

Using Bayesian theory for leak detection in water network systems

Mohammad Ghanbari Vand¹, Ali Rahmani Firoozjaee^{2*} , Alireza Keramat³, Amir Zayeri Baghlani nejad⁴

1. PhD Student of Hydraulic Structures, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.
2. Structural Engineering Department, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.
3. Civil and Environmental Engineering Department, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China.
4. Structural Engineering Department, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

Abstract

In recent decades, several methods have been developed for leak detection in water supply networks, one of which is the transient wave-based method. The transient wave-based leak detection method offers a growing and promising approach that comes with several challenges. The most important challenges of these methods are model uncertainty and noisy data. Model-based methods do not have high accuracy due to high uncertainties, and data-based methods also do not have high accuracy due to noisy data. This paper presents a method for detecting the leak location for a reservoir pipeline valve system using Bayesian theory. In detecting the pipeline leak location, the noise in the pressure signal collected from the sensors in the pipeline affects the accuracy of detection. In this research, a probability density function for the leak location is obtained by combining the prior probability density function obtained from the model and the data collected by the sensors. Then, the accuracy of the proposed method is investigated by solving a numerical example. In this regard, a pipe with a length of $L=3,000\text{m}$ and a diameter of $D=0.5\text{m}$ was considered. The Darcy-Weisbach friction factor was set to $f=0.03$. To initiate a transient wave, an instantaneous complete closure of the valve located at the downstream end of the pipe ($x=L$) was performed. This closure generated a transient wave with a speed of $a=1,200\text{ m/s}$, which propagated along the length of the pipe. The inlet of the pipe ($x=0$) was maintained at a constant pressure head of $H_{in}=25\text{ m}$. To measure the response of the pressure head, a sensor was strategically positioned at the end of the pipe ($x^*=L=3,000\text{ m}$). The objective was to observe the pressure variations caused by the transient wave. The time required for the contact discontinuity, generated by the valve closure, to travel from the valve back to the inlet was calculated as $\tau=L/a=2.5\text{ s}$. This represented the round-trip travel time of the wave within the pipe. To ensure that the simulations captured the full behavior of the transient wave, the total simulation time was set to $T=2\tau$, thereby covering two complete cycles of the contact discontinuity passing through the sensor. In this numerical study, the effects of data noise, sensor location, and simulation time on the results were carefully investigated. The data collected from the sensors were subject to noise, which could affect the accuracy of leak detection. To investigate the impact of this noise, different scenarios with varying noise levels were simulated and analyzed. In addition, the location of the sensor also influenced the simulation results. Various sensor placements were tested to identify the optimal location for achieving higher accuracy in leak detection. These studies demonstrated that sensor placement could significantly improve the results and increase detection accuracy. Finally, simulation time was examined as a critical factor in the analyses. Different simulation durations were tested to observe their effects on the results and their impact on the accuracy of leak detection. The analyses revealed that selecting the appropriate simulation time could enhance the accuracy and speed of leak detection.

The results of the numerical study demonstrated the ability of the method to identify leak locations in a water pipeline network. Overall, this study showed that data noise, sensor location, and simulation time are all factors that can affect the accuracy and quality of leak detection. By effectively managing these factors, the performance of leak detection systems can be improved. This innovative approach not only enhances the accuracy of leak detection but also provides a robust framework for addressing the inherent uncertainties and noise in the data.

Review History

Received: Mar 1, 2025

Revised: Nov 16, 2025

Accepted: Apr 18, 2026

Keywords

Water network leak detection

Bayesian theory

water distribution network
pressurized pipelines

* Corresponding Author Email: rahmani@nit.ac.ir - ORCID: 0000-0001-5458-9963



استفاده از تئوری بیزین برای نشت یابی در سیستم انتقال آب

محمد قنبری وندی^۱، علی رحمانی فیروزجائی^{۲*} , علیرضا کرامت^۳، امیر زایری بغلانی نژاد^۴

۱. دانشجوی دکتری سازه هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.
۲. دانشیار گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.
۳. پژوهشگر، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه علم و فناوری هنگ کنگ، هنگ کنگ، چین.
۴. استادیار گروه سازه، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

در دهه‌های اخیر روش‌های متعددی برای تشخیص نشت در شبکه‌های آبرسانی ابداع شده است که یکی از آن‌ها روش مبتنی بر موج گذرا است. روش تشخیص نشت مبتنی بر موج گذرا، یک رویکرد رو به رشد و امیدوار کننده را ارائه می‌دهد که با چالش‌های متعددی همراه هستند. مهمترین چالش این روش‌ها، عدم قطعیت مدل و داده‌های نویز آلود هستند. روش‌های مبتنی بر مدل بدلیل وجود عدم قطعیت‌های زیاد و روش‌های مبتنی بر داده بدلیل نویز آلود بودن داده‌ها از دقت بالایی برخوردار نیستند. این مقاله روشی را برای شناسایی موقعیت نشت با استفاده از تئوری بیزین ارائه می‌کند. در مکان‌یابی نشت خط لوله، نویز موجود در سیگنال فشار که از سنسورهای موجود در خط لوله جمع‌آوری شده، بر دقت تشخیص محل نشت تأثیر می‌گذارد. در این تحقیق با ترکیب تابع چگالی احتمال پیشین که از مدل بدست می‌آید و داده‌های جمع‌آوری شده توسط سنسورها، یک تابع چگالی احتمال برای محل نشت بدست آمده است. سپس با حل نمونه عددی دقت روش پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده توانایی روش برای شناسایی محل نشت در یک شبکه خطوط لوله انتقال آب است.

کلمات کلیدی

نشت‌یابی شبکه آب
تئوری بیزین
شبکه توزیع آب
خطوط لوله تحت فشار

۱- مقدمه

مدیریت کارآمد و مؤثر شبکه‌های توزیع آب که وظیفه انتقال آب به نقاط مصرف نهایی را بر عهده دارند، برای توسعه و پایداری مناطق شهری در جامعه مدرن حیاتی است. با این حال تخمین زده می‌شود، از کل مقدار آب توزیع شده، ۳۰ درصد از آن به‌دلیل وجود نشت از بین می‌رود [5]. این برآورد حدود ۱۲۶ میلیارد متر مکعب آب در سال در سراسر جهان است. بنابراین، به منظور اطمینان از ایمنی و قابلیت اطمینان سیستم خط لوله، شناسایی و تشخیص محل نشت در تولید صنعتی و زندگی روزمره بسیار مهم است. به همین دلیل، شرکت‌های آب به دنبال به کمتر

تأمین آب برای مصارف روزمره در سراسر جهان و همچنین برای بخش‌های مختلف اقتصاد از جمله کشاورزی، صنعت و خدمات ضروری است. در حال حاضر، حدود ۴ میلیارد نفر در طول حداقل یک ماه از سال با کمبود شدید آب مواجه هستند [1]. علاوه بر این، با توجه به جمعیت کنونی جهان که به ۷٫۹ میلیارد نفر رسیده است [2] و همچنین روند تمرکز بیشتر توسعه بر شهرها [3]، پیش‌بینی می‌شود تقاضای جهانی آب بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۵۰ حدود ۵۵ درصد افزایش یابد [4].

* رایانامه نویسنده مسئول: ORCID - rahmani@nit.ac.ir :0000-0001-5458-9963

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به‌صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این



مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.

رساندن تأثیر آثار نامطلوب ناشی از نشت هستند.

روش‌های فعلی تشخیص نشت خط لوله را می‌توان به طور عمده به سه دسته تقسیم کرد: (۱) تشخیص با توجه به محیط خارج از خط لوله. (۲) تشخیص با توجه به وضعیت داخلی خط لوله؛ (۳) تشخیص با توجه به وضعیت جریان سیال در خط لوله. دسته اول مربوط به تشخیص و مکان‌یابی نشت با تشخیص تغییرات در محیط خارج از خط لوله است. برای این منظور از روش رادار نفوذ به زمین^۱ استفاده می‌شود [6]. دسته دوم عیوب دیواره خط لوله را توسط ابزارهایی مانند حسگرهای فیبر نوری [8، 7]، حسگرهای صوتی [9]، فناوری نشت مغناطیسی [10] و غیره تشخیص می‌دهد. دسته سوم مدلی بر اساس داده‌های موثر، مانند جریان و فشار که وضعیت جریان خط لوله را توصیف می‌کند، ایجاد می‌کند و سپس نظارت و موقعیت‌یابی لحظه‌ای یک نقطه نشت را تکمیل می‌کند. این نوع روش عمدتاً شامل روش موج فشار منفی^۲ [11، 12]، روش گرایان فشار [13]، روش تعادل حجم/جرم [14] و تکنیک‌های مبتنی بر آزمون گذرا [15، 16] است.

در چند دهه گذشته، تکنیک‌های مبتنی بر آزمون گذرا به دلیل ماهیت داده‌های اندازه‌گیری به دست آمده و هزینه سرمایه کمتر، به طور گسترده‌ای توسعه یافته‌اند [17، 18]. با این حال، اثربخشی این روش‌ها به شدت به دقت مدل خط لوله مورد استفاده بستگی دارد. از منظر ساخت مدل، دو رویکرد اصلی شامل مدل‌سازی مبتنی بر فیزیک و مدل‌سازی مبتنی بر داده هستند. رویکرد مبتنی بر داده نیازی به دانش عمیق هیدرولیک خط لوله ندارد، بلکه فقط با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده و به‌کارگیری ابزارهای آماری تحلیل‌های لازم را انجام می‌دهد. از بین روش‌های مبتنی بر داده شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) بیشترین استفاده را دارند [19-21].

برای روش تشخیص نشت خط لوله بر اساس مدل مبتنی بر فیزیک، قابلیت اطمینان مدل تأثیر زیادی بر نتایج تشخیص نشت دارد. با این حال، به دلیل تغییرات پیچیده شرایط عملیاتی خط لوله و عدم قطعیت‌های زیاد در فرآیند واقعی، حتی مدل‌های پیچیده و پیشرفته ریاضی نیز نمی‌توانند به طور دقیق یک خط لوله را برای عملیات واقعی شبیه‌سازی کنند. همیشه بین مدل به دست آمده و مدل واقعی انحراف خاصی وجود دارد که به نوبه خود منجر به کاهش دقت تشخیص نشت و مکان‌یابی و در نتیجه بروز آلام‌های

کاذب یا هشدارهای نشت می‌شود. یک راه جایگزین برای بهبود قابلیت اطمینان مدل، ترکیب مدل مبتنی بر فیزیک و مدل داده محور است. در این روش‌ها انحراف مدل به دلیل عدم قطعیت را می‌توان با توجه به داده‌های اندازه‌گیری تنظیم و اصلاح کرد.

گرهارد و همکاران [22] یک روش تشخیص نشت و مکان‌یابی را پیشنهاد کردند که در این روش از ترکیب مدل‌های گذرای بلادرنگ^۳ و شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده کردند. سولدویلا و همکاران [23] از یک مدل مبتنی بر داده برای ارزیابی مقادیر به دست آمده از مقایسه بین اندازه‌گیری‌ها و مقادیر به دست آمده توسط مدل شبکه توزیع آب برای مکان‌یابی نشت استفاده کردند. وانگ و همکاران [24] یک مدل ترکیبی که از یک شبکه عصبی RBF برای جبران خطای مدل خط لوله استفاده می‌کند را پیشنهاد دادند. با این وجود، این روش‌ها محدودیت‌های خاصی دارند. نخست آنکه مدل داده محور مشکلات مدل‌سازی مکرر و راندمان محاسباتی پایین را دارد، به عبارت دیگر پس از تولید هر طرح جدید، لازم است داده‌ها دوباره جمع‌آوری شوند تا یک مدل داده محور جدید آموزش داده شود. دوم اینکه مقدار زیادی از داده‌های نمونه برای ایجاد یک مدل داده محور مورد نیاز است. سوم آنکه داده‌های اندازه‌گیری شده آلوده به نویز هستند.

رویکردهای مبتنی بر تئوری بیزین نیز طی سال‌های اخیر به‌طور گسترده در زمینه تشخیص و مکان‌یابی نشت توسعه یافته‌اند. پولاکیس و همکاران [۲۵] یک روش مکان‌یابی و برآورد نشت مبتنی بر تئوری بیزین را همراه با یک شبیه‌ساز هیدرولیکی ارائه کردند. در این روش، مدل هیدرولیکی شبکه با در نظر گرفتن مکان و اندازه نشت به‌عنوان پارامترهای مجهول، به‌صورت مستمر به‌روزرسانی می‌شود. بدین منظور، مقادیر اندازه‌گیری‌شده فشار و دبی با مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل مقایسه می‌شوند. عدم قطعیت پارامترها از طریق توابع چگالی احتمال (PDF) ارزیابی شده و میزان سازگاری مدل‌های مختلف با داده‌های اندازه‌گیری‌شده تعیین می‌شود. سپس، مکان و اندازه نشت از طریق حل مجموعه‌ای از مسائل بهینه‌سازی که هدف آن‌ها بهینه‌سازی توابع چگالی احتمال متناظر است، تخمین زده می‌شوند. این مسائل بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) حل می‌شوند. ژانگ و وانگ [۲۶] نیز یک روش مکان‌یابی نشت مبتنی بر مدل را بر پایه نظریه بیزین و اطلاعات فشر ارائه کردند. در این رویکرد، تئوری بیزین برای به‌روزرسانی احتمالات مربوط به پارامترهای نشت، شامل موقعیت و

¹ Ground Penetrating Radar Method

² Negative Pressure Wave Method

³ Real-time Transient Models

شامل یک لوله اصلی انتقال آب با طول L و قطر D است. لوله مجهز به یک سنسور واقع در $x = x^*$ و یک شیر در خروجی لوله $x = L$ است. با بستن سریع شیر، جریان گذرا در خط لوله تشکیل می شود و موج فشاری ایجاد می کند که به سمت بالادست حرکت می کند. از قرائت سیگنال ارسال شده در محل سنسور برای شناسایی محل نشتی استفاده می شود.

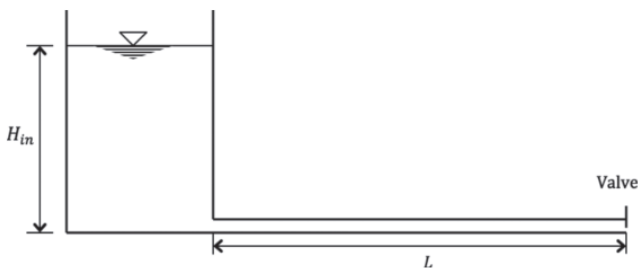
معادلات مومتم و پیوستگی دو معادله اصلی در تحلیل این جریان به شمار می آیند و به صورت زیر معرفی می شوند [29]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + a^2 \frac{\partial Q}{gA \partial x} = 0 \quad (1)$$

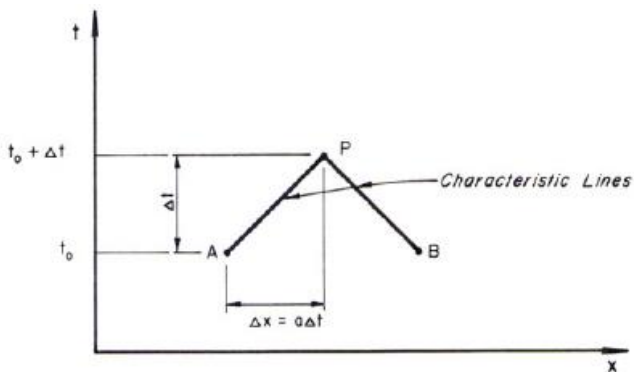
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2AD} = 0 \quad (2)$$

که در آن h تراز پیزومتری لحظه ای، a سرعت موج، g ثابت گرانش، f ضریب دارسی- وایسباخ و $A = \pi D^2/4$ سطح مقطع لوله در نظر گرفته می شوند.

هدف از تحلیل، محاسبه Q و h در گام زمانی بعدی (نقطه P) با توجه به اینکه این مقادیر در نقاط A و B مشخص است، می باشد (شکل (۲)).



شکل ۱. سیستم مخزن - لوله - شیر
Fig. 1. Tank - Pipe - Valve System



شکل ۲. خطوط مشخصه
Fig. 2. Characteristic lines

شدت نشت، در مدل هیدرولیکی به کار گرفته می شود، در حالی که اطلاعات فشار برای برآورد مقادیر این پارامترها مورد استفاده قرار می گیرد. در نهایت، میزان نشت با استفاده از یک شبکه عصبی پس انتشار تخمین زده می شود و محل نشت از طریق تحلیل ویژگی های جریان در شبکه توزیع آب (WDN) تعیین می گردد. Qi و همکاران [۲۷] نیز روشی برای مکان یابی نشت ارائه کردند که ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و نظریه تصمیم گیری بیزین است.

الوحدی و همکاران [۲۸] روشی نوآورانه مبتنی بر به روزرسانی تئوری بیزین و روش توزیع ها ارائه کردند که با حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی حاکم بر تابع چگالی احتمال فشار، امکان پیش بینی نشت را در شرایط همراه با عدم قطعیت فراهم می کند. در این روش، تابع چگالی احتمال فشار به عنوان توزیع پیشین در مدل بیزین در نظر گرفته می شود و سپس با تلفیق داده های حاصل از حسگرهای فشار، توزیع پسین مربوط به موقعیت و شدت نشت محاسبه می شود.

در این مقاله از تئوری بیزین^۱ و ترکیب داده های سنسور و مدل به منظور پیدا کردن مکان نشت استفاده شده است. تئوری بیزین روشی موثر برای تعیین کمیت عدم قطعیت پارامترها در یک مدل است. پارامترهای مدلی که باید تخمین زده شوند را می توان به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفت و سپس، برخی از متغیرهای مشاهده شده مرتبط یا شرایط شناخته شده را می توان برای استنتاج پارامترها به منظور به دست آوردن احتمال شرطی پسینی متغیرها استفاده کرد.

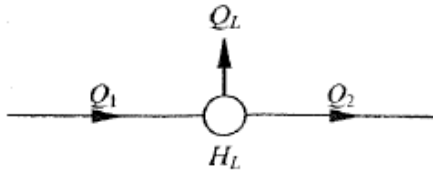
مقاله حاضر شامل بخش های زیر خواهد بود: در بخش دوم به مرور تئوری موج گذرا، حل معادلات ضربه قوچ و شبیه سازی نشت در خط لوله پرداخته می شود. در بخش سوم فرمول بندی روش پیشنهادی ارائه می شود. پس از بررسی کلیات روش بیزین، فرمول بندی این روش جهت استفاده در حل مساله نشت یابی ارائه می شود. در بخش چهارم به بررسی مسئله تعیین نشت در یک مدل عددی پرداخته می شود. در بخش پنجم به جمع بندی نتایج بدست آمده از تحقیق پرداخته خواهد شد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- فرمول بندی مساله

شکل (۱) یک سیستم مخزن-لوله-شیر را نشان می دهد که

¹ Bayesian Theory



شکل ۳. نشت در گره

Fig. 3. Leak at a Node

معادله پیوستگی در محل نشت به شکل زیر نوشته می شود:

$$Q_1 = Q_2 + Q_L \quad (10)$$

که در این رابطه Q_1 دبی در نقطه ۱، Q_2 دبی در نقطه ۲ و Q_L دبی نشتی می باشد. اگر از افت موضعی در محل نشت و از اختلاف ارتفاع فشاری معادل سرعت در محل نشت صرف نظر شود، معادله انرژی به صورت زیر خواهد بود:

$$H_{L1} = H_{L2} \quad (11)$$

که در این رابطه H_{L1} تراز پیزومتریک قبل از نشت و H_{L2} تراز پیزومتریک بعد از نشت می باشد.

۳- الگوریتم پیشنهادی

این قسمت شامل توضیحاتی درباره چگونگی فرمول بندی مسئله با استفاده از اصول بیز و تعیین تابع درست نمایی به منظور مدل سازی داده ها است. این بخش ها به طور جامع رویکردهای احتمالاتی و چگونگی استفاده از اطلاعات پیشین در بهبود دقت مدل ها را شرح می دهند.

۳-۱- قانون بیز

برای تعریف مسئله همسان سازی داده ها^۱ و تکنیک های مختلف مورد استفاده برای حل آن، یک اسکالر واحد در نظر گرفته شده است. فرض شود که دو تخمین از مقدار واقعی متغیر اسکالر x وجود دارد: یک مشاهده^۲ و یک تخمین قبلی^۳. ایده این است که از ترکیب این دو اندازه گیری پیش بینی بهتری از مقدار واقعی x بدست آید. فرمول بندی قانون بیز به صورت زیر ارائه شده است:

$$p(x|y) = \frac{p(y|x)p(x)}{p(y)} \quad (12)$$

توزیع پسین^۴، $p(x|y)$ ، حاوی تمام دانش در مورد کمیت

یکی از روش های کاربردی برای حل معادلات جریان گذرا روش مشخصه ها می باشد. معادلات مومتم و پیوستگی به صورت خطی با هم ترکیب شده و گسسته سازی به صورت زیر انجام می شود [29]:

$$Q_p = C_p - C_a h_p \quad (3)$$

$$Q_p = C_n - C_a h_p \quad (4)$$

$$C_p = Q_A + C_a h_A - R \Delta t Q_A |Q_A| \quad (5)$$

$$C_n = Q_B - C_a h_B - R \Delta t Q_B |Q_B| \quad (6)$$

$$C_a = \frac{gA}{a}, R = \frac{f}{2AD} \quad (7)$$

در این روابط Q_p دبی در نقطه p ، Q_A دبی در نقطه A ، Q_B دبی در نقطه B ، Δt گام زمانی، h_A تراز پیزومتریک در نقطه A ، h_B تراز پیزومتریک در نقطه B ، f ضریب اصطکاک دارسی-وایسباخ، A سطح مقطع لوله، D قطر لوله، g شتاب گرانش و a سرعت موج می باشد.

سرعت موج از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$a = \sqrt{\frac{k}{\rho[1 + (k/E)\psi]}} \quad (8)$$

در این رابطه، k ضریب تراکم پذیری سیال، ρ چگالی سیال، E مدول یانگ دیواره لوله و ψ ضریب هندسی مربوطه به لوله می باشد.

۲-۲- مدل سازی نشت

میزان جریان خروجی از محل نشت از رابطه روزنه پیروی می کند:

$$Q_{leak} = A_e \sqrt{2g(h_{leak} - Z_{leak})} \quad (9)$$

در این رابطه Q_{leak} دبی نشت، $A_e = A_{leak} * C_d$ مساحت مؤثر نشت، C_d ضریب تخلیه و A_{leak} مساحت ظاهری نشت، h_{leak} تراز پیزومتریک و Z_{leak} تراز محل نشت نسبت به سطح مبنا می باشد.

برای تحلیل جریان گذرا در یک لوله با استفاده از روش خطوط مشخصه به منظور شناسایی نشت، لازم است که شرایط مرزی مربوط در معادلات وارد شوند. شرایط مرزی مکان نشت در محاسبات با توجه به شکل (۳) به صورت معادلات زیر بسط داده می شود.

¹ Data Assimilation

² Observation

³ Prior Estimate

⁴ Posterior Distribution

برای محاسبه این تابع، محل نشت را در تمامی گره‌های کاندید قرار داده (در این مطالعه ۱۱۹ محل کاندید نشت است) و تغییرات فشار در تمام مراحل زمانی ثبت می‌شود. در نهایت تابع چگالی احتمال فشار در هر گام زمانی برای ۱۱۹ نمونه مستقل به دست می‌آید.

$f(h_{obs})$ یک ثابت نرمال ساز است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f(h_{obs}) = \int f(h_{obs}|h, x_{leak})f(h, x_{leak}) dH \quad (17)$$

و نهایتاً تابع توزیع احتمال $f(x_{leak})$ با استفاده از توزیع حاشیه‌ای $f(h, x_{leak}|h_{obs})$ به دست می‌آید:

$$f(x_{leak}|h_{obs}) = \int f(h, x_{leak}|h_{obs})dH \quad (18)$$

در هر مرحله این تابع توزیع احتمال جدید به عنوان توزیع پیشین در گام بعدی رابطه (۱۳) تا رسیدن به زمان نهایی شبیه‌سازی استفاده می‌شود. انتظار می‌رود این تابع توزیع احتمال باریکتر از توزیع احتمال اولیه که یکنواخت بود باشد و با استفاده از آن بتوان محل نشتی را با درجه قطعیت معین پیش‌بینی کرد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی یک خط لوله مطابق شکل (۱) با مشخصات زیر در نظر گرفته شده است: طول لوله ۳۰۰۰ متر، قطر لوله ۰٫۵ متر، ضریب دارسی-وایسباخ ۰٫۰۳. موج گذرا با سرعت $a = 1,200 \text{ m/s}$ با بسته شدن کامل آنی شیر در پایین‌دست لوله ($x = L$) آغاز می‌شود. ورودی لوله ($x = 0$) دارای هد فشار ثابت $H_{in} = 25 \text{ m}$ است. سنسور در انتهای لوله $L = 3,000$ متر قرار گرفته تا هد فشار را اندازه‌گیری کند. زمان شبیه‌سازی $T = 5 \text{ sec}$ ثانیه تنظیم شده است. محل نشت در گره شماره ۳۹ یا $x_{leak} = 975 \text{ m}$ ، سرعت اولیه $u_0 = 0.518 \text{ m/s}$ و قدرت نشتی $3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ فرض شده است.

در شکل (۴) نتیجه روش این تحقیق و مقاله مرجع [27] مقایسه شده است. نمودار برتری‌هایی از جمله کاهش عدم قطعیت را به نمایش می‌گذارد که بیانگر دقت و کارایی بیشتر روش پیشنهادی در شناسایی و مکان‌یابی نشتی‌های آب در سیستم‌های لوله‌های زیرزمینی می‌باشد. این کاهش عدم قطعیت به وضوح در عملکرد بهتر الگوریتم نسبت به روش‌های موجود قابل مشاهده است.

مجهول x است. توجه شود که $p(y)$ به مقدار x بستگی ندارد. از آنجایی که $p(y|x)$ تابعی از آرگومان دوم، x است، یک تابع درست‌نمایی^۱ برای مشاهده است، $p(x)$ توزیع قبلی^۲ است.

۳-۲- فرمول‌بندی بیز

به روزرسانی بیزی [30] نیاز به یک مدل آماری برای مشاهدات، $f(h_{obs}|h, x_{leak})$ (تابع درست‌نمایی) دارد که از قرائت سنسور به دست می‌آید و همچنین نیاز به $f(h, x_{leak})$ دارد که از اطلاعات مدل بدست می‌آید. سپس، توزیع پسین $f(h, x_{leak}|h_{obs})$ با فرمول بیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$f(h, x_{leak}|h_{obs}) = \frac{f(h_{obs}|h, x_{leak}) * f(h, x_{leak})}{f(h_{obs})} \quad (13)$$

۳-۳- محاسبه تابع درست‌نمایی

فرض می‌شود خطاهای اندازه‌گیری که بر قرائت سنسورها اثر می‌گذارد از رابطه زیر پیروی می‌کند:

$$h_{obs} = h(x^*, t) + \xi(t) \quad (14)$$

که در آن h_{obs} فشاری است که سنسور نشان می‌دهد، $h(x^*, t)$ فشار واقعی در همان نقطه و $\xi(t)$ خطای اندازه‌گیری است. فرض می‌شود $\xi(t)$ نویز سفید گوسی با میانگین صفر و واریانس σ_ξ^2 است.

با این فرضیات $f_{h_{obs}|h, x_{leak}}$ یک تابع چگالی احتمال گاوسی با رابطه زیر است:

$$f(h_{obs}|h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\xi^2}} \exp\left[-\frac{(H - h_{obs})^2}{2\sigma_\xi^2}\right] \quad (15)$$

۴-۳- محاسبه $f(h, x_{leak})$

تابع توزیع احتمال $f(h, x_{leak})$ احتمال مشترک دو تابع توزیع احتمال $f(h|x_{leak})$ و $f(x_{leak})$ است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

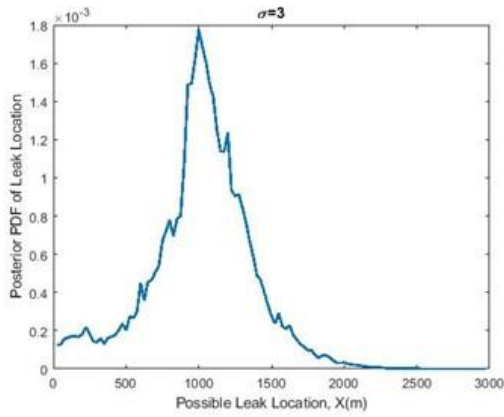
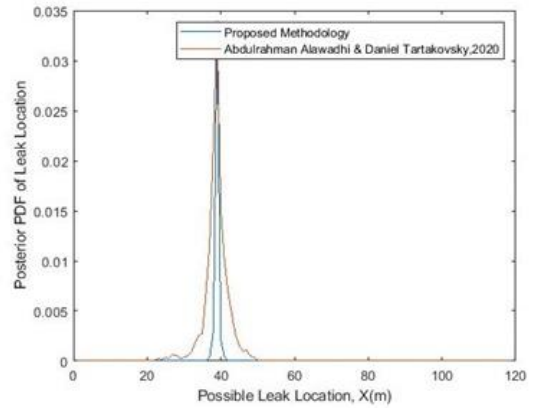
$$f(h, x_{leak}) = f(h|x_{leak})f(x_{leak}) \quad (16)$$

که در آن $f(x_{leak})$ تابع توزیع احتمال پیشین محل نشت است که به دلیل عدم دانش قبلی در این مورد در گام اول فرض می‌شود یک توزیع یکنواخت است (در گام‌های بعدی این مقدار بروز رسانی می‌شود). $f(h|x_{leak})$ تابع چگالی احتمال فشار بر اساس محل نشت است.

¹ Likelihood Function

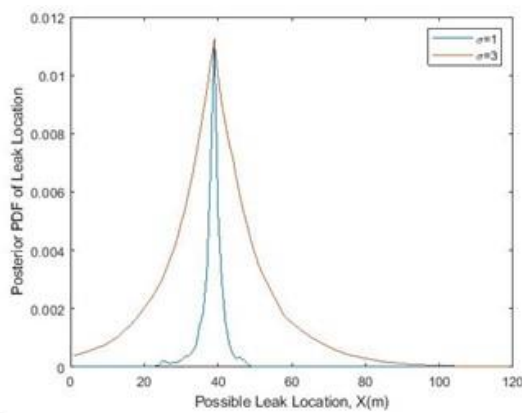
² Prior Distribution

³ Leak Strength

شکل ۶. چگالی احتمال محل نشت با فرض $\sigma_x^2 = 3$ Fig. 6. Probability density of leak location assuming $\sigma_x^2 = 3$ 

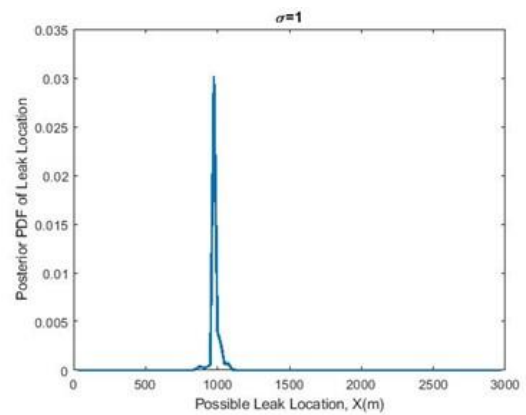
شکل ۴. مقایسه نتایج این تحقیق و مقاله مرجع [27]

Fig. 4. Comparison of the results of this study and the reference article [27]



شکل ۷. میانگین نتایج ۱۰۰ آنالیز مستقل

Fig. 7. Average results of 100 independent analyses

شکل ۵. چگالی احتمال محل نشت با فرض $\sigma_x^2 = 1$ Fig. 5. Probability density of leak location assuming $\sigma_x^2 = 1$

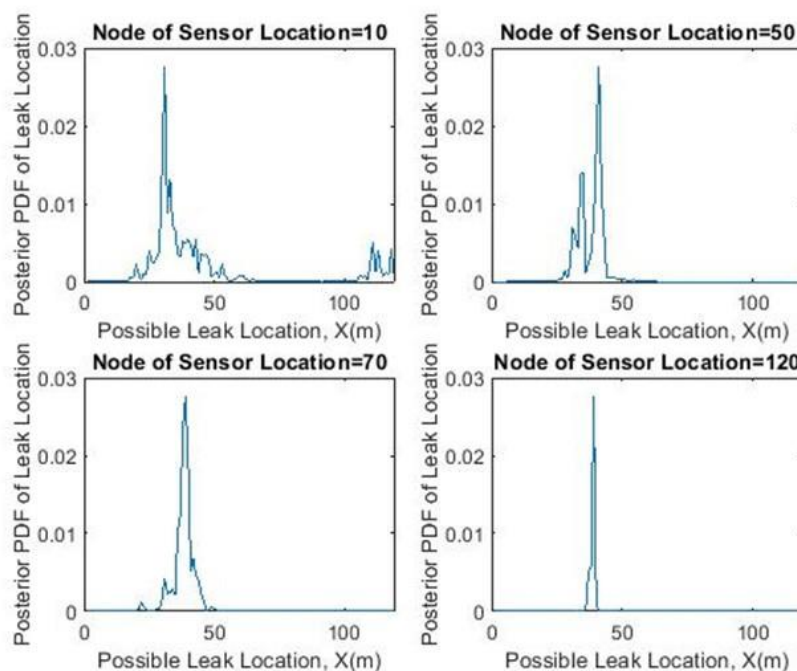
۴-۱- اثر نویز داده‌ها بر نتایج

یکی از معضلات در مساله تعیین محل نشت در شبکه‌های آبرسانی نویز موجود در داده‌های اندازه‌گیری شده است. به همین دلیل در این بخش اثر میزان نویز اندازه‌گیری بر نتایج بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی مورد مطالعه قرار گرفت. نمودارها نشان می‌دهند که با افزایش میزان نویز در داده‌ها، دقت نتایج به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. این امر نشان دهنده اهمیت کیفیت داده‌ها و کاهش نویز برای دستیابی به نتایج دقیق و قابل اعتماد در تحلیل و الگوریتم‌های مورد استفاده است. مطابق شکل (۵)، با فرض $\sigma_x^2 = 1$ ، روش پیشنهادی قادر به شناسایی محل نشت با دقت قابل قبولی است. همانطور که در این شکل می‌توان دید، روش پیشنهادی برای داده‌های با دامنه نویز کم موقعیت نشت را با عدم قطعیت پایینی تخمین می‌زند. همچنین شکل (۶) عملکرد روش بیزی در حالتی که داده‌ها نویزی‌تر باشند ($\sigma_x^2 = 3$) را نشان می‌دهد. با بررسی شکل‌ها، ملاحظه شد که افزایش میزان نویز

داده‌های اندازه‌گیری شده باعث افزایش عدم قطعیت نتایج می‌گردد. شکل (۷) نمایانگر میانگین نتایج ۱۰۰ آنالیز مستقل برای $\sigma_x^2 = 1$ و $\sigma_x^2 = 3$ است. با افزایش نویز در داده‌ها، میزان عدم قطعیت نتایج به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، که این امر نشان‌دهنده تأثیر منفی نویز بر دقت و قابلیت اطمینان الگوریتم‌های تحلیل است.

۴-۲- اثر محل سنسور

در این بخش نشت‌یابی با در نظر گرفتن موقعیت سنسور در مکان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت، شکل (۸) این نتایج را نشان می‌دهد. تحلیل داده‌ها نشان داد که نزدیکی سنسور به گره انتهایی سیستم، باعث بهبود نتایج نشت‌یابی می‌شود. این نتایج به وضوح بیانگر این است که سنسورهای نصب شده در نزدیکی گره‌های انتهایی، به دلیل حساسیت بیشتر به تغییرات فشار و جریان، توانایی بالاتری در تشخیص نشت دارند. این امر می‌تواند



شکل ۸. تاثیر محل سنسور بر دقت نشت‌یابی

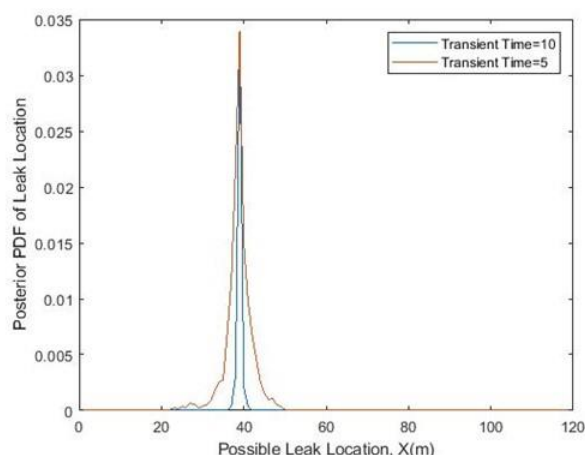
Fig. 8. The effect of sensor location on leak detection accuracy

می‌شود، افزایش بازه زمانی شبیه‌سازی از ۵ ثانیه به ۱۰ ثانیه منجر به کاهش قابل توجه در میزان عدم قطعیت نتایج شده است. این یافته بیانگر آن است که افزایش مدت زمان جمع‌آوری داده‌ها می‌تواند نقش مؤثری در بهبود دقت تشخیص نشت ایفا کند. لازم به ذکر است که در این مطالعه، گام زمانی ثابت در نظر گرفته شده و تمرکز پژوهش صرفاً بر بررسی تأثیر بازه زمانی شبیه‌سازی بوده است.

این بهبود به وضوح بیانگر این است که با افزایش زمان شبیه‌سازی، دقت و اطمینان نتایج به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. چنین یافته‌ای نشان می‌دهد که انتخاب زمان مناسب برای شبیه‌سازی می‌تواند تأثیر بسزایی در کیفیت و دقت نتایج حاصل از آن داشته باشد. بنابراین، توصیه می‌شود در تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌های آینده، زمان شبیه‌سازی به دقت تنظیم شود تا از بیشترین دقت و کمترین عدم قطعیت برخوردار شوند.

۵- جمع‌بندی

در این مقاله، استفاده از تئوری بی‌زین برای نشت‌یابی در خطوط لوله آب پیشنهاد شد. نتایج نشان داد که این روش با بهره‌گیری از مدل‌های احتمالاتی و داده‌های سنسور، قادر است با دقت بالایی محل نشت را شناسایی کند. تئوری بی‌زین با ترکیب اطلاعات



شکل ۹. تاثیر زمان شبیه‌سازی بر نتایج

Fig. 9. The effect of simulation time on the results

بهبود قابل توجهی در عملکرد سیستم‌های نشت‌یابی ایجاد کند و منجر به کاهش هدر رفت منابع و افزایش بهره‌وری شود. بنابراین، انتخاب محل مناسب برای نصب سنسورها، به ویژه در نزدیکی گره‌های انتهایی، از اهمیت بالایی برخوردار است و می‌تواند تأثیر مثبت زیادی بر دقت سیستم نشت‌یابی داشته باشد.

۳-۴- تاثیر زمان شبیه‌سازی بر نتایج

در این بخش، تأثیر مدت زمان کل شبیه‌سازی بر نتایج تحلیل مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده

قدردانی نویسندگان

نویسندگان از حمایت معنوی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی عمران تشکر می‌کنند.

تعارض منافع

هیچ تعارض منافی برای نویسندگان این مقاله در انتشار آن وجود ندارد.

سهم نویسندگان

محمد قنبری وندی ۴۰ درصد و سایرین هر کدام ۲۰ درصد.

منابع مالی

این تحقیق حمایت مالی نداشته است.

پیشین و داده‌های جدید، بهبود قابل توجهی در دقت نشت‌یابی ارائه می‌دهد. استفاده از این روش می‌تواند به کاهش هدررفت آب و هزینه‌های مرتبط با تعمیرات کمک کرده و بهره‌وری سیستم‌های توزیع آب را افزایش دهد. علاوه بر این، این روش به دلیل قابلیت تطبیق با شرایط مختلف و به‌روزرسانی مداوم مدل‌ها، به ابزاری قدرتمند برای مدیریت و نگهداری شبکه‌های آبرسانی تبدیل می‌شود. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که تئوری بیزین می‌تواند نقش مهمی در بهبود کارایی و کاهش هزینه‌های نگهداری سیستم‌های توزیع آب ایفا کند. در نهایت، پیشنهاد می‌شود که تحقیقات بیشتری در زمینه بهینه‌سازی پارامترهای مدل بیزین، ترکیب اطلاعات سنسورها، موقعیت بهینه سنسور برای افزایش دقت نشتیابی و کاربردهای عملی آن در مقیاس‌های بزرگتر انجام شود تا بتوان از تمامی ظرفیت‌های این روش بهره‌برداری کرد.

References

- [1] Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y., 2016. Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2(2), p.e1500323.
- [2] Roser, M., Ritchie, H. and Ortiz-Ospina, E., 2013. *World population growth*. Our World in Data. Available at: <https://ourworldindata.org/world-population-growth>.
- [3] Cohen, B., 2004. Urban growth in developing countries: a review of current trends and a caution regarding existing forecasts. *World Development*, 32(1), pp.23–51.
- [4] Leflaive, X., 2012. Water outlook to 2050: The OECD calls for early and strategic action. *Global Water Forum*. Available at: <https://globalwaterforum.org/2012/05/21/wateroutlook-to-2050-the-oecd-calls-for-early-and-strategic-action>.
- [5] Puust, R., Kapelan, Z., Savić, D. and Koppel, T., 2010. A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*, 7(1), pp.25–45.
- [6] Hyun, S.Y., Jo, Y.S., Oh, H.C., Kim, S.Y. and Kim, Y.S., 2007. The laboratory scaled-down model of a ground-penetrating radar for leak detection of water pipes. *Measurement Science and Technology*, 18(9), p.2791.
- [7] Xu, C., Du, S., Gong, P., Li, Z. and Song, G., 2020. An Improved Method for Pipeline Leakage Localization with a Single Sensor Based on Modal Acoustic Emission and Empirical Mode Decomposition with Hilbert Transform. *IEEE Sensors Journal*, 20(10), pp.5480–5491.
- [8] Ibrahim, K., Tariq, S., Bakhtawar, B. and Zayed, T., 2021. Application of fiber optics in water distribution networks for leak detection and localization: A mixed methodology-based review. *H2Open Journal*, 4(1), pp.244–261.
- [9] Zhiwang, Z., Qiang, W., Xiaohong, G.U., Ya, Z. and Kai, Z., 2020. Analysis on underground water pipes multi-point leakage location method based on distributed optical fiber. *Journal of Applied Optics*, 41(3), pp.228–234.
- [10] Wu, D., Liu, Z., Wang, X. and Su, L., 2017. Composite magnetic flux leakage detection method for pipelines using alternating magnetic field excitation. *NDT & E International*, 91, pp.148–155.
- [11] Ge, C., Wang, G. and Hao, Y., 2008. Analysis of the smallest detectable leakage flow rate of negative pressure wave-based leak detection systems for liquid pipelines. *Computers & Chemical Engineering*, 32(8), pp.1669–1680.
- [12] Li, J., Zheng, Q., Qian, Z. and Yang, X., 2019. A novel location algorithm for pipeline leakage based on the attenuation of negative pressure wave. *Process Safety and Environmental Protection*, 123, pp.309–316.
- [13] Abdulshaheed, A., Mustapha, F. and Ghavamian, A., 2017. A pressure-based method for monitoring leaks in a pipe distribution system: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, pp.902–911.
- [14] Liou, J.C., 1996. Leak detection by mass balance effective for Norman wells line. *Oil & Gas Journal*, 94(22), p.220623.
- [15] Xu, X. and Karney, B., 2017. An Overview of Transient Fault Detection Techniques. In: C. Verde and L. Torres, eds. *Modeling and Monitoring of*

- Pipelines and Networks: Advanced Tools for Automatic Monitoring and Supervision of Pipelines.* Berlin: Springer, pp.13–37.
- [16] Duan, H.F., Pan, B., Wang, M., Chen, L., Zheng, F. and Zhang, Y., 2020. State-of-the-art review on the transient flow modeling and utilization for urban water supply system (UWSS) management. *Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua*, 69(8), pp.858–893.
- [17] Chen, Q., Xing, X., Jin, C., Zuo, L., Wu, J. and Wang, W., 2020. A novel method for transient leakage flow rate calculation of gas transmission pipelines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 77, p.103261.
- [18] Liu, E., Kuang, J., Peng, S. and Liu, Y., 2019. Transient operation optimization technology of gas transmission pipeline: A case study of west-east gas transmission pipeline. *IEEE Access*, 7, pp.112131–112141.
- [19] Wang, Z., He, X., Shen, H., Fan, S. and Zeng, Y., 2022. Multi-source information fusion to identify water supply pipe leakage based on SVM and VMD. *Information Processing & Management*, 59(1), p.102819.
- [20] Zadkarami, M., Shahbazian, M. and Salahshoor, K., 2016. Pipeline leakage detection and isolation: An integrated approach of statistical and wavelet feature extraction with multi-layer perceptron neural network (MLPNN). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 43, pp.479–487.
- [21] Cruz, R.P.D., Silva, F.V.d. and Fileti, A.M.F., 2020. Machine learning and acoustic method applied to leak detection and location in low-pressure gas pipelines. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22(3), pp.627–638.
- [22] Geiger, G., Werner, T. and Matko, D., 2001. Knowledge-Based Leak Monitoring for Pipelines. *IFAC Proceedings Volumes*, 34(14), pp.249–254.
- [23] Soldevila, A., Blesa, J., Tornil-Sin, S., Duviella, E., Fernandez-Canti, R.M. and Puig, V., 2016. Leak localization in water distribution networks using a mixed model-based/data-driven approach. *Control Engineering Practice*, 55, pp.162–173.
- [24] Wang, J., Wang, T. and Wang, J., 2013. Hybrid modelling for leak detection of long-distance gas transport pipeline. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 55(7), pp.372–381.
- [25] Poulakis, Z., Valougeorgis, D. and Papadimitriou, C., 2003. Leakage detection in water pipe networks using a Bayesian probabilistic framework. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 18(4), pp.315–327.
- [26] Zhang, H. and Wang, L., 2011. Leak detection in water distribution systems using Bayesian theory and Fisher's law. *Transactions of Tianjin University*, 17(3), pp.181–186.
- [27] Qi, S., Gao, J., Wu, W., Qiao, Y., Tu, M. and Wang, J., 2014. Research on an optimized leakage locating model in water distribution system. *Procedia Engineering*, 89, pp.1569–1576.
- [28] Alawadhi, A. and Tartakovsky, D., 2020. Bayesian Update and Method of Distributions: Application to Leak Detection in Transmission Mains. *Water Resources Research*, 56(7), p.e2019WR025879.
- [29] Chaudhry, M.H., 2013. *Applied hydraulic transients*. 3rd ed. New York: Springer.
- [30] Wikle, C.K. and Berliner, L.M., 2007. A Bayesian tutorial for data assimilation. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 230(1-2), pp.1–16.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Ghanbari Vandī, M., Rahmani Firoozjaee, A., Keramat, A. and Zayeri Baghlani Nejad, A., 2026. Using Bayesian theory for leak detection in water network systems. *Modares Civil Engineering journal*, 26(3), pp.59-68.

