring nodes can be assessed by combining the proposed model and algorithm with the Monte-Carlo method. This integration would not only verify the accuracy but also measure the uncertainty associated with the pressure measurement data using the Monte-Carlo method.

Keywords: Leak detection, Uncertainty, Unknown leakage, Differential evolution algorithm, Water distribution networks



© 2024 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.

This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

عملکرد الگوریتم تکامل تفاضلی برای نشت‌یابی در شبکه‌های توزیع آب با در نظر گرفتن عدم قطعیت نیازهای گرهی

شهرزاد مدنی اصفهانی^۱، جعفر یزدی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی.
۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی.

*j_yazdi@sbu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۳، نقد و بررسی: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: یکی از اجزاء مهم آب بدون درآمد، نشت موجود در شبکه آبرسانی بوده و از اقدام‌های ضروری به منظور کاهش آب بدون درآمد و مدیریت مصرف، نشت‌یابی است. در این پژوهش، یک فرمول‌بندی بهینه‌سازی به منظور نشت‌یابی در شبکه‌های آب با فرض نبود آگاهی از شمار نشت‌ها و داده‌های ناشی از اندازه‌گیری فشار توسعه داده شده است و مسئله جستجو با الگوریتم تکامل تفاضلی حل شده است. عملکرد مدل توسعه داده شده با تعریف پیش‌فرض‌های مختلف از نظر موقعیت، میزان و شمار نشت بررسی شده است. در آغاز پیش‌فرض‌های مکان‌یابی از نظر شمار و میزان نشت شامل یک، ده و بیست نشت همزمان بررسی شد و پس از آن مدل توسعه داده شده برای پیش‌فرض‌های مکان‌یابی با شمار نشت نامعلوم و همچنین عدم قطعیت نیازهای گرهی اجرا شدند. نتایج نشان داد موفقیت مدل در حالت قطعیت داده‌های ورودی و وجود یک گره، ۱۰۰٪ بوده و با در نظرگیری تغییرپذیری ساعتی نیاز گرهی و با افزایش شمار نشت‌ها تا ده و بیست گره نشت، میزان موفقیت مدل در یافتن نقطه‌ی دقیق نشت به ترتیب ۹۵٪ و ۹۴٪ به دست آمده است. در پیش‌فرض‌هایی که شمار نشت‌ها مجهول در نظر گرفته شده بود، موفقیت مدل برای پیدا کردن شمار نشت ۹۴٪ به دست می‌آید. موفقیت مدل در حالت عدم قطعیت نیازهای گرهی با شمار نشت معلوم، با افزایش نشت تا ۹۱٪ و با شمار نشت مجهول تا ۸۶٪ می‌رسد.

کلیدواژگان: نشت‌یابی، عدم قطعیت، نشت مجهول، الگوریتم تکامل تفاضلی، شبکه‌های توزیع آب.

۱- مقدمه

تأمین آب کافی و با میزان و کیفیت مناسب از جمله مسئله‌های مهم در تاریخ بشر بوده است. همچنین آب یک منبع مبنای در توسعه اقتصادی- اجتماعی جامعه بشری است که تصفیه آن دشوار، انتقال آن پرهزینه و جایگزین کردن آن ناممکن است. به ویژه برای کشورهایی مانند ایران که به لحاظ اقلیمی و موقعیت جغرافیایی در منطقه خشک و نیمه خشک کره‌ی زمین قرار گرفته‌اند، در دهه‌های آینده آب عامل بروز بحران خواهد بود. بحران آب در صورت نبود زمینه‌های برنامه‌ریزی منسجم و مدون بدون شک آسیب و زیان‌های جبران ناپذیری را بر پیکره‌ی اقتصاد کشورهای کم‌آب از جمله ایران وارد خواهد ساخت.

عمده اقدام‌های صورت گرفته در پاسخگویی به نیازهای آبی از طریق مدیریت تولید و تأمین آب بوده و کمتر به وجه دیگر این معادله که همانا مدیریت توزیع و مصرف بهینه‌ی آب می‌باشد، توجه شده است. در صورتی که برنامه‌های مدیریت جامع توزیع - مصرف نقش مبنای خود را به عنوان یک راه حل موازی و گاه جایگزین برای پاسخگویی به نیازهای آبی نشان داده است (Teymouri, 2014).

قسمت عمده آب به شمار نیامده مربوط به هدررفت سامانه و بقیه‌ی آن مرتبط با انشعاب‌های غیر مجاز است. عمده‌ترین هدررفت آب، ناشی از نشت در شبکه‌های توزیع آب است. نشت آب در سامانه انتقال، تاسیسات آبیگری،

ورودی، موقعیت و میزان نشت‌های احتمالی موجود بررسی شد. این روش توانست محل نشت را با دقت بالایی بدست آورد.

Wu et al. (2010) یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر مدلسازی برای تشخیص نشت سامانه‌های توزیع آب ارائه دادند که در آن نشت در گره‌های مدل قرار گرفته و به عنوان یک تقاضای وابسته به فشار شبیه‌سازی شده است. تشخیص نشت با بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک به‌گونه‌ای انجام می‌شود که تفاوت بین میزان‌های فشار و دبی جریان مدل پیش‌بینی شده و نشت مشاهده شده در واقعیت به کمترین میزان برسد. روش ارائه شده بر مبنای واسنجی مدل پیشنهادی است که مهندسان را قادر می‌سازد با وجود محدودیت‌های موجود در داده‌های هیدرولیکی مسئله و همچنین شرایط متفاوت هیدرولیکی در ساعت‌های مختلف شبانه روز، گره‌های دارای نشت را با دقت بالایی شناسایی کنند.

در سال‌های اخیر به علت پرهزینه بودن، نیاز به نیروی متخصص و زمان‌بر بودن روش‌های رایج نشت‌یابی، سعی شده است تا با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی به یافتن نشت‌های موجود در شبکه پرداخته شود. از جمله روش‌های شبیه‌سازی، انجام فرآیند واسنجی و بهینه‌یابی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری است.

Nasiri-Dahej et al. (2022) پس از مدلسازی هیدرولیکی و انجام فرآیند پایش فشار در شبکه، با استفاده از الگوریتم اسب وحشی (WHO) محل نشت‌های گزارش نشده را مشخص کردند. روش پیشنهادی بر روی یک شبکه فرضی طی هشت پایش فرضی مختلف وجود یک، دو، سه و چهار نشت پیاده سازی شد. نتایج نشان دادند که این روش قادر است در حالت وجود یک نشت در شبکه، محل نشت را به طور دقیق تشخیص دهد و در حالت وجود بیش از یک نشت در شبکه، قادر است محل بزرگترین نشت موجود را با دقت قابل قبولی برآورد کند.

Fallahi et al. (2021) با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) به پیدا کردن نشت در دو شبکه پرداختند. در یک شبکه، شبکه‌های عصبی مصنوعی با میانگین تقاضای آب روزانه در نظر گرفته شدند و در

مخزن‌های ذخیره، تصفیه‌خانه و شبکه توزیع آب ممکن است، رخ دهد. البته شبکه توزیع آب به طور عموم بیشترین سهم را در تلفات آب به خود اختصاص می‌دهد. از این رو نشت‌یابی در شبکه‌های توزیع آب می‌تواند به کاهش هدررفت آب و در پی آن کاهش آب به شمار نیامده کمک شایانی کند و موجب حفظ و مدیریت منابع آبی در کشورهای کم آب مانند ایران شود. نشت‌یابی در شبکه‌های توزیع آب به دو روش کلی سخت‌افزاری (مستقیم) و نرم‌افزاری (نامستقیم) صورت می‌گیرد (Zaman et al., 2020). تشخیص و برآورد نشت، مسئله‌ای بسیار حیاتی است و افزون بر تجهیزات و نیروی انسانی، نیاز به تحلیل‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری دارد. دستگاه‌های معمول مورد استفاده در روش سخت‌افزاری شامل ردیاب‌های انتشار صوتی، حسگرهای فیبر نوری، فناوری‌های التراسونیک (فراصوتی) و داماسنج فروقرمز و غیره است. روش‌های فنی مبتنی بر نرم‌افزار از نرم‌افزارهای رایانه‌ای برای تشخیص نشت در یک خط لوله استفاده می‌کنند (Bai & Bai, 2014). در مقایسه روش‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری با یکدیگر، روش‌های فنی مبتنی بر روش نرم‌افزاری کم هزینه و کم‌زحمت هستند و همچنین از نظر زمانی بسیار کارآمد می‌باشند. از سوی دیگر نتیجه‌گیری ارائه شده توسط روش‌های مبتنی بر نرم‌افزار همانند بیشتر روش‌های سخت‌افزاری در درجه‌ی اول به صلاحیت فنی یا مهارت عامل کار وابسته نیست (Zaman et al., 2020).

Miserjani et al. (2021) از طریق مدل‌سازی هیدرولیکی جریان شبکه‌ی توزیع آب شهر محلی آباد استان کرمان و حل معکوس معادله‌های جریان و با داشتن میزان‌های اندازه‌گیری شده‌ی فشار در بعضی از نقطه‌های برداشت در شبکه، محل و میزان نشت موجود را شناسایی کردند. در این پژوهش، در آغاز مدل هیدرولیکی شبکه در نرم‌افزار تحلیل هیدرولیکی تهیه و واسنجی شده و آن‌گاه میزان نشت‌های موجود برداشت شد. پس از آن با تحلیل شبکه برای حالت‌ها و میزان‌های مختلف وجود نشت‌های فرضی، میزان‌های فشار در گره‌های مختلف شبکه محاسبه شد. در مرحله‌ی بعدی با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی، با ارائه‌ی فشارهای اندازه‌گیری شده به عنوان داده‌های

بهینه‌سازی شبکه مبتنی بر الگوریتم مورچگان، توانستند میزان و موقعیت نشت‌های بزرگ را در شبکه‌ی توزیع آب شهر گلپهار مشهد به دست آورند. آن‌گاه با تلفیق نشت‌یابی مبتنی بر واسنجی و کمینه جریان شبکه، مولفه‌های آب بدون درآمد به تفکیک ناحیه‌ی شهر گلپهار محاسبه شد. نتایج نشان داد که بیشترین سهم تلفات مربوط به تلفات فیزیکی ناشی از شکستگی لوله‌هاست. هدررفت فیزیکی ناشی از شکستگی لوله‌ها، نشت زمینه و هدررفت ظاهری به ترتیب ۵۷، ۳۲ و ۱۱ درصد آب به شمار نیامده است.

Zandi et al. (2021) با استفاده از یک روش شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم جستجوی هارمونی که در آن حل‌گر هیدرولیکی EPANET در محیط متلب به الگوریتم جستجوی هارمونی لینک شده است، ۱۴ پیش‌فرض برای مکان‌یابی و یافتن اندازه‌ی نشت در دو شبکه‌ی آبرسانی بررسی شد که شمار نشت‌ها از یک تا سه عدد متغیر بود. نتایج نشان می‌دهد که مدل توسعه‌یافته در یافتن این فراسنجه‌ها موفق عمل نموده است. فرض مبنای در این تحقیق معلوم بودن شمار نشت‌ها بوده و با این فرض، الگوریتم محل نشت را جستجو می‌کند.

Izadpanah & Maghrebi (2018) ارزیابی عدم قطعیت اندازه‌گیری فشارسنج‌ها در تعیین موقعیت نشت در شبکه‌های آبرسانی در روش نشت‌یابی بر مبنای اختلاف فشارهای گرهی را ارائه می‌دهند. هر کدام از فشارسنج‌ها در شبکه دارای میزان خطایی است که حتی درصد کمی از آن می‌تواند منجر به محاسبه‌های نادرست برای تشخیص موقعیت نشت شود؛ بنابراین با بررسی تاثیر میزان خطای دستگاه‌های فشارسنجی در تشخیص موقعیت نشت در روش نشت‌یابی بر مبنای کمترین فشارسنجی و تحلیل درصد راستی‌آزمایی این روش با در نظر گرفتن خطای دستگاه‌ها با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو، عدم قطعیت بررسی شد. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد، با استفاده از دستگاه‌های فشارسنجی با درصد خطای بیشتر از ۰/۳۵٪ نمی‌توان از این روش به عنوان روش قطعی برای نشت‌یابی استفاده کرد؛ اما با توجه به اینکه در بیشتر موارد موفق به

شبکه‌ی دیگر، شبکه‌های عصبی مصنوعی با نیازها و نشت‌های گرهی متغیر ساعتی طی ۲۴ ساعت آموزش داده می‌شوند. برای تعیین فراسنجه‌های آموزش از زبان برنامه‌نویسی متلب^۱ استفاده شد و شبکه توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی هیدرولیک اپانت^۲ مدل‌سازی شد. در هر دو مورد، در آغاز شبکه‌های عصبی مصنوعی با استفاده از نرخ جریان کل لوله‌ها آموزش داده شدند. آن‌گاه، تجزیه و تحلیل حساسیت توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی ترکیبی انجام شد.

نتایج شبکه‌های عصبی مصنوعی ترکیبی پیشنهادی نشان می‌دهد که اگر دست‌کم ۱۰ درصد دبی کل لوله‌ها مشخص باشد (با استفاده از دبی‌سنج)، مکان‌های نشتی را در هر دو مورد می‌توان تعیین کرد. علی‌رغم پیچیدگی شبکه‌ی دوم، به دلیل تغییرپذیری‌های تقاضا و نشت متغیر در دوره ۲۴ ساعته، روش پیشنهادی می‌تواند محل نشت را با دقت بالایی تشخیص دهد.

Sage (2004) با استفاده از الگوریتم ژنتیک موفقیت‌هایی را در تشخیص نقطه‌های دارای نشت در یک شبکه توزیع به دست آورد. روش بر مبنای مدل‌سازی شبکه توزیع فرض نشت به عنوان یک مصرف‌گره‌ای استوار است. بررسی‌های اولیه روش توانست شکستگی‌های بزرگ لوله و مشترکان با مصرف‌های زیاد و ثبت نشده را شناسایی کند. Mirats-tur et al. (2014) استفاده از دو روش مختلف برای شناسایی و تعیین محل نشت را با استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر مدل‌سازی شبکه ارائه می‌دهند. هر دو روش بر مبنای تجزیه و تحلیل حساسیت اندازه‌گیری فشار به تغییر تقاضا در هر گره در سامانه توزیع است. این کار بر روی نتایج به دست آمده با استفاده از هر دو روش در دو پیش‌فرض مختلف نشت متمرکز شده است. بخش اول یک پیش‌فرض چند نشتی واقعی بدون واسنجی و بخش دوم یک نشت مصنوعی واسنجی شده است. نتایج برای هر دو روش همانند است و شناسایی محل نشت در فاصله ۱۵۰ متری از نشت واقعی یافت می‌شود.

Sabet et al. (2018) با استفاده از یک روش واسنجی-

1. MATLAB
2. EPANET

هیدرولیکی بزرگ‌تر از خطای داده‌های حسگر می‌شود، قابل تشخیص بوده و با این روش مکان‌یابی می‌شود. نتیجه نمونه واقعی نشان می‌دهد که روش ارائه شده می‌تواند منطقه جستجو را برای پیدا کردن نشتی در حدود ۱۰٪ از شبکه توزیع آب، کاهش دهد. این روش همچنین می‌تواند به تشخیص به هنگام و مکان‌یابی نقاط حساس نشت کمک کند و در نتیجه تأثیرهای اقتصادی و زیست محیطی نشت را کاهش دهد.

به صورت طبیعی در یک شبکه شمار نشت‌های بزرگ شمار محدودی بوده و شمار بسیار زیادی به صورت همزمان رخ نمی‌دهند. بر این مبنا Wu et al. (2010) فرض کردند که شمار نشت‌های همزمان که در شبکه واقع می‌شود، به شمار مشخصی محدود است. بر این مبنا در ابتدا فرض می‌شود که یک نشت در شبکه وجود دارد. بنابراین شمار گزینه‌ها برای موقعیت نشت، به شمار گره‌های شبکه محدود است. این فرض برای ۲، ۳ و تا N حالت مختلف، شمار کل فضای جستجو را به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و در یافتن پاسخ بهینه و درست مؤثر است.

Moasheri et al. (2020) یک روش واسنجی-بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم PSOGA برای یافتن نشت‌های شبکه‌های آبرسانی پیشنهاد کرده است. این روش می‌تواند عدم قطعیت در فراسنجه ضریب زبری لوله‌های مدل هیدرولیکی شبکه را در نظر بگیرد. روش پیشنهادی در ۱۰۰۰ پیش‌فرضی مختلف، بر روی یک شبکه تمام حلقوی پیاده‌سازی شد. ۵۰۰ پیش‌فرض شامل شمار نشت‌های همزمان مختلف بدون وجود عدم قطعیت در فراسنجه‌های مدل هیدرولیکی (حالت اول) و ۵۰۰ پیش‌فرضی دیگر (حالت دوم) با در نظرگیری عدم قطعیت در میزان ضریب زبری بود. نتایج حالت اول نشان داد که الگوریتم در بیش از ۷۵ و ۵۸ درصد از پیش‌فرض‌ها، به ترتیب قادر به شناسایی پر نشت‌ترین ناحیه و تعیین اولویت درست ناحیه‌های نشت‌دار می‌باشد. این میزان‌ها در حالت دوم به ترتیب حدود ۵۸ و ۳۹ درصد بود. لذا در نظرگیری عدم قطعیت در ضرایب زبری، سبب کاهش اطمینان‌پذیری الگوریتم به میزان به ترتیب ۲۳ و ۳۳

شناسایی گره‌های مجاور گره‌های نشت‌دار می‌شود، می‌توان از این روش به عنوان یک روش تکمیلی در کنار دیگر روش‌های نشت‌یابی استفاده کرد.

(Lindstorm et al. (2022) به بررسی پیدا کردن محل نشت در شبکه‌های توزیع آب به مدلسازی شبکه پرداختند. در این روش، فرض شد که داده‌های حسگرهای اندازه‌گیری فشار درست نیستند و عدم قطعیت دارند. روش کار بدین صورت بود که در آغاز برای یک لوله با فرض یک نشت، با اندازه‌گیری داده‌های فشار و جریان و با فرض درست بودن عملکرد حسگرها، فرمولی برای مکان نشت، توان نشت و ثابت نشت ارائه شد و از سوی دیگر با فرض درست نبودن عملکرد حسگرها، فرمولی دیگر برای پیدا کردن محل نشت ارائه شد. آن‌گاه، همین کار برای شبکه‌ای متشکل از چند لوله و با فرض اینکه شبکه دارای ساختاری درختی است، بسط داده شد. البته در این پژوهش وجود فقط یک نشت بررسی شد.

(Moasheri & Jalili-Ghazizadeh (2020) روش جدیدی برای تعیین مناطق نشت در شبکه‌های توزیع آب ارائه دادند. روش پیشنهادی در یک شبکه آب، مدل با سه پیش‌فرض (به ترتیب یک، دو و شش نشت همزمان) و یک شبکه‌ی آب واقعی، با دو پیش‌فرض مختلف اجرا شدند. در نخستین گام، شبکه با توجه به موقعیت جغرافیایی لوله‌ها و ابزار اندازه‌گیری، به چند منطقه جدا از هم تقسیم می‌شود. در مرحله دوم، در حالی که نشت به عنوان یک تقاضای اضافی از گره‌ها در نظر گرفته شده، واسنجی همزمان نیازها و زبری لوله‌ها در مدل هیدرولیک شبکه توسط الگوریتم رقابت استعماری انجام می‌شود. در مرحله سوم، بر مبنای نتایج دو مرحله پیشین، احتمال نشت هر منطقه برآورد می‌شود. نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن اولویت میزان‌ها، می‌تواند به درستی مکان نشت همزمان را پیش‌بینی کند.

(Sophpeleous et al. (2019) یک روش مبتنی بر مدل برای تشخیص و مکان‌یابی نشت در شبکه‌های توزیع آب ارائه دادند. این روش از دو مرحله استفاده می‌کند: ۱. کاهش فضای جستجو و ۲. مرحله شناسایی و محلی کردن نشت. نتایج نشان می‌دهند نشتی که باعث تأثیر

به مطالعات پیشین است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- شبکه‌ی مورد بررسی

شبکه‌ی Wolf-Cordera Ranch که در این تحقیق مورد بررسی واقع شده است و در شکل ۱ مشاهده می‌شود، یک شبکه واقعی توزیع آب است که دارای ۱۷۷۰ گره، ۱۹۷۷ لوله، بدون امکانات پمپاژ (شبکه ثقلی) و ۳ مخزن در ارتفاع ۱۶۵ متری است. مدل هیدرولیکی این شبکه در این تحقیق بررسی قرار شد. در این مدل، نیازهای گرهی ثابت با میزان ۲۱ لیتر بر دقیقه فرض شده است ولی در بعضی از پیش‌فرض‌ها نیاز گرهی متغیر در نظر گرفته شده است.

دلیل انتخاب این شبکه در این بخش، شمار زیاد گره‌ها و لوله‌های این شبکه می‌باشد. در این مطالعه، حل‌گر هیدرولیکی ایپانت برای شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه استفاده شده و برای مدلسازی و مکان‌یابی نشت از لینک این نرم‌افزار با نرم‌افزار برنامه‌نویسی متلب استفاده شده است.

درصد شد. افزون بر آن نتایج نشان داد که هر چقدر در شبکه، نوسان توزیع مکانی نشت (یعنی اختلاف بین بیشترین و کمترین درصد نشت در نواحی مختلف) افزایش یابد، توانایی الگوریتم نیز افزایش خواهد یافت. به صورتی که در بیشتر از ۶۰ درصد از کل پیش‌فرض‌هایی که الگوریتم موفق نبود، نوسان مکانی نشت از دیگر پیش‌فرض‌ها کمتر بود. به صورت کلی، در کمتر از پنج درصد از پیش‌فرض‌هایی که این نوسان در بازه ۷۵-۱۰۰ درصد قرار داشت، الگوریتم پیشنهادی نتوانسته بود که پرنشت‌ترین ناحیه را به درستی شناسایی کند.

با توجه به نتایج پژوهش‌های مرتبط انجام شده، در بیشتر تحقیقات شمار نشت به صورت فرضی در نظر گرفته شده است ولی در واقعیت شمار نشت در شبکه مجهول است و باید مدل، ارائه‌دهنده‌ی راهکاری برای حل این مسئله باشد. فرض نامعلوم بودن شمار نشت‌ها منجر به بزرگ شدن نمایی فضای جستجو شده و بر پیچیدگی مسئله نشت‌یابی به طور قابل ملاحظه‌ای می‌افزاید. در این پژوهش، شمار نشت‌های شبکه، مجهول در نظر گرفته شده است و همزمان عدم قطعیت نیازهای گرهی نیز در یافتن محل نشت با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو لحاظ شده است. این موارد، نوآوری‌های این تحقیق نسبت



Fig. 1 Wolf-Cordera Ranch water distribution network (Shekofteh, 2018)
شکل ۱ شبکه‌ی توزیع آب مورد بررسی (Shekofteh, 2018)

۲-۲-۲- پیش فرض‌های نشت مورد بررسی

برای حل مسئله نشت یابی در این مطالعه، پیش فرض‌های مختلفی برای مکان یابی نشت تعریف شده و عملکرد مدل توسعه یافته در هر کدام بررسی شده است. جدول‌های ۱ و

۲ پیش فرض‌های تعریف شده را نشان می‌دهند. این پیش فرض‌ها با ترکیب حالت‌های مختلف نیاز گره‌ای (ثابت و متغیر)، شمار نشت و عدم قطعیت داده‌های ورودی تعریف شده است.

۱-۲-۲- پیش فرض‌های تعریف شده در حالت قطعیت داده‌های ورودی

جدول ۱ پیش فرض‌های نشت در حالت قطعیت

Table 1 Leakage scenarios in certainty mode

Decision Variable	Leak No.	Base Demand	Scenario No.
The location of the leak node	1	Stable	1
The location of the leak node and the amount of leakage	1	Stable	2
Leakage node location considering clustering	1	Stable	3
The location of the leakage node and the amount of leakage considering the clustering	1	Stable	4
The location of the leak node	1	Unstable	5
Leakage node location considering clustering	1	Unstable	6
The location of the leakage node and the amount of leakage considering the clustering	1	Unstable	7
The location of the leakage node and the amount of leakage	1	Unstable	8
The location of the leakage node and the amount of leakage considering spacing	1	Unstable	9
The location of the leak node	10	Unstable	10
The location of the leak node	20	Unstable	11
The number and location of the leak node	unknown	Unstable	12

۲-۲-۲- پیش فرض‌های تعریف شده در حالت عدم قطعیت داده‌های ورودی

جدول ۲ پیش فرض‌های نشت در حالت عدم قطعیت

Table 2 Leakage scenarios in uncertainty mode

Decision Variable	Leak No.	Base Demand	Scenario No.
The location of the leak node	Certain	Unstable	13
The number and location of the leak node	Uncertain	Unstable	14

می‌شود. ترکیب بندی مسئله شامل تابع هدف و قیدها به شرح زیر است که در دو حالت قطعیت و عدم قطعیت نیازهای گره‌ای تقسیم بندی شده است. فراسنجه‌های الگوریتم جستجو نیز بر مبنای میزان‌های پیشنهاد شده در تحقیقات پیشین (Zandi, 2021) در نظر گرفته شده است.

مدل بهینه‌سازی به دو بخش ترکیب بندی مسئله نشت یابی و الگوریتم حل آن تقسیم می‌شود. ترکیب بندی مسئله نشت خود از دو قسمت تابع هدف و قیدهای مسئله تشکیل می‌شود. در بخش الگوریتم حل، به تشریح الگوریتم تکامل تفاضلی که در این پژوهش برای نشت یابی در شبکه‌های توزیع آب به کار گرفته شده، پرداخته خواهد شد.

۱-۳-۲- ترکیب بندی مسئله بهینه‌سازی در حالت

قطعیت نیازهای گره‌ای

- تابع هدف و قیود مسئله

۳-۲- ترکیب بندی مسئله نشت یابی

نشت یابی به صورت یک مسئله بهینه‌سازی ترکیب بندی

$$f(x) = \frac{e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (3)$$

در رابطه‌ی بالا، μ : میزان میانگین داده‌ها؛ σ میزان پراکندگی یا انحراف معیار و x نیاز گرهی ساعتی به عنوان متغیر غیر قطعی و ورودی مونت کارلو است (Ghiyas, 2013). در این پژوهش با فرض پیروی داده‌ها از توزیع نرمال می‌توان اعداد تصادفی را برابر معادله (۴) محاسبه کرد (Kang et al., 2009, Cugueró-Escofet et al., 2015).

$$X = \mu_x + \sigma_x Z \quad (4)$$

که در آن μ_x میانگین نیاز گرهی ساعتی است که از جنبه مدلسازی برابر حاصل ضرب ضریب الگوی مصرف پایه (جدول ۳) در هر ساعت در نیاز روزانه است، σ_x انحراف معیار نیاز گرهی ساعتی است که در اینجا با فرض ضریب تغییرات (حاصل ضرب ضریب تغییرپذیری در میانگین) برابر $0/3$ فرض می‌شود و Z یک عدد تصادفی با توزیع نرمال استاندارد (یعنی با میانگین صفر و انحراف معیار یک) است.

آن‌گاه با استفاده از تحلیل حساسیت، ۲۰۰ نمونه (یعنی ۲۰۰ الگوی مصرف برای هر ساعت) انتخاب شد؛ چرا که به ازای نمونه برابر و بیشتر از این شمار، اختلاف میانگین نمونه‌های هر ساعت با میزان میانگین آن، کمتر از ۰.۵٪ به دست آمد (Zandi, 2021).

ترکیب‌بندی تابع هدف مسئله در حالت عدم قطعیت به صورت معادله‌ی ۵ توسعه می‌یابد:

$$\text{Objective function: Min } z = \sum_{j=1}^{24} (|x_{pi} - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{sij}|)_t \quad (5)$$

که در آن، x_{pi} : میزان فشار گره i که توسط فشارسنج (فرضی) گره پایش (در حالت وجود نشت در محل واقعی) در ساعت t اندازه‌گیری شده است و $\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{sij}$: میزان میانگین فشار گره i در حالت عدم قطعیت که توسط مدل و با در نظر گرفتن نشت در یک مکان تصادفی محاسبه شده است، j شمارنده شمار نمونه‌های تصادفی انتخاب شده و m شمار نمونه‌های تصادفی است.

ترکیب‌بندی تابع هدف مسئله بهینه‌سازی در پیدا کردن محل نشت به صورت زیر تعریف شده است:

Objective function: Min z

$$= \sum_{t=1}^{24} |P_{obs,t} - P_{m,t}| \quad (1)$$

در رابطه بالا $P_{m,t}$: میزان فشار به دست آمده در مدل و در ساعت t و $P_{obs,t}$: میزان فشار مشاهده شده در حسگر و در زمان t است. قیده‌های مسئله‌ی بهینه‌سازی شامل معادله‌های پیوستگی در گره‌ها و بقای انرژی در حلقه‌ها است که این قیده‌ها به طور ضمنی در حل‌گر هیدرولیکی ایپانت ارضاء می‌شوند. (Zandi, 2021)

- رابطه‌ی فشار - نشت

میزان نشت تابع فشار است. رابطه‌ی فشار - نشت را در حالت کلی می‌توان به صورت عبارت توانی نشان داد که در این بررسی، این توان $0/5$ فرض شده و جریان به صورت خروج از روزنه در نظر گرفته شده است. با این فرضیه، می‌توان رابطه فشار - نشت را به صورت رابطه‌ی ۲ نشان داد.

$$Q = CA\sqrt{2gh} \quad (2)$$

در رابطه بالا، Q : دبی نشت (بر حسب مترمکعب بر ثانیه)؛ C : ضریب ثابت فشار؛ A : محیط (بر حسب متر)؛ g : شتاب ثقلی (بر حسب مترمربع بر ثانیه) و h : فشار گرهی نشت (بر حسب متر) است.

۲-۳-۲- ترکیب‌بندی مسئله بهینه‌سازی در

حالت عدم قطعیت نیازهای گرهی

در این پژوهش از رویکرد مونت کارلو برای در نظرگیری تحلیل عدم قطعیت میزان‌های نیازهای گرهی استفاده شده است. روش مونت کارلو یک الگوریتم محاسبه‌شدنی است که از نمونه‌گیری تصادفی برای محاسبه نتایج مدلسازی به صورت غیرقطعی یا به صورت احتمال استفاده می‌کند. برای نمونه‌گیری در مونت کارلو از یک تابع توزیع به صورت احتمال استفاده می‌شود که در این جا تابع نرمال فرض شده است. تابع توزیع نرمال از متداول‌ترین تابع‌ها بوده که به صورت معادله ۳ آمده است.

۲-۳-۳- چگونگی محاسبه‌ی نشت

انتخاب گره‌های پایش به صورت تصادفی انتخاب شده است. گرچه طراحی شبکه پایش بر مبنای محدودیت‌های هزینه و در نظرگیری معیارهای فنی صورت می‌گیرد، اما هدف این پژوهش طراحی شبکه پایش نبوده و لذا گره‌های پایش به صورت تصادفی در برخی نقطه‌ها شبکه فرض شده است تا عملکرد الگوریتم جستجو در نشت‌یابی آزموده شود. اعمال نشت با در نظر گرفتن تغییرات ساعتی نیاز گرهی در شکل ۲ نشان داده شده است. روند کار بدین صورت است که در ابتدا ضریب‌های الگوی مصرف که در جدول ۱ آمده است، به مدل اعمال شده و همچنین میزان نشت پایه به نیاز گرهی اضافه شده است. این میزان برابر ۲۶٪ نیاز گرهی فرض شده است. پس از اجرای مدل، فشار گره(های) نشت برداشت شده و با استفاده از رابطه‌ی ۱، دبی‌های نشت جدید برای گره(های) نشت، به دست می‌آید. این میزان‌ها به عنوان نشت گره در تکرار بعد در

نظر گرفته می‌شود. این کار تا ثابت شدن میزان‌های فشار و دبی در گره نشت ادامه می‌یابد. در ادامه این میزان‌های نشت به مدل اعمال شده و در الگوریتم شناسایی نشت استفاده می‌شود.

۲-۴- الگوریتم حل مسئله

برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی در این پژوهش، از الگوریتم تکامل تفاضلی (Storn & Price, 1997) استفاده شده است. Storn & Price با استفاده از تابع‌های بسیار متنوعی عملکرد الگوریتم خود را با شماری از مشهورترین روش‌های بهینه‌سازی بررسی و مقایسه کردند. نتایج آزمایش آنان نشان‌دهنده‌ی برتری الگوریتم تکامل تفاضلی بود (Storn & Price, 1997). روند کار این الگوریتم در شکل ۳ نشان داده شده است.

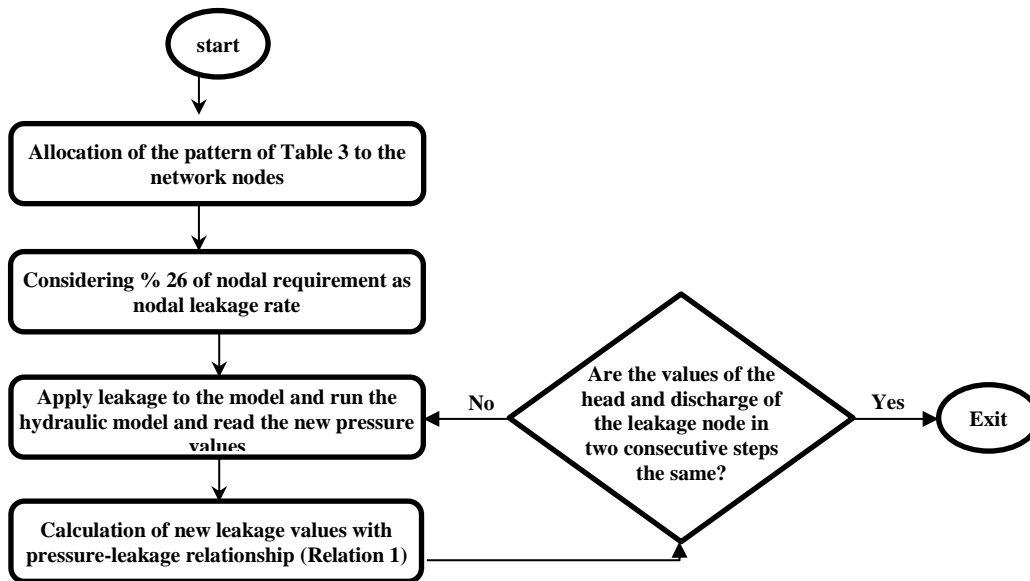


Fig. 2 Algorithm for calculating the leakage in the mode of hourly changes of nodal demand

شکل ۲ الگوریتم محاسبه میزان نشت در حالت تغییرپذیری‌های ساعتی نیاز گرهی

جدول ۳ ضریب‌های الگوی مصرف پایه (ضریب مصرف ساعتی در هر روز)

(Bureau of Water and Water Engineering and Technical Standards. 2013)

Table 3 Coefficients of the basic consumption pattern (Bureau of Water and Water Engineering and Technical Standards. 2013)

12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	Hour
1.1	0.90	1	1.10	1.25	1.10	0.75	0.45	0.30	0.35	0.45	0.5	Coefficients
24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	Hour
0.60	0.80	1.10	1.45	1.80	1.65	1.40	1.10	1.05	1.15	1.20	1.45	Coefficients

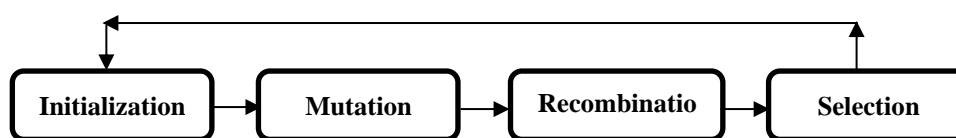


Fig. 3 The working process of differential evolution algorithm and its operators (Mansouri & Torabi, 2015)
 شکل ۳ روند کار الگوریتم تکامل تفاضلی و عملگرهای آن (Mansouri & Torabi, 2015)

گرفتن تغییرات ساعتی نیاز گرهی، میزان نشت نیز به صورت متغیر و با استفاده از رابطه فشار- نشت (معادله ۱) و با معلوم بودن سه فراسنجه میزان نشت (معادل با میزان نشت شبکه در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز)، فشار پایه (میانگین فشار گره‌های شبکه در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز) و دبی پایه‌ی گره‌ها در طول ۲۴ ساعت (استخراج شده از مدل هیدرولیکی) تعیین شده است. در پیش‌فرض‌های بعدی تاثیر خوشه‌بندی بر روند کار الگوریتم نیز دیده شده است و در پیش‌فرض‌های دهم و یازدهم به ترتیب ده و بیست نشت در شبکه دیده شده است. شکل ۴، موقعیت گره‌های نشت و گره‌های پایش را در پیش‌فرض یازدهم نشان می‌دهد.

۲-۵-۲- روند انجام کار در حالت عدم قطعیت نیازهای گرهی

در پیش‌فرض‌های سیزدهم و چهاردهم، مکان‌یابی نشت با در نظر گرفتن گرهی نشت به عنوان متغیر در حالت عدم قطعیت نیازهای گرهی با شمار نشت معلوم و مجهول صورت گرفته است. در این پیش‌فرض‌ها بر مبنای روش مونت کارلو و رابطه‌ی ۵، در ابتدا ضریب‌های ساعتی با توزیع نرمال به صورت تصادفی به صورت ماتریس استخراج می‌شود و در روند محاسبه‌ی نشت قرار داده می‌شود و فشار گرهی پایش در مدل اصلی خوانش می‌شود. آن‌گاه همان ضرایب ساعتی در مدل دوم گذاشته می‌شود، روند محاسبه‌ی نشت انجام می‌شود و فشار گرهی پایش در مدل دوم خوانش می‌شود و در تابع هدف (رابطه‌ی ۵) گذاشته می‌شود. روندنمای انجام کار در شکل ۶ آمده است.

از مهم‌ترین برتری‌های الگوریتم DE، سرعت بالا، سادگی و توانمند بودن آن است. این روش تنها از سه فراسنجه NP (اندازه جمعیت)، F (وزن جهش) و Cr (احتمال انجام باز ترکیبی یا تقاطع) برای اجرای مدل استفاده می‌کند. در ادامه، مرحله‌های انجام کار با استفاده از این الگوریتم نشان داده شده است

۲-۵-۲- روند انجام کار

برای انجام کار، دو مدل جداگانه برای شبیه‌سازی شرایط وجود دارد. یک مدل، معرف نشت واقعی است که در آن تعداد، میزان و موقعیت گره‌های نشت مشخص است و مدل دوم برای انجام کار نشت‌یابی استفاده می‌شود که در آن گره‌های نشت نامعلوم هستند و با سعی و خطا پیدا می‌شوند. مدل دوم، در ابتدا رشته پاسخی که معرف شمار و محل نشت هستند، تولید می‌کند. این رشته پاسخی که روی مدل می‌نشینند، در تابع هدف قرار می‌گیرند، مرتب می‌شوند و تابع جدید بر مبنای فشار گرهی پایش برآورد می‌شود. آن‌گاه دوباره این روند تکرار می‌شود و پاسخی جدید جایگزین پاسخ پیشین می‌شوند. آن قدر این روند تکرار می‌شود تا پاسخی که کمترین تفاوت را با فشار گرهی پایش در مدل اول را دارد، به دست می‌آید. روند بالا که در شکل ۵ نیز نشان داده شده است، به ازای پیش‌فرض‌های مختلفی اجرا شده که متغیرهای تصمیم شمار، میزان و موقعیت نشت می‌باشند.

۲-۵-۱- روند انجام کار در حالت قطعیت نیازهای گرهی

برابر با جدول ۱، از پیش‌فرضی اول تا چهارم نیاز گرهی ثابت است. در پیش‌فرضی پنجم به بعد افزون بر در نظر

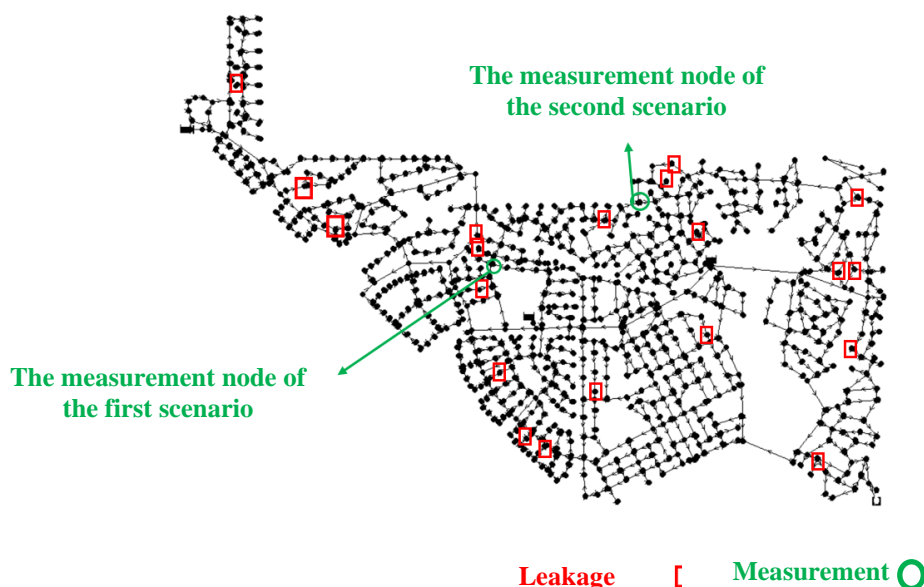


Fig. 4 The position of the monitoring node and 20 simultaneous leakage nodes in the network
 شکل ۴ موقعیت گرهی پایش و ۲۰ گره نشت همزمان در شبکه

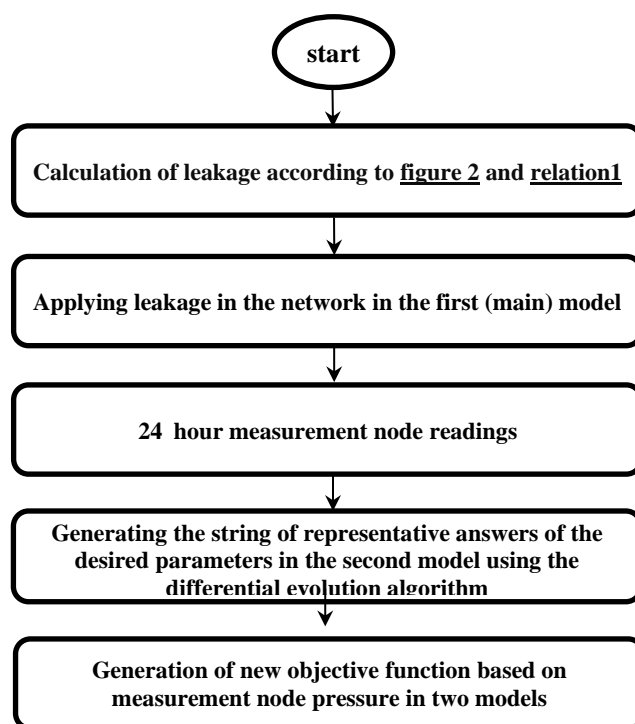


Fig. 5 The process of doing work in the state of certainty of nodal needs
 شکل ۵ روندنمای انجام کار در حالت قطعیت نیازهای گرهی

۳-۱- بررسی و تحلیل نتایج پیش فرضهای نشت در حالت قطعی بودن نیازهای گرهی
 جداول ۴ و ۵، نتایج اجرای مدل در ۱۲ پیش فرض تعریف شده در حالت قطعیت نیازهای گرهی نشان می‌دهد. لازم به یادآوری است که هر پیش فرض ۵ الی ۱۰ بار اجرا شده

۳- نتایج و بحث
 همان‌طور که اشاره شد، پیش فرضهای نشت در دو حالت قطعیت و عدم قطعیت اجرا شدند که توضیح هر قسمت به صورت زیر آمده است.

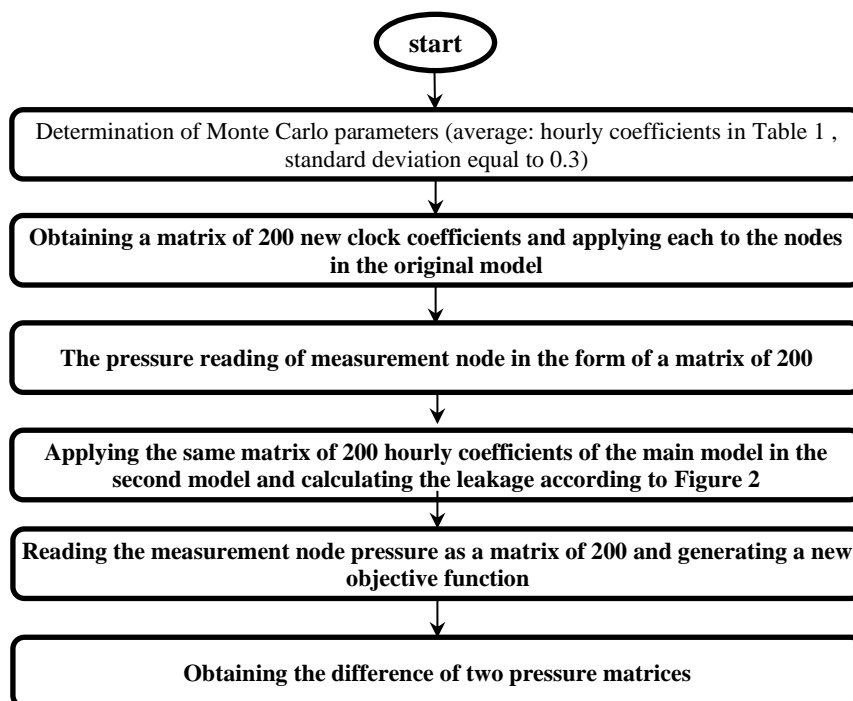


Fig. 6 The process of doing work in the state of uncertainty of nodal needs

شکل ۶ روندنمای انجام کار در حالت عدم قطعیت نیازهای گرهی

در حالت عدم قطعیت نیازهای گرهی

جدول ۶، نتایج اجرای مدل در پیش‌فرض‌های ۱۳ و ۱۴ تعریف شده در حالت عدم قطعیت نیازهای گرهی نشان می‌دهد.

در این دو پیش‌فرض همانند پیش‌فرض دوازدهم، در آغاز شمار نشت کم در شبکه گذاشته شده است و به تدریج در زیرپیش‌فرض‌های بعدی، شمار نشت تا ۲۰ تا افزایش داشته است. در پیش‌فرضی ۱۴، شمار نشت توسط مدل درست به دست می‌آید ولی محل نشت متفاوت بود که البته در همه‌ی پیش‌فرض‌های ۹ الی ۱۴، محل نشت یافت شده توسط مدل نزدیک محل نشت واقعی در مدل اصلی بود. درصد عملکرد کلی پیش‌فرض سیزدهم ۹۲/۲۵٪ و پیش‌فرضی چهاردهم ۹۱/۴۷٪ می‌باشد.

شایان یادآوری است که مسئله نشت‌یابی بر روی شبکه مورد بررسی در این تحقیق، پژوهش Shekofteh (2018) نیز بررسی و ارزیابی شده است. در پژوهش و پایان‌نامه‌ی تنظیمی از اجرای Shekofteh (2018) از ترکیب شبکه‌ی عصبی مصنوعی و فرضیه‌ی گراف برای تبدیل شبکه‌های آب به ناحیه‌های جداگانه و شناسایی ناحیه‌های محل

است که درصد موفقیت اعلام شده، از تقسیم شمار حالت‌هایی که پاسخ مسئله پیدا شده است به کل حالت‌ها محاسبه شده است.

در پیش‌فرض‌های اول تا هشتم با ثابت و متغیر در نظر گرفتن نیاز گرهی و در نظر گرفتن یک نشت در شبکه، عملکرد الگوریتم ۱۰۰٪ بوده است و با دور شدن گرهی پایش از گرهی نشت در پیش‌فرض نهم، عملکرد مدل تا ۲۰٪ کاهش یافته است. با اعمال شمار نشت زیاد در پیش‌فرض‌های دهم و یازدهم عملکرد مدل ۹۵٪ و ۹۴/۵٪ می‌شود. در پیش‌فرضی دوازدهم، شمار نشت مجهول در نظر گرفته شده است و شمار گره‌های نشت به صورت متغیر در زیرپیش‌فرض‌های تعریف شده از ۵ تا ۲۰ نشت تغییر می‌کند.

با توجه به جدول ۵، درصد عملکرد کلی پیش‌فرض دوازدهم برای پیدا کردن محل نشت برابر ۹۶/۶۰٪ می‌باشد و شمار نشت‌ها در هر تکرار درست به دست می‌آید.

۲-۳- بررسی و تحلیل نتایج پیش‌فرض‌های نشت

جدول ۵ نتایج اجرای پیش‌فرض‌های نشت در پیش‌فرض دوازدهم

Table 5 The results of the implementation of the leakage in the twelfth scenario

Total Success %	Success %	The Number Of Times The Model Finds The Correct Answer	The Total Number Of Iterations Of The Model	The Number Of Leaks In The Network	Repeat	Scenario	Base Demand	Scenario No.
%100	%100	5	5	5	1			
					2			
					3			
					4			
					5			
%97.5	%87.5	8	5	8	1	Locating the leak by considering the number and node of the leak as a decision variable simultaneously with the number of unknown leaks	Unstable	12
					2			
					3			
					4			
					5			
%94.93	%91.66	12	5	12	1			
					2			
					3			
					4			
					5			
%94	%90	18	5	20	1			
					2			
					3			
					4			
					5			

و همچنین عدم قطعیت نیازهای گرهی نیز دیده شده است که در پایان‌نامه‌ی یاد شده تنها یک نشت آن هم در شرایط مدلسازی قطعی در این شبکه در نظر گرفته شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش شناسایی محل نشت در قالب چندین پیش‌فرض شامل پیش‌فرض‌هایی با شمار بالای نشت مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از یک مدل شبکه واقعی با ابعاد ۱۷۷۰ گره و ۱۹۷۷ لوله استفاده شد و پیش‌فرض‌های مختلف بررسی شد که در بعضی از این پیش‌فرض‌ها شمار نشت معلوم و در بعضی شمار نشت مجهول بوده است و لحاظ همزمان عدم قطعیت نیازهای

نشت و همچنین از آموزش داده‌ها با استفاده از شبکه‌ی عصبی و کوچک‌تر کردن ناحیه‌های مشکوک به نشت، بهره گرفته شده است و که تنها هدف شناسایی محدوده‌ی دارای گره‌ی نشت بوده است پیش‌فرض‌های محل گره‌ی نشت در این مقاله متفاوت با گره‌ی نشت تعریف شده در پایان‌نامه‌ی یاد شده بوده است. اما به طور کلی، در پایان‌نامه یاد شده، برای شبکه‌ی Wolf-Cordera Ranch یک گره‌ی نشت در نظر گرفته شده است و در عمل آموزش شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای زمانی که شمار گره‌های نشت از یک عدد بیشتر باشند زمان‌بر خواهد بود، این در حالی است که استفاده از روش پیشنهاد شده در این پژوهش، بار محاسبه‌شدنی کمتری دارد. همچنین در این پژوهش، موارد دیگری از جمله شمار زیاد و مجهول نشت

جدول ۶ نتایج اجرای پیش‌فرض‌های نشت در پیش‌فرض‌های سیزدهم و چهاردهم

Table 6 The results of the implementation of leakage scenarios in the 13th and 14th scenarios

Total Success %	Success %	The Number Of Times The Model Finds The Correct Answer	The Total Number Of Iterations Of The Model	The Number Of Leaks In The Network	Repeat	Scenario	Base Demand	Scenario No.		
٪100	٪100	1	5	1	1	Locating the leak by considering the leak node as a decision variable in the uncertainty of nodal needs with a known number of leaks	Unstable	13		
					2					
					3					
					4					
					5					
٪96	٪100	5	5	5	1	Locating the leak by considering the leak node as a decision variable in the uncertainty of nodal needs with a known number of leaks	Unstable	13		
	٪80	4			2					
	٪100	5			3					
					4					
					5					
٪94	٪100	10	5	10	1	Locating the leak by considering the leak node as a decision variable in the uncertainty of nodal needs with a known number of leaks	Unstable	13		
	٪90	9			2					
	٪80	8			3					
	٪100	10			4					
					5					
٪91	٪95	19	5	20	1	Locating the leak by considering the leak node as a decision variable in the uncertainty of nodal needs with a known number of leaks	Unstable	13		
	٪95	19			2					
	٪90	18			3					
	٪90	18			4					
	٪85	17			5					
٪100	٪100	1	5	1	1	Locating the leak by considering the leak node as a decision variable in the uncertainty of nodal needs with unknown number of leaks	Unstable	14		
					٪80				4	2
					٪100				5	3
					٪80				4	4
										5
٪90	٪90	9	5	10	1	Locating the leak by considering the leak node as a decision variable in the uncertainty of nodal needs with unknown number of leaks	Unstable	14		
	٪100	10			2					
	٪90	9			3					
	٪80	8			4					
	٪90	9			5					
٪89.36	٪80.04	12	5	15	1	Locating the leak by considering the leak node as a decision variable in the uncertainty of nodal needs with unknown number of leaks	Unstable	14		
	٪86.71	13			2					
	٪100	15			3					
	٪93.38	14			4					
	٪86.71	13			5					
٪86	٪80	16	5	20	1	Locating the leak by considering the leak node as a decision variable in the uncertainty of nodal needs with unknown number of leaks	Unstable	14		
	٪85	17			2					
	٪90	18			3					
	٪85	17			4					
	٪90	18			5					

عدم قطعیت در شبکه بررسی شد. در حالت بدون در نظرگیری عدم قطعیت و تنها اعمال الگوی میانگین نوسان‌های ساعتی مصرف، تنها ۰.۰۵٪ از گره‌های شبکه فشارهای کمتر از فشار کمینه ۱۴ متر را در طی ۲۴ ساعت تجربه می‌کنند. در حالت لحاظ عدم قطعیت گرهی، با اعمال بزرگترین ضریب‌های مصرف ساعتی به گره‌های

گره‌ی نیز بررسی شده است تا شکاف موجود در بررسی‌های پیشین از حیث مجهول بودن شمار نشت و همزمان عدم قطعیت نیاز گرهی پوشش داده شود. محدودیتی که در این پژوهش وجود دارد، استفاده از شبیه‌سازی مبتنی بر تقاضا است. در این تحقیق، فشار تمامی گره‌ها در حالت بدون لحاظ عدم قطعیت و لحاظ

مقاله Zandi et al. (2021) آمده است، در نظرگیری این نوسانات مصرف در مدلسازی، تاثیر معکوس‌ناپذیری یا ill-posed condition را کاهش می‌دهد. البته این مسئله تا اندازه زیادی به ویژگی‌های شبکه مورد بررسی، ابعاد آن و موقعیت نقطه‌های پایش شبکه نیز بستگی دارد. در این مقاله، با در نظر گرفتن تنها نوسان‌های مصرف، اثر مسئله‌ی بالا کاهش یافت و موفقیت الگوریتم به حدود ۹۰٪ رسید. مسلماً برای بهتر شدن نتیجه نشت‌یابی و کاهش اثر ill-posed condition باید شمار نقطه‌های پایش شبکه را افزایش داد که در پی آن هزینه‌های خرید تجهیزات را در پی دارد.

بررسی نشت‌یابی با مدلسازی مبتنی بر فشار هدف این تحقیق نبوده است. از آنجا که استفاده از مدلسازی مبتنی بر فشار برای شبیه‌سازی شرایط واقعی بهره‌برداری مناسب‌تر است، پیشنهاد و تاکید می‌شود در بررسی‌های آتی این شیوه مدلسازی در الگوریتم‌های نشت‌یابی در شرایطی که میزان آب در دسترس در گره‌ها کمتر از حد مطلوب است، بررسی شود.

همچنین، در مطالعات آتی می‌توان محل‌های قرارگیری گیج‌(های) پایش در شبکه توزیع آب به منظور نشت‌یابی بهینه‌سازی و بر مبنای تحلیل حساسیت سامانه انتخاب نمود. افزون بر این، می‌توان با ترکیب مدل و الگوریتم پیشنهادی با روش شبیه‌سازی مونت کارلو خطای ابزارهای اندازه‌گیری را نیز وارد مسئله کرد و عملکرد روش‌های نشت‌یابی مبتنی بر مدلسازی را واقع‌بینانه‌تر سنجید.

۵- منابع‌ها

- Bai, Y. & Bai, Q. (2014). Leak Detection Systems, Subsea Pipeline Integrity and Risk Management.
- Bureau of Water and Water Engineering and Technical Standards (2013). Publication 117-3, Regulations for the design of urban and rural water transmission and distribution systems. (in Persian)
- Cugueró-Escofet, P., Blesa, J., Perez, R., Escofet, M.A.C. & Sanz, G. (2015). Assessment of a Leak Localization Algorithm in Water Networks under Demand Uncertainty. *International Federation of Automatic Control*, 48(21), 226-231.
- Fallahi, H., Ghazizadeh, M. Aminnejad, B. &

شبکه (تولید شده در طی فرایند مونت کارلو) و اجرای شبکه در حالت در نظرگیری نشت، مشاهده شد تنها در ۱۷٪ مواقع فشار گره‌ها کمتر از حد استاندارد (۱۴ متر ستون آب که حد مطلوب فشار برای تامین کامل تقاضای مصرف در نظر گرفته شده است)، قرار می‌گیرند. لذا در این مسئله که شبیه‌سازی مبتنی بر تقاضا انجام شده است، می‌توان گفت از آنجا که به طور کلی فشار به زیر فشار کمینه کاهش نیافته، نتایج این شیوه مدلسازی برای نشت‌یابی شبکه مورد نظر معتبر بوده و می‌توان گفت سازگار بر نتایج شبیه‌سازی مبتنی بر فشار خواهد بود. بنابراین شرایط استفاده از روش تحلیل مبتنی بر تقاضا در این بررسی برقرار بوده است. در شرایط واقعی نیز، در خیلی از موارد و در بسیاری از شبکه‌ها یا حتی در منطقه‌های با تنش آبی، دست‌کم در طی ساعت‌های مشخصی از شبانه‌روز یا روزهای مشخصی، شرایط بالاتر بودن فشارهای گرهی از حداقل فشار مطلوب در گره‌ها برقرار است و لذا شبیه‌سازی مبتنی بر تقاضا برای آنها معتبر است.

با افزایش شمار نشت به طور همزمان تا ۱۰ و ۲۰ مورد، به ترتیب عملکرد مدل به میزان ۵٪ و ۵/۵٪ کاهش یافت. لازم به یادآوری است اگر چه با افزایش گره‌های نشت و در پی آن افزایش پیچیدگی مسئله عملکرد مدل کاهش یافته است، ولیکن همین میزان موفقیت نیز می‌تواند با کاهش نشت شبکه به افزایش بهره‌وری منابع آبی و کاهش تنش آبی کمک کند. میزان موفقیت مدل در پیدا کردن شمار نشت در پیش‌فرضی که شمار نشت مجهول در نظر گرفته شده است، در حدود ۹۶٪ مشاهده می‌شود و با مقایسه‌ی پیش‌فرض‌های نشت معلوم و مجهول، می‌توان دریافت که تفاوت محسوسی در عملکرد الگوریتم در یافتن شمار نشت مشاهده نمی‌شود بلکه چالش اصلی، یافتن محل نشت است. در پیش‌فرض‌های سیزدهم و چهاردهم که عدم قطعیت نیازهای گرهی در نظر گرفته شده بود، عملکرد الگوریتم بالای ۹۰٪ می‌باشد. با توجه به اینکه شبیه‌سازی هیدرولیکی در این پژوهش شبیه‌سازی دوره زمانی گسترده بوده است، نوسان‌های ساعتی مصرف‌های گرهی در مدلسازی در نظر گرفته شده است و همان طور که در

- & Moasheri, R. (2022). Leak detection in water distribution networks using the wild horse algorithm (WHO), Proceeding of the 4th Iran Water and Wastewater Science and Engineering Congress. (in Persian)
- Sabet, M., Nasirian, A., Mohtasham, M. & Ahrari, M. (2018). Determination of Value and Location of the Leakage in Water Distribution Networks Using Calibration (Case Study: The Water Distribution Network of Golbahar, Khorasan Razavi), *Journal of Water and Wastewater*, 30(6), 119-125. (in Persian)
- Sage, P. (2004). Developments in use of network models for leakage management at United Utilities North West. Paper presented at the CIWEM North West and North Wales Branch Water Treatment and Distribution Conference, Warrington, UK.
- Shekofteh, M. (2018). Finding the location of leakage in water supply systems with the help of distribution network simulation and computational intelligence. Master's thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Water and Environment, Shahid Beheshti University, Tehran. (in Persian)
- Sophocleous, S., Savić, D. & Kapelan, Z. (2019). Leak localization in a real water distribution network based on search-space reduction. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(7), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001079](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001079).
- Storn, R. & Price, K. (1997). Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 11, 341–359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>.
- Teymouri, N. (2014). Identification of nodal leakage using genetic algorithm optimization method in water distribution networks. Master's thesis, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (in Persian)
- Wu, Z.Y., Sage, P. & Turtle, D. (2010). Pressure-Dependent Leak Detection Model and Its Application to a District Water System. *J. Water Resour. Plann. Manage*, 136(1), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2010\)136:1\(116\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2010)136:1(116)).
- Wu, Z.Y., Burrows, R., Moorcroft, J., Croxton, N. & Limanond, S. (2010). Pressure dependent leakage detection method compared with conventional techniques. Paper presented at the Water Distribution System Analysis (2010), [https://doi.org/10.1061/41203\(425\)98](https://doi.org/10.1061/41203(425)98).
- 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.
- Ghiyas, M. (2013). An introduction to the Monte Carlo simulation method. *Basparash Quarterly*, 4(1), 67-77. (in Persian)
- Izadpanah, Z. & Maghrebi, M., (2018), Evaluation of The Uncertainty Of Measuring Pressure Gauges In Determining The Location Of Leaks In Networks Water Distribution, The 16th Iranian Hydraulic Conference, Technical and Engineering Faculty, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil. (in Persian)
- Kang, D.S., Pasha, M.F.K. & Lansey, K. (2009). Approximate methods for uncertainty analysis of water distribution systems. *Urban Water Journal*, 6(3), 233-249.
- Lindstrom, L., Gracy, S., Magnusson, S. & Sandberg, H. (2022). Leakage Localization in Water Distribution Networks: A Model-Based Approach, European Control Conference (ECC) July 12-15, 2022, London, United Kingdom.
- Mansouri, R. & Torabi, H. (2015). Using the differential evolution algorithm to optimize the water distribution network; Case study: Ismailabad pressurized irrigation network. *Danesh Water and Soil Science*, 25(4/2), 81-95. (in Persian)
- Mirats-Tur, J.M., Jarrige, P.A., Meseguer, J. & Cembrano, G. (2014). Leak Detection and Localization Using Models: Field Results. *Procedia Engineering*, 70, 1157-1165.
- Moasheri, R. & Jalili-Ghazizadeh, M. (2020) Locating of Probabilistic Leakage Areas in Water Distribution Networks by a Calibration Method Using the Imperialist Competitive Algorithm. *Water Resour. Manage*, 34, 35-49.
- Moasheri, R., Ghazizadeh, M.J. & Tashayoei, M. (2021). Leakage detection in water networks by a calibration method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 80, 101995, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.101995>.
- Miserjani, P., Sayari, N. & Sayari, S. (2021). Leak Modeling in Water Supply Networks Using WaterGems Model and Artificial Neural Network. *Journal of Water and Sustainable Development*, 8(2), 81-90. (in Persian)
- Nasiri-Dahej, M., Jalili-Ghazizadeh, M., Jabbari, E.

Zaman, D., Tiwari, M.K., Gupta, A.K. & Sen, D. (2020). A review of leakage detection strategies for pressurized pipeline in steady-state. *Engineering Failure Analysis*, 109, 104264, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104264>.

Zandi R, Yazdi J. & Shamsavandi M. (2021). Leakage Detection in Water Distribution Systems by Considering the Hourly Changes of Node Demands Using Harmony Search Algorithm. *Modares Civil Engineering Journal*, 21(4), 205-217. (in Persian)

Zandi, R. (2021). Development of an optimization model for leak detection in water distribution networks, Master thesis, Faculty of Civil Engineering, Water and Environment, Shahid Beheshti University. (in Persian)