

مقاله مروری

مروری بر انواع مدل‌های برآورد نشت‌زمینه در شبکه‌های توزیع آب

بیبا حیدری^۱، محمدرضا جلیلی قاضی زاده^{۲*}، ایمان مصلحی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه شهید بهشتی، (bi_heidari@sbu.ac.ir)

۲- دانشیار، دانشگاه شهید بهشتی، (m_jalili@sbu.ac.ir)

۳- دانش آموخته دکتر، دانشگاه شهید بهشتی، (immoslehi@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۹

چکیده

نشت‌ها در شبکه‌های توزیع آب با توجه به اتلاف قابل توجه آب و انرژی، با اهمیت و پر هزینه هستند. انواع نشت به سه جزء گزارش شده، گزارش نشده و نشت‌زمینه طبقه‌بندی می‌شوند. نشت‌زمینه حاصل نشت از شکاف‌های بسیار ریز است که با روش‌های معمول نشت‌یابی یا بازرسی بصری قابل تشخیص نیستند و چون به مدت طولانی بدون شناسایی باقی می‌مانند منجر به تلفات آب قابل توجهی می‌شوند. هدف این پژوهش، بررسی جامع مدل‌های پیش‌بینی نرخ نشت‌زمینه در ارتباط با فشار و زمان در شبکه‌های آبرسانی است. بر اساس مرور بیش از ۵۰ مقاله مرتبط، نتایج نشان داد که بیش از ۵۰ درصد مطالعات بر مدیریت فشار به عنوان مؤثرترین راهکار کاهش نشت‌زمینه تمرکز داشته‌اند، در حالی که کمتر از ۳۰ درصد مقالات به نشت‌زمینه و نرخ افزایش آن با زمان پرداخته‌اند. علی‌رغم اهمیت این موضوع، عموماً بخاطر دشوار بودن تخمین نرخ نشت‌زمینه و عدم وجود داده‌های کافی، در مدل‌سازی‌ها کمتر به نرخ رشد نشت با زمان توجه

شده‌است. بنابراین، در این مطالعه علاوه بر مرور مدل‌های مبتنی بر فشار، مدل‌هایی که تأثیر زمان را نیز در نظر گرفته‌اند بررسی شده و در نهایت، چگونگی به‌کارگیری این مدل‌ها در تحلیل شبکه‌های آبرسانی بررسی شده‌است.

واژه‌های کلیدی فارسی: نشست‌زمینه، رابطه فشار- نشست، رابطه نشست- زمان، مدل‌سازی نشست،

مدیریت نشست

A Review of Various Models for Estimating Background Leakage in Water Distribution Networks

Bita Heidari¹, Mohamad Reza Jalili Ghazizadeh^{2*}, Iman Moslehi³

1- Ph. D Student, email (bi_heidari@sbu.ac.ir)

2- Associate Professor, email (m_jalili@sbu.ac.ir)

3- Ph. D, email (immoslehi@gmail.com)

Received: 20/01/2025

Revised: 16/11/2025

Accepted: 10/12/2025

Abstract:

Leakage in water distribution networks is a major concern due to the considerable losses of water and energy it entails. Leakage is typically divided into three categories: reported, unreported, and background leakage. Background leakage originates from very fine cracks that cannot be detected through conventional leak detection or visual inspection. Because these leaks often remain undetected for extended periods, they can cause significant cumulative water losses. This study aims to provide a comprehensive review of background leakage rate models with respect to pressure and time in water distribution systems. A review of over 50 relevant studies revealed that more than half focused on pressure management as the most effective strategy to reduce background leakage,

whereas less than one-third investigated the time-dependent growth of leakage rates. Despite its importance, temporal variation in background leakage has received limited attention in modeling studies, mainly due to challenges in estimating leakage growth rates and the scarcity of reliable data. Accordingly, this research reviews both pressure-based and time-dependent leakage models and discusses how these models can be applied to the analysis and management of water distribution networks.

keywords: Background leakage, pressure-leakage, time-dependent leakage, leakage modelling, leakage management

پذیرفته شده / ویرایش نشده

۱- مقدمه

افزایش جهانی جمعیت و بهبود استانداردهای زندگی به طور قابل ملاحظه‌ای تقاضای آب را در سال‌های اخیر تشدید کرده‌است و بطور همزمان، تغییرات آب و هوایی، کمبود آب را به یک چالش جهانی مبدل کرده‌است. با این وجود تمام آب تولید شده به مصرف کنندگان نهایی نمی‌رسد و بخش قابل توجهی از این آب از هدر می‌رود. این آب هدر رفته به عنوان آب بدون درآمد (NRW) نامیده می‌شود (Wu et al., 2011). بخشی از حجم آب بدون درآمد را نشت تشکیل می‌دهد که می‌توان آن را به دو جزء اصلی تقسیم‌بندی کرد: نشت ناشی از شکستگی‌ها، که بیشتر به عنوان نشت گزارش شده و گزارش نشده طبقه‌بندی می‌شود و نشت‌زمینه. مقدار کل نشت ناشی از این شکستگی‌ها تحت تأثیر سرعتی است که محل شکستگی شناسایی و متعاقباً تعمیر می‌شود. بنابراین کنترل این مدت یا کنترل زمان اجرای تعمیر شکستگی، نشت را به حداقل می‌رساند. نشت‌زمینه، در واقع تجمع نشت‌هایی حاصل از اتصالات و شکاف‌هایی است که به صورت جداگانه و بسیار کوچک هستند که با بازرسی بصری یا صوتی با فناوری موجود نشت‌یابی قابل تشخیص نیستند. بر اساس مطالعات داده‌محور بر شکست و نشت شبکه‌های توزیع آب، عواملی نظیر شرایط و نوسانات فشار، نحوه‌ی مدیریت فشار، و نواحی اندازه‌گیری شده (DMA) می‌توانند به صورت غیرمستقیم بر تخمین مؤلفه‌های نشت به‌ویژه نشت زمینه تأثیرگذار باشند. این موضوع در پژوهش‌های بعدی نیز به‌عنوان یکی از پیش‌نیازهای اساسی برای پایش دقیق و تحلیل رشد زمانی نشت مورد توجه قرار گرفته‌است.

در حال حاضر، نشت‌ها در شبکه‌های آبرسانی تقریباً در همه جا و شاید به تعداد بیشتر از آنچه واقعاً تصور می‌شود وجود دارد. نشت از مقدار بسیار کم حدود ۳-۷٪ آب تصفیه شده ورودی، در سیستم‌های آبرسانی که به خوبی نگهداری می‌شود، تا مقدار زیاد حدود ۵۰٪ در سیستم‌های آبرسانی که از نظر تعمیر و نگهداری در شرایط ضعیف‌تری می‌باشند مشاهده می‌گردد (Puust, Kapelan, Savic, & Koppel, 2010). نشت‌ها به دلایل مختلفی مانند هدر رفت آب و مواد شیمیایی موردنیاز تصفیه، کاهش کیفیت آب، افزایش نیاز آبی، و افزایش مصرف انرژی مورد نیاز برای تغذیه نشت‌ها، مهم و پرهزینه هستند.

این مقاله مروری جامع بر مدل‌های پیش‌بینی نرخ رشد نشت‌زمینه در ارتباط با فشار و زمان در شبکه‌های آبرسانی است. با توجه به وابستگی مستقیم نشت‌زمینه به فشار، در بسیاری از مطالعات، نشت بصورت تابعی از فشار و در قالب مدل‌های تجربی و تئوری تحلیل شده‌است. برآورد میزان نشت‌زمینه جهت تعیین نشت اقتصادی بلند مدت علاوه بر فشار، تحت تاثیر پارامتر زمان نیز می‌باشد که کمتر مورد توجه محققان قرار گرفته‌است. علی‌رغم اهمیت این موضوع عموماً بخاطر

دشوار بودن تخمین نرخ نشست‌زمینه و عدم وجود داده‌های کافی، در مدل‌سازی‌ها کمتر به نرخ رشد نشست با زمان توجه شده‌است. بنابراین، در این مطالعه علاوه بر مرور مدل‌های مبتنی بر فشار، مدل‌هایی که تأثیر زمان را نیز در نظر گرفته‌اند بررسی شده و در نهایت، چگونگی ترکیب و به‌کارگیری این مدل‌ها در تحلیل شبکه‌های آبرسانی مورد مطالعه قرار گرفته‌است.

۲- مدل‌های نشست‌زمینه

نشست‌زمینه ناشی از نشست‌هایی است که با روش‌های معمول نشست‌یابی قابل شناسایی نیستند. بخاطر جریان کم، این نوع نشست‌ها در طول زمان بدون شناسایی باقی می‌مانند و منجر به هدر رفت مقدار زیاد آب در شبکه می‌شوند. نشست‌های قابل تشخیص که عموماً با شکستگی در لوله‌ها همراه است، نیز منجر به از دست رفتن آب می‌شود. با این حال، نشست‌های قابل تشخیص معمولاً با جداسازی و تعمیر لوله آسیب‌دیده، در زمان کوتاهی شناسایی و برطرف می‌شوند. بنابراین، اگرچه ممکن است آنها بخاطر جریان بالا شناسایی و در نتیجه همراه با هدر رفت مقدار زیادی آب به نظر برسند، اما چون در مدت زمان کوتاهی شناسایی و تعمیر می‌شوند آب هدر رفته نسبتاً کم می‌باشد (A. O. Lambert, 2002). با توجه به نقش تعیین‌کننده نشست‌زمینه در افزایش تلفات واقعی آب و تأثیر آن بر کارایی هیدرولیکی شبکه‌های توزیع، مطالعات متعددی به شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر این پدیده اختصاص یافته‌اند. در میان متغیرهای مؤثر، فشار هیدرولیکی و زمان از جمله عوامل کلیدی هستند که رفتار و نرخ نشست‌زمینه را به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار می‌دهند. بر این اساس، در بخش‌های پیش‌رو ابتدا تحقیقات مرتبط با تأثیر فشار بر نشست‌زمینه مرور می‌شود و در ادامه، مطالعات مربوط به روند تغییرات نشست‌زمینه در طول زمان مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

۲-۱- مدل‌های رشد نشست‌زمینه با فشار

اولین بار از یک معادله نوع روزنه برای توصیف رابطه فشار و نشست استفاده شد (Wiggert, 1968). با استفاده از معادله توریچلی که از قانون بقای انرژی در سیالات قابل استخراج است، دبی نشست (Q_I (m³/s) از یک روزنه، به صورت معادله ۱ تعریف شد (Brater & King, 1996):

$$Q_I = C_q A \sqrt{2gh} \quad (1)$$

که در آن A مساحت روزنه (m^2)، g شتاب گرانشی (m/s^2)، h فشار برحسب متر و C_q ضریب جریان بدون بعد می‌باشد. در معادله ۱ نشست با فشار با توان ۰/۵ رابطه دارد.

در ادامه یک معادله فشار- جریان نشت تعمیم یافته تر اتخاذ شد که امکان تعیین توان نشت متفاوت از ۰/۵ را فراهم کرد و نشت در شبکه با استفاده از معادله ۲ محاسبه گردید (Germanopoulos, 1985):

$$Q_L = C(L P_{av})^{1.18} \quad (2)$$

که در رابطه فوق، Q_L نشت زمینه و نشت گزارش نشده، C ضریب نشت و P_{av} فشار متوسط و L طول لوله می باشد. ضریب نشت در معادله فوق بصورت تجربی محاسبه و مقدار آن برابر است با 1×10^{-7} .

در مطالعه دیگر، خطی سازی معادلات مربوط به شبکه آبرسانی با هدف کمینه کردن نشت با استفاده از تئوری خطی، انجام گرفت و بصورت معادله ۳ ارائه شد (Jowitt & Xu, 1990):

$$W_{Lj} = \sum_{i=1}^{np} Q_{Li} \Delta t \quad (3)$$

که در رابطه فوق W_{Lj} مجموع کل نشت ها در بازه زمانی مشخص، Q_{Li} دبی نشت از گره j و زمان i و Δt بازه زمانی و بطور کلی جریان خروجی نشت در یک لوله بصورت معادله ۴ قابل محاسبه می باشد:

$$Q_{Li} = C_{Li} L_i h_i^{leak} \quad (4)$$

که در رابطه فوق C_{Li} ضریبی است که رابطه بین نشت به ازای طول لوله نسبت به فشار را نشان می دهد و به مشخصات سیستم مانند عمر لوله و شرایط خاک اطراف آن بستگی دارد، L_i طول لوله می باشد و h_i^{leak} متوسط فشار در لوله فوق بصورت معادله ۵ محاسبه می گردد (Jowitt & Xu, 1990):

$$h_i^{leak} = \frac{H_{i1} + H_{i2} - z_{i1} - z_{i2}}{2} \quad (5)$$

z_i ارتفاع سطح زمین در گره i و H_i فشار در گره i می باشد.

عموماً محاسبه میزان نشت زمینه در یک شبکه توزیع آب به علت نامرئی بودن آن کار دشواری است. لذا اولین بار در سال ۱۹۹۶ مفهوم تئوری تخمین تلفات ناشی از شکستگی ها و نشت های زمینه (BABE) ارائه شد و هدف آن برآورد مولفه های نشت از شبکه بر اساس مقادیر متوسط جمع بندی شده از داده های جمع آوری شده قبلی بود. در این روش، نشت زمینه خطوط اصلی از معادله ۶ محاسبه می شود (A. Lambert & Morrison, 1996):

$$Q_L = q_{leak} \times \left(\frac{P_{ave}}{50}\right)^\alpha \times L \quad (6)$$

که در رابطه فوق q_{leak} نرخ نشت از خطوط اصلی بر حسب لیتر بر کیلومتر بر ساعت و از مقادیر جدول ۱ بدست می آید، L طول خط لوله اصلی بر حسب کیلومتر، α توان فشار و P_{ave} فشار متوسط سیستم بر حسب متر می باشد (تابش، ۱۳۹۴).

جدول ۱- مقادیر پیشنهاد شده برای نرخ نشست‌زمینه در فشار استاندارد ۵۰ متر (تابش، ۱۳۹۴)

شرایط زیر ساخت خوب	شرایط زیرساخت متوسط	شرایط زیرساخت بد	واحد	مولفه‌های نشست‌زمینه
۲۰	۴۰	۶۰	لیتر بر کیلومتر بر ساعت	نشست‌زمینه در خطوط اصلی
۱/۵	۳	۴/۵	لیتر بر انشعاب بر ساعت	نشست‌زمینه در انشعاب مشترکین
۰/۵	۱	۱/۵	لیتر بر مشترک بر ساعت	نشست‌زمینه در لوله‌های درون اشتراک

استفاده از تحلیل جریان شبانه برای ارزیابی نشست از شبکه توزیع در طول ۲۴ ساعت نیازمند شناخت عوامل موثر بر تغییرات فشار در طول ۲۴ ساعت می‌باشد. لذا در عمل، مشخص شده‌است که معادله روزنه، مدل رضایت بخشی برای رفتار نشست و فشار ارائه نمی‌دهد. تحقیقات زیادی در مورد اشکال و انواع مختلف با توجه به هیدرولیک روزنه‌ها انجام شده‌است. نتایج تجربی نشان داده‌است که رابطه ریشه دوم بین جریان و فشار در معادله روزنه فقط برای جریان آشفته معتبر است (برای یک روزنه با عدد رینولدز بیشتر از ۴۰۰۰) و برای جریان آرام در روزنه‌ها (اعداد رینولدز کمتر از ۱۰)، ضریب تخلیه نیز تابعی از فشار می‌شود که منجر به رابطه خطی بین جریان و فشار می‌گردد (Idelchik, 1994). در سال ۱۹۹۴ پیشنهاد شد که نشست در مواد منعطف دارای توان نشست ۱/۵ می‌باشد و با ترکیب آن در معادله روزنه، یک معادله نشست جدید به صورت معادله ۷ ارائه گردید (May, 1994):

$$Q_l = k_1 h^{0.5} + k_1 h^{1.5} \quad (7)$$

مقاله (May, 1994)، بسیار تأثیرگذار شد زیرا طیف گسترده‌ای از روابط جریان/ فشار نشست اندازه‌گیری شده در بریتانیا و در سطح بین‌المللی را توضیح داد که منجر به توسعه مفهومی به نام دبی‌های منافذ ثابت و متغیر (FAVAD) بصورت معادله ۸ شد (A. O. Lambert, 2002).

$$Q = C H^\alpha \quad (8)$$

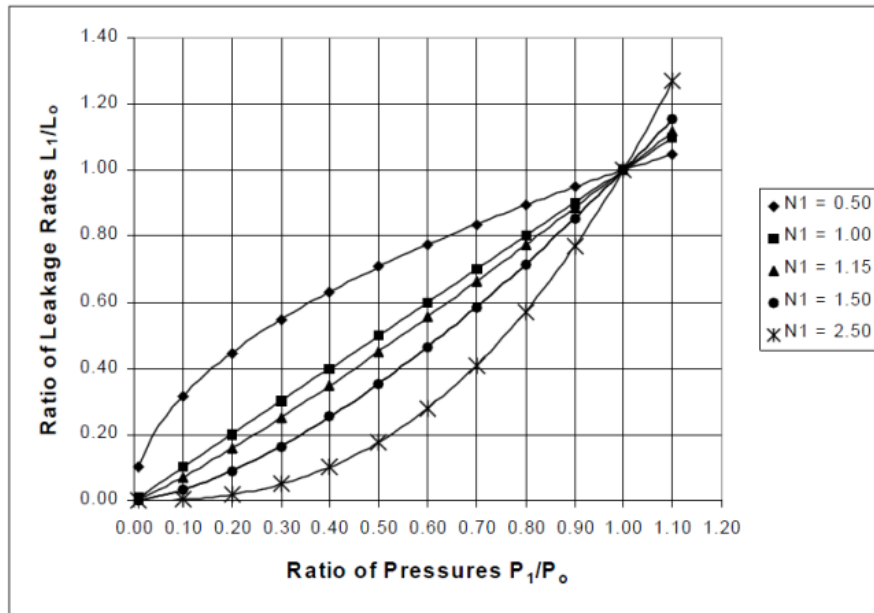
در معادله فوق، Q دبی نشست به ازای واحد طول لوله، H فشار در لوله می‌باشد و C بر اساس ضریب تخلیه، C_d و عرض شکاف، b، با استفاده از معادله ۹ محاسبه می‌گردد:

$$C = C_d b (2g)^\alpha \quad (9)$$

لذا افزایش یا کاهش هدررفت واقعی آب در شبکه آبرسانی ناشی از تغییرات فشار را می‌توان با استفاده از نسبت بین نشست اندازه‌گیری شده در دو فشار مختلف به شکل معادله ۱۰ بیان کرد (A. O. Lambert, 2002):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^\alpha \quad (10)$$

که در آن Q_1 و Q_2 دبی نشت و H_1 و H_2 هد فشار می‌باشند. از نظر ریاضی، معادله توان نشت یک شکل تعمیم‌یافته از معادله روزنه است که اجازه می‌دهد α متفاوت از 0.5 باشد. در مدیریت نشت، معادله (۱۰) معادله توان نشت نامیده می‌شود و α با نماد $N1$ جایگزین می‌شود که این رابطه در نمودار شکل ۱ نشان داده شده است (Lambert 2002).



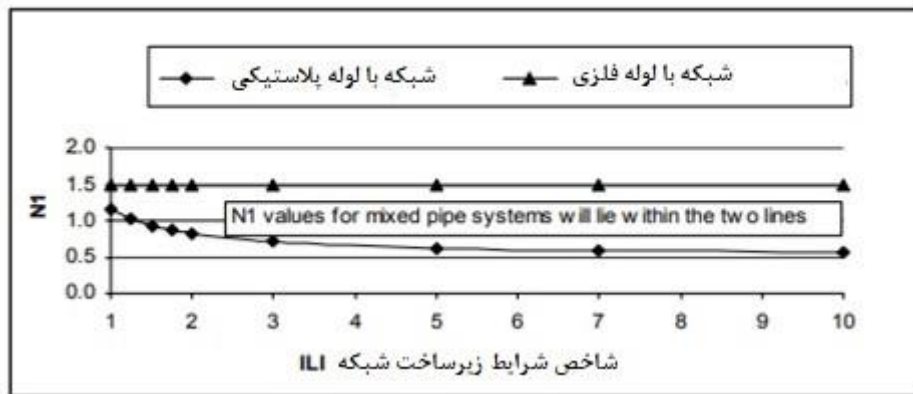
شکل ۱: رابطه بین فشار و نشت با توجه به توان نشت ($N1$) (Lambert 2002)

یکی از رایج‌ترین شاخص نشت مورد استفاده، شاخص نشت زیرساخت (ILI) است (Farley & Trow, 2003). یکی از مزایای محاسبه شاخص نشت زیرساخت ILI این است که می‌توان از آن برای محاسبه توان نشت استفاده کرد (شکل ۲)، که در معادله ۱۱ این شاخص قابل محاسبه است:

$$N1 = 1.5 - \left(1 - \frac{0.65}{ILI}\right) \frac{p}{100} \quad (11)$$

که در اینجا p درصد سختی لوله (صلبیت لوله‌ها) در شبکه است. با استفاده از رابطه فوق پارامتر $N1$ یا توان نشت را می‌توان برای شبکه‌های مختلف در مناطق و کشورهای مختلف محاسبه کرد.

مطالعات تجربی با انواع مختلف نشت مانند منافذ گرد و ترک‌های طولی و انواع مختلف مواد مانند فولاد، آذیست سیمان و PVC با مطالعات آزمایشگاهی روی انواع لوله‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که برای سوراخ‌های گرد، مقدار اندازه‌گیری شده توان نشت حدود 0.5 به این معنی که می‌توان فرض کرد که سوراخ‌های گرد به معادله روزنه پایبند هستند. با این حال، توان نشت می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای برای ترک‌ها به‌ویژه برای PVC، حتی بیشتر از 2 باشد. برای نشت‌زمینه، توان فشار $1/5$ پیشنهاد شده است (شکل ۲).



شکل ۲: توان نشت (N1) بر اساس شاخص شرایط زیرساخت شبکه (ILI) (Lambert 2002)

مساحت منافذ نشت اغلب ثابت نیستند و با فشار سیال به دلیل تغییرات حاصل در تنش‌های دیواره لوله داخلی تغییر می‌کنند. این تغییرات ممکن است منجر به چهار نوع تغییر شکل شود: الاستیک، ویسکوالاستیک، پلاستیک و شکست. در همین راستا مدل‌سازی المان محدود، تحت فرضیه رفتار الاستیک خطی، برای تجزیه و تحلیل رفتار لوله‌های آب با مواد مختلف و انواع منافذ نشت (سوراخ‌های گرد و ترک‌های طولی، محیطی و مارپیچی) در شرایط مختلف فشار استفاده شد. مشخص شد که مساحت منافذ نشت با فشار به صورت خطی افزایش می‌یابد که مستقل از ابعاد لوله، مواد و شرایط بارگذاری می‌باشد (Ssozi, Reddy, & van Zyl, 2016)، (Jakobus E. van Zyl & Cassa, 2014).

رابطه فشار و نشت به دلیل تغییر شکل پیچیده در لوله در تغییرات پلاستیکی احتمالاً منجر به هیستریزیس می‌شود که سطوح منافذ نشت نه تنها به فشار، بلکه به زمان و نرخ تغییرات فشار وارده نیز بستگی دارد. اما با توجه به اینکه تغییرات پلاستیک در لوله‌ها، فرآیندهای برگشت ناپذیر می‌باشند. لذا فقط می‌توانند مدت زمان محدودی ادامه داشته باشند و این تغییرات تنها زمانی که فشار در لوله و در نتیجه تنش‌های دیواره افزایش یابد، رخ می‌دهد بنابراین تغییرات خطی سطوح نشت با فشار را نمی‌توان بر مبنای تغییر شکل و شکست پلاستیک فرض کرد و برای درک بهتر این فرآیندها در لوله‌ها به مطالعات بیشتری نیاز است (Ssozi et al., 2016). این به این معنی است که تغییر شکل مساحت منافذ نشت، A را می‌توان تغییر شکل الاستیک در نظر گرفت و آن را به صورت معادله ۱۲، مجموعه‌ای از منافذ ثابت و متغیر با توجه به فشار توصیف کرد:

$$A = A_0 + mh \quad (12)$$

که در آن A_0 مساحت اولیه منافذ نشت در هد فشاری صفر می‌باشد بر حسب متر مربع (m^2)، m شیب نمودار فشار-مساحت و بر حسب (m^2/m) می‌باشد و h هد فشار می‌باشد بر حسب متر (m). با جایگزینی معادله ۱۲ در معادله روزه،

یک رابطه جدید (معادله ۱۳) بین نشت و فشار می توان یافت که بصورت معادله روزنه اصلاح شده تعریف شد (J. E. van Zyl, Lambert, & Collins, 2017).

$$Q_l = C_q \sqrt{2gh} (A_0 h^{0.5} + mh^{1.5}) \quad (13)$$

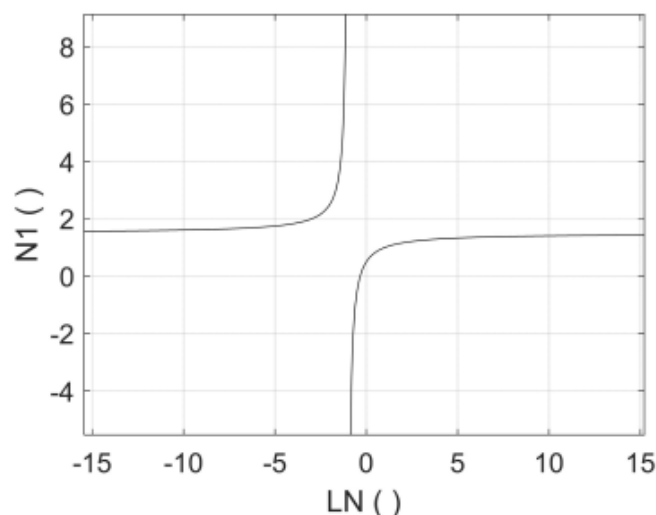
که در آن Q_l دبی نشت، h هد فشار، g شتاب ناشی از گرانش، C_q ضریب جریان است - معمولاً برابر با ۰/۶۵، A_0 مساحت منافذ اولیه در فشار صفر می باشد و m شیب نمودار فشار-مساحت است.

اولین عبارت معادله ۱۳ همان معادله روزنه است و دبی نشت را از طریق منافذ اولیه ثابت توصیف می کند. عبارت دوم در معادله، دبی نشت را از طریق منافذ منبسط شده توصیف می کند. در حالی که این معادله از نظر شکل با معادله ارائه شده توسط می (۱۹۹۴) یکسان است، اما یک تفاوت تفسیری مهم وجود دارد؛ در معادله ۱۳، سطوح منافذ نشت ثابت یا متغیر در نظر گرفته نمی شوند، بلکه در محاسبه همه منافذ نشت متغیر در نظر گرفته می شوند. به عبارت دیگر، تمام نشتها با افزایش فشار از نظر مساحت افزایش خواهند یافت. برای نشتهایی با شیب نمودار کم به احتمال زیاد، اولین ترم معادله ۱۳ غالب است، که منجر به نشت موثر با توان ۰/۵ می شود. برعکس، برای نشتهای انعطاف پذیر با شیبهای فشاری بالا، عبارت دوم معادله غالب خواهد بود، که در نتیجه توانهای نشت ۱/۵ است. از معادله ۱۳ بدیهی است که تحت شرایط الاستیک، پاسخ مطمئن فشاری یک نشت را می توان با دانستن ناحیه اولیه A_0 و شیب فشار m به طور کامل مشخص کرد. در یک مطالعه سعی شد با بررسی رابطه بین FAVAD و معادلات توان، راهی برای تبدیل توان نشت N_1 و ضرایب m و A_0 ایجاد گردد. مشخص شد که معادله توان نشت معمولی، توصیف رضایت بخشی از نشتهای الاستیک ارائه نمی کند، و لذا یک توصیف سازگارتر بر اساس یک عدد نشت بدون بعد L_N به عنوان نسبت جریان منطقه گسترش یافته به جریان منطقه اولیه به صورت معادله ۱۴ معرفی شد (Marzola, Alvisi, & Franchini, 2021):

$$L_N = \frac{mh}{A_0} \quad (14)$$

برای یافتن معادله ۱۵، رابطه ای برای تبدیل بین N_1 و L_N که با آزمایشهای تجربی حاصل شده و با استفاده از تجزیه و تحلیل اجزای محدود نیز تأیید شده است، در شکل ۳ نشان داده شده است (Marzola et al., 2021):

$$L_N = \frac{N1 - 0.5}{1.5 - N1} \quad (15)$$



شکل ۳: رابطه بین عدد نشت LN و توان نشت N1 (Marzola et al. 2021)

علاوه بر بالانسینگ آب در تخمین نشت زمينه، ارزیابی و برآورد حجم نشت را با استفاده از برخی تحلیل‌های آماری می‌توان انجام داد. انتظار می‌رود که این روش دقیق‌تر باشد، اما نیاز به اندازه‌گیری مداوم و دقیق دبی در یک یا چند مکان در منطقه اندازه‌گیری ناحیه (DMA) دارد که می‌تواند در برخی موارد مشکل ساز باشد. لذا یک رویکرد ساده برای گنجاندن تخمین نشت زمينه در یک مدل هیدرولیکی ارائه شد که در این روش از تخمین‌های حداقل جریان شبانه (MNF) از نشت استفاده می‌شود. در این روش فرض این است که N_1 توان نشت معادل $1/18$ و برای همه لوله‌ها برابر است، و یک ضریب نشت مشترک (C) را برای همه لوله‌ها با به حداقل رساندن مجموع خطای مربعی بین مدل‌سازی و مشاهده MNF تعیین شد. حداقل جریان شبانه، ترکیبی از مصرف شبانه مشترکین و نشت شبانه است که در صورتی که شبکه به خوبی نگهداری شده باشد، آن را نشت زمينه می‌نامند (قاضی‌زاده و ایدی، ۲۰۱۶). به منظور محاسبه مقادیر توان N_1 و ضریب نشت C و شیب نمودار m می‌بایست آزمایش شبانه ناحیه ای انجام و حداقل جریان شبانه که عمدتاً شامل نشت در شب است، همراه با فشار متوسط (AZP) در شب قبل و بعد از کاهش فشار در یک DMA اندازه‌گیری شود (Levin, 2019). سپس از معادلات ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ برای ارزیابی ضرایب استفاده گردد:

$$N_1 = \frac{\ln\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)}{\ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)} \quad (16)$$

$$C = \frac{Q_1}{h^{N_1}} \quad (17)$$

$$m = \frac{Q_2 - Q_1 h_2^{0.5} h_1^{-0.5}}{C_q \sqrt{2g} \cdot h_2^{0.5} (h_2 - h_1)} \quad (18)$$

$$A_0 = \frac{Q_1 h_1^{-0.5}}{C_q \sqrt{2g}} - m h_1 \quad (19)$$

که در آن Q_1 و h_1 جریان نشت و هد فشار قبل از اصلاح فشار در لوله و Q_2 و h_2 جریان نشت و هد فشار پس از آن هستند (Marzola et al., 2021):

معادله ۲۰، توصیه شده توسط IWA برای تخمین نشت‌زمینه اجتناب‌ناپذیر (UBL) با زیرساخت در شرایط خوب، از جمله اصلاح فشار بر اساس فشار متوسط ناحیه (۵۰ متر آب، بعنوان فشار مرجع) می‌باشد (Morrison, Tooms, & Lambert, 2024):

$$UBL = (0.02 \times L_m + 1.25 \times N_c + 0.033 \times L_p) \times \left(\frac{AZNP}{50} \right)^{1.5} \quad (20)$$

که در این معادله L_m طول خطوط اصلی شبکه (m) و N_c تعداد مشترکین و $AZNP$ متوسط فشار شبانه ناحیه (m) می‌باشد. قانون توان ۱/۵ که به طور خاص برای نشت‌زمینه با استفاده از داده‌های بین‌المللی به دست آمده است نشان می‌دهد که چرا مدیریت فشار در مدیریت و کاهش نشت‌زمینه بسیار موثر است. UBL می‌تواند به عنوان بخشی از یک رویکرد انعطاف پذیر برای ارزیابی نشت‌زمینه واقعی (BL) با استفاده از معادله ۲۱ با کمک فاکتور شرایط زیرساخت (ICF) باشد (Morrison et al., 2024), (Özdemir, Fırat, Yılmaz, & Usluer, 2021):

$$BL = ICF \times (0.02 \times L_m + 1.25 \times N_c + 0.033 \times L_p) \times \left(\frac{AZNP}{50} \right)^{1.5} \quad (21)$$

فاکتور شرایط زیرساخت (ICF)، معمولاً بین ۱ تا ۴ قرار دارد که بستگی به وضعیت اتصالات در خطوط اصلی شبکه و مشترکین دارد. مقدار ۱ برای شرایطی که خطوط اصلی شبکه و مشترکین در شرایط خوب قرار گرفته باشد و ۴ برای وضعیتی از زیر ساخت شبکه می‌باشد که از نظر آب بندی، شبکه در شرایط نامناسب در نظر گرفته باشد (Morrison et al., 2024).

۲-۲- مدل‌های رشد نشت‌زمینه با زمان

لوله‌ها برای تحمل بارهایی که تحت شرایط بهره‌برداری عادی قرار دارند طراحی شده‌اند. با این حال، تمام نقاط روی دیواره لوله استحکام یکسانی ندارند و ممکن است نقاط ضعیف به دلیل نقص یا آسیب در ساخت وجود داشته باشد. لوله‌ها در معرض مکانیسم‌های فرسودگی مختلفی قرار می‌گیرند که در طول زمان استحکام آنها را کاهش می‌دهد. نقاط ضعیف و ناپیوستگی‌ها (مانند ترک‌های کوچک) بیشتر از بقیه دیواره لوله در معرض مکانیسم‌های زوال هستند. مکانیسم‌های اصلی زوال لوله عبارتند از خوردگی، خستگی، شستشوی خاک و آسیب‌های سازه‌ای.

در لوله‌های آب، نوسانات فشار روزانه معمولی ناشی از تغییرات تقاضا دارای دامنه نسبتاً ثابتی است. تغییرات فشار گذرا نیز باعث نوسانات فشار کوچکتر و نامنظم‌تر در سیستم‌های توزیع آب به دلیل باز و بسته شدن شیرها می‌شود. برای یک ترک تحت بارهای چرخه‌ای دامنه ثابت، رفتار نرخ رشد تابعی از ضریب شدت تنش است. برای اولین بار، رشد ترک به عنوان تابعی از ضریب شدت تنش K و نسبت چرخه بارگذاری به صورت معادله ۲۲، در نظر گرفته شد. ضریب شدت تنش، شدت میدان تنش در نزدیکی ترک را توصیف می‌کند. این عامل به هندسه اجزاء، طول، موقعیت و آرایش ترک، و نوع و محل بارگذاری بستگی دارد (Paris & Erdogan, 1963):

$$K = \sigma Y \sqrt{\pi \alpha} \quad (22)$$

که در این معادله α نصف طول ترک می‌باشد (m)، σ تنش و Y ، فاکتور هندسه است. فاکتور هندسه موقعیت ترک، نوع و موقعیت بارگذاری و هندسه جزء را در نظر می‌گیرد. عوامل هندسی عوامل شدت تنش بدون بعد هستند. قانون پاریس برای اولین بار به صورت معادله تجربی ۲۳، برای رشد ترک توصیف شد (Paris & Erdogan, 1963):

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (23)$$

که در آن ΔK ضریب شدت تنش چرخه‌ای ($Mpa\sqrt{m}$)، N تعداد چرخه و C و m ثابت پاریس هستند. هر دو ثابت به صورت تجربی به دست می‌آیند و به خواص جنس لوله بستگی دارند، و C به نسبت شدت تنش نیز بستگی دارد. همچنین، در مطالعه‌ای دیگر، مدل‌سازی نشت‌زمینه و نشت گزارش نشده با زمان در شبکه‌های توزیع آب با تکیه بر مطالعات قبلی و بر اساس سطح شکاف و منافذ باز غیر یکنواخت بر روی خطوط لوله که با توجه به زمان نصب اولیه لوله توزیع شده‌اند بصورت رابطه ۲۴ محاسبه شد (Alvisi & Franchini, 2009):

$$\Omega_p(\tau) = \pi d_p L_p v_p(\tau) \quad (24)$$

که در این معادله، Ω_p مساحت بازشدگی شکاف، τ سن لوله بر اساس زمان نصب لوله، v_p درصد بازشدگی شکاف‌ها، d_p و L_p به ترتیب طول و قطر لوله می‌باشد. درصد بازشدگی با افزایش عمر لوله، افزایش می‌یابد و به دو پارامتر β و τ بستگی دارد. لذا با محاسبه درصد بازشدگی و بازنویسی معادله فوق، رابطه محاسبه مساحت بازشدگی در لوله‌ها نسبت به عمر لوله بصورت معادلات ۲۵ و ۲۶ زیر بدست می‌آید (Alvisi & Franchini, 2009):

$$v_p(\tau) = v_0 e^{\beta \tau} \quad (25)$$

$$\Omega_p(\tau) = \pi d_p L_p v_0 e^{\beta \tau} \quad (26)$$

در معادله فوق v_0 درصد بازشدگی منافذ اولیه در زمان نصب لوله می‌باشد که با توان β با افزایش عمر لوله، τ افزایش می‌یابد و دبی نشت‌زمینه و نشت گزار نشده در لوله برای هر یک از گره‌های متصل به لوله بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$ql_{p1} = (H_{p1} - z_{p1})^\alpha \frac{\Omega_p(\tau)}{2} = (H_{p1} - z_{p1})^\alpha \pi d_p \frac{L_p}{2} v_0 e^{\beta\tau} \quad (27)$$

$$ql_{p2} = (H_{p2} - z_{p2})^\alpha \frac{\Omega_p(\tau)}{2} = (H_{p2} - z_{p2})^\alpha \pi d_p \frac{L_p}{2} v_0 e^{\beta\tau} \quad (28)$$

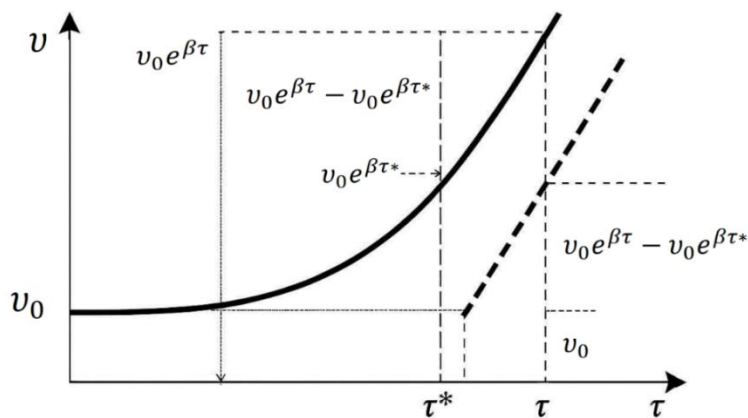
در ادامه مقدار جریان نشت‌زمینه و گزارش نشده در گره n ام در شبکه‌ای با M تا لوله که به آن گره وصل می‌باشد بصورت رابطه ۲۹ قابل محاسبه می‌باشد (Alvisi & Franchini, 2009):

$$ql_n = (H_n - z_n)^\alpha \sum_{i=1}^{M_n} \pi d_{jn} \frac{L_{jn}}{2} (v_0 e^{\beta\tau})_{jn} \quad (29)$$

معادله فوق که مدل نشت مبتنی بر فشار در شبکه است که با مدل هیدرولیکی مبتنی بر فشار ادغام شد. نکته قابل توجه اینجاست که با افزایش سن لوله درصد بازشدگی لوله افزایش می‌یابد. با تعمیر لوله مقدار سن لوله یا پارامتر τ تغییر نمی‌کند اما با تعویض لوله این مقدار صفر خواهد شد. در واقع τ عمر لوله یا زمان نصب لوله می‌باشد. ممکن است مشاهده شود که پس از بررسی تشخیص نشت، درصد سطح باز $v_p(\tau)$ به عنوان تابعی از سن واقعی لوله بصورت معادله ۳۰ به رشد خود ادامه دهد، بنابراین سریع‌تر از آنچه در صورت تعویض لوله اتفاق می‌افتد نشت مشاهده می‌گردد.

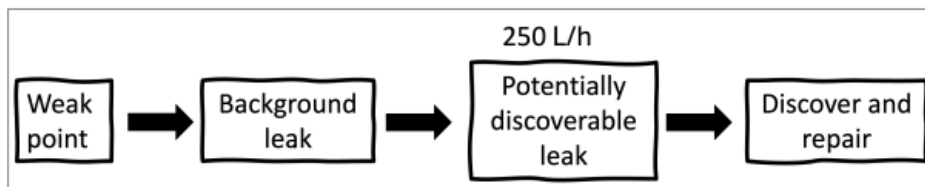
$$v(\tau) = (v_0 e^{\beta\tau} - v_0 e^{\beta\tau^*}) + v_0 = v_0 (1 + e^{\beta\tau} - e^{\beta\tau^*}) \quad (30)$$

شکل ۴ نشان می‌دهد که درصد بازشدگی لوله با سن لوله افزایش می‌یابد و چنانچه در سن τ^* لوله عملیات تعویض لوله انجام شود درصد سطح بازشدگی به مقدار اولیه آن می‌رسد یعنی به زمان نصب اولیه می‌رسد (Alvisi & Franchini, 2009):



شکل ۴: روند درصد بازشدگی منافذ روی لوله به سن لوله (Alvisi and Franchini, 2009)

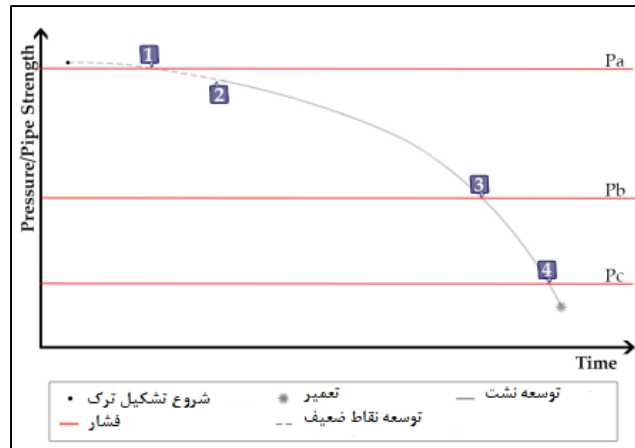
مدل‌هایی که رشد ترک‌ها را با زمان، به دلیل نوسانات فشار توصیف می‌کنند، بر طول ترک یا رشد ناحیه نشت تمرکز دارند. نرخ رشد نشت با زمان در لوله‌های آب با نوسانات فشار معمولاً با استفاده از اصول مکانیک شکست مدل می‌شود. در این زمینه، طول عمر ترک به دو مرحله تقسیم می‌شود: ۱- مرحله تشکیل ترک و ۲- مرحله انتشار. تشکیل ترک به شروع ترک و رشد میکرو ترک تقسیم می‌شود، در حالی که انتشار ترک به رشد ترک و شکست باقیمانده تقسیم می‌شود (Lopez Vega, 2022). شکستگی‌ها می‌توانند به صورت آنی رخ دهند، اما به طور کلی، در طی روزها، هفته‌ها یا حتی سال‌ها ایجاد می‌شوند. درک علل و ایجاد نشت در طول زمان و اینکه چگونه فشار می‌تواند در این فرآیند نقش داشته باشد، مهم است. مسیر توسعه یک نشت در شکل ۵ خلاصه شده است:



شکل ۵: مسیر توسعه نشت در لوله‌ها (Lopez et al. 2025)

در مطالعه‌ای که بر روی نرخ رشد نشت انجام گرفت مشخص شد که آنچه در طول زمان موجب افزایش نشت می‌گردد، انواع مکانیسم‌های زوال می‌باشد که به مرور زمان لوله را ضعیف می‌کند. پس از مدتی، استحکام ضعیف‌ترین نقطه روی لوله به حدی بدتر می‌شود که فشار وارده از استحکام آن بیشتر می‌شود و در نتیجه دیواره لوله شکسته و نشت شروع می‌شود. نشت‌ها زمانی کشف می‌شوند که تاثیر قابل اندازه‌گیری داشته باشند، مانند ظاهر شدن آب در بالای زمین یا افت فشار سیستم، یا از طریق تشخیص نشت فعال (ALC) شناسایی شوند. تعیین‌کننده اصلی قابلیت کشف، نرخ جریان نشت است. نشت‌های کوچک خود را نشان نمی‌دهند و با تجهیزات نشت‌یابی معمولی قابل کشف نیستند که به آنها نشت‌زمینه می‌گویند و اطلاعات کمی در مورد شیوع و خواص آنها در شبکه‌های آب وجود دارد. هنگامی که یک نشت به جریان تقریباً ۲۵۰ لیتر در ساعت می‌رسد، به اندازه کافی بزرگ می‌شود که قابل تشخیص باشد و به آن نشت بالقوه قابل کشف (PD) می‌گویند. با این حال، بیشتر نشت‌های PD در این مرحله قابل مشاهده نیستند و تا زمانی که کشف نشوند به رشد خود ادامه خواهند داد. هنگامی که یک نشت کشف می‌شود، به آن شکستگی می‌گویند که قابل تعمیر است. فشار به عنوان بار اولیه روی دیواره‌های لوله، عاملی مؤثر در برخی مکانیسم‌های زوال و محرک اصلی نرخ جریان نشت، نقش حیاتی در فرآیند توسعه نشت ایفا می‌کند. نشت‌های لوله، از نوع روزنه‌ای هستند و بنابراین سرعت نشت با جدر فشار افزایش می‌یابد. با این حال، فشار ممکن است بر مساحت نشت نیز تأثیر بگذارد و بنابراین تأثیر بیشتری بر نرخ جریان نشت داشته باشد. در این مطالعه برای مشخص کردن رابطه بین نرخ رشد زوال با زمان و فشار از شاخص

استحکام استفاده کرده‌است. لذا این شاخص به عنوان فشاری تعریف می‌شود که در آن ضعیف‌ترین نقطه آن به یک نشت قابل کشف تبدیل می‌شود. برای نشان دادن کاربرد این مفهوم، شاخص استحکام لوله به صورت یک خط خاکستری در شکل ۶ نشان داده شده‌است (Lopez, van Zyl, & Kelly, 2025).



شکل ۶: توسعه شاخص استحکام لوله با زمان (Lopez et al. 2025)

این شاخص با گذشت زمان کاهش می‌یابد زیرا فرآیندهای مختلف زوال، استحکام دیواره لوله را تضعیف می‌کند. خط چین در نقطه ۱ نشان‌دهنده نقاط ضعیفی است که هنوز نشت ندارد. نشت زمانی قابل کشف می‌شود که شاخص استحکام آن کمتر از فشار در لوله باشد. هنگامی که شاخص استحکام بالاتر از فشار باشد، نشت آنقدر کوچک است که قابل کشف نیست و بنابراین یک نشت‌زمینه است (Lopez et al., 2025).

۳- مدل‌سازی نشت‌زمینه در تحلیل شبکه‌های توزیع آب

با توجه به بررسی رفتار نشت‌زمینه در طول زمان و وابستگی آن به فشار، گام بعدی در ارزیابی شبکه‌های توزیع آب، ادغام این روابط در مدل‌های تحلیلی شبکه است. در حالی که روابط وابسته به زمان و فشار، چگونگی تغییر نشت را در مقیاس موضعی لوله یا روزنه توصیف می‌کنند، به‌کارگیری آن‌ها در مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه، امکان ارزیابی جامع اثرات نشت بر عملکرد هیدرولیکی و بهره‌برداری شبکه را فراهم می‌سازد. در این راستا، پژوهش‌های اخیر با استفاده از روابط تجربی و نظری فشار-نشت، مدل‌های نشت را در حلگرهای هیدرولیکی در نرم‌افزارهای EPANET و WaterGEMS پیاده‌سازی کرده‌اند تا تحلیل وابسته به فشار و کالیبراسیون ضرایب نشتی به‌صورت واقع‌گرایانه‌تر انجام گیرد. از این منظر، مدل‌سازی نشت‌زمینه در سطح شبکه، پلی میان درک مفهومی رفتار نشت و کاربردهای عملی آن در بهبود عملکرد،

کالیبراسیون مدل و برآورد بهتر نشت‌زمینه در شبکه آبرسانی ایجاد می‌کند (Wang, Wang, & Nie, 2024), (Maskit & Ostfeld, 2014), (Di Nardo, Di Natale, Gisonni, & Iervolino, 2015).

برای مدل‌سازی نشت، تابع روزنه (معادله ۳۱) با دو پارامتر، ضریب آفشان C_E و توان آفشان α تعریف شد که به طور کلی اندازه و شکل یک نشت را C_E منعکس می‌کند و اغلب هنگام مدل‌سازی نشت‌های با مقیاس‌های مختلف تنظیم می‌شود. اگرچه مقدار α معمولاً ۰/۵ تنظیم می‌شود، مقادیر دیگری نیز پیشنهاد شده‌است. بعنوان مثال مقدار توان ۱/۱۸ که نشان‌دهنده ضریب «کشش» بالاتر است و چگونگی واکنش ناحیه مؤثر نشت به فشار داخلی لوله را نشان می‌دهد، ارائه شده‌است (Goodwin, 1980):

$$\frac{dQ}{dh} = \alpha C_E h^{\alpha-1} \quad (31)$$

در این معادله h فشار داخلی است و زمانی که $\alpha < 1$ ، با افزایش فشار، نرخ افزایش دبی نشت کاهش می‌یابد، در حالی که برای $\alpha = 1$ تغییر دبی نسبت به فشار خطی است (Goodwin 1980). در مطالعه دیگر برای بهینه‌سازی مقدار نشت در شبکه‌های آبرسانی، رابطه ۳۲ برای نشت در طول لوله‌ها پیشنهاد شد (Tolson & Khedr, 2014):

$$d_k^{leak} = \beta_k L_k [P_k]^\alpha \quad (32)$$

که در این معادله، d_k^{leak} جریان نشت در طول k امین لوله است و بر حسب (m^3/s) می‌باشد، α و β_k پارامترهای مدل‌سازی نشت می‌باشند و به ترتیب بر حسب $(m^2 - \alpha/sec)$ و $(-)$ ، P_k فشار لوله بر حسب متر آب و L_k طول k امین لوله بر حسب متر است. برای مدل‌سازی نشت در هر گره معادله فوق را بصورت رابطه ۳۳ بازنویسی شد:

$$q_n^{leak} = \frac{1}{2} |A_{np}| d_p^{leak} \quad (33)$$

که در این معادله، A_{np} ماتریس درهم‌نمایی می‌باشد که نشان می‌دهد کدام گره متعلق به کدام لوله است. در این مطالعه از EPANET برای تقریب معادلات بنیادی فوق استفاده شد. در محیط EPANET، نشت‌ها به صورت گره‌ای و از طریق تعریف آفشان مدل می‌شوند. معادله عمومی مدل نشت در این نرم‌افزار به شکل معادله ۳۴ بیان می‌شود (Tolson & Khedr, 2014):

$$Q_n = \gamma_n P_n^\alpha \quad (34)$$

که در معادله فوق Q_n جریان نشت در گره n ام (L/s) و γ_n ضریب آفشان $(L/s/m)$ و P_n فشار در گره n است. چنانچه نشت در چند لوله متصل به یک گره مورد نظر باشد، مجموع جریان‌های نشت، d_n^{leaks} از رابطه ۳۵ به دست می‌آید (Tolson & Khedr, 2014):

$$q_n^{leaks} = \sum_{i=1}^m 0.5 d_i^{leaks} \quad (35)$$

در مقاله دیگر جهت بهبود مدل هیدرولیکی، نشت به صورت خروجی وابسته به فشار در شبکه مدل سازی می شود و در معادله بقای جرم گرہها وارد می گردد، به گونه ای که حجم نشت هر لوله تابع فشار متوسط آن است. این وابستگی بصورت معادلات ۳۶ و با استفاده از روابط تحلیلی Germanopoulos یا مدل FAVAD که تغییر مساحت نشت با فشار را لحاظ می کند، بیان می شود (Berardi & Giustolisi, 2021):

$$\frac{V_k^{leak}}{\Delta T} = \begin{cases} L_k \beta_k P_{k,ave}^\alpha & \text{Germanopoulos} \\ L_k \left(\beta_{1,k} + \beta_{2,k} P_{k,ave}(t) \right) \sqrt{P_{k,ave}(t)} & \text{FAVAD} \quad P_{k,ave}(t) > 0 \\ 0 & P_{k,ave}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (36)$$

که در این معادله V_k^{leak} نصف نشت در طول لوله هایی است که به گرہ i متصل است. $P_{k,ave}(t)$ فشار متوسط در زمان t در شبکه می باشد. پارامتر α توان فشار و مرتبط با سختی مکانیکی جنس لوله بوده، در حالی که β پارامتر زوال و بیانگر تمایل لوله به نشت تحت تأثیر عواملی نظیر فرسودگی و شرایط بهره برداری است. این مدل با ادغام روابط غیر خطی نشت با معادلات بقای جرم و انرژی شبکه در قالب یک مدل هیدرولیکی پیشرفته می باشد که در آن نشت، مصرف و فشار به صورت همزمان و سازگار محاسبه می شوند. این رویکرد امکان ارزیابی واقع بینانه اثر اقدامات مدیریتی نظیر کنترل فشار، تفکیک DMA و بازسازی لوله ها را فراهم می کند (Berardi & Giustolisi, 2021).

در مطالعه دیگر جهت برآورد پارامترهای α و β در معادلات تحلیل شبکه که دارای انواع لوله تحت شرایط مختلف محیطی و هیدرولیکی بود و به منظور افزایش پایداری محاسبات، لوله ها بر اساس ویژگی های مشابه نشت در چند گروه طبقه بندی شد؛ به این ترتیب، برای هر گروه، یک جفت پارامتر نشت (ضریب β و توان α) تعریف شد. این روش باعث کاهش چشمگیر تعداد پارامترهای کالیبراسیون و تسهیل همگرایی مدل تحلیلی می شود. با این حال، در این مطالعه اشاره شد که گروه بندی نامناسب ممکن است منجر به افت دقت مدل و تخمین های نادرست از نرخ نشت واقعی شود. در نهایت، روشی برای تخمین همزمان توان نشت α و ضریب نشت β ارائه شد که بر اساس به حداقل رساندن مجموع خطاهای مربعی بین دبی ها و فشارهای مدل شده و مشاهده شده می باشد، ارائه شد (Maskit & Ostfeld, 2014). در مطالعات بعدی، استدلال می شود که نمی توان یک مقدار را برای α در نظر گرفت زیرا در یک محدوده بزرگ (۰/۳-۲/۸) مشاهده شده است و باید ویژگی های شبکه ای را که مطالعه می شود در نظر گرفته شود. در این مطالعه روشی برای تخمین مشترک پارامترهای نشت همزمان با ضرایب تقاضا توسعه دادند. این روش با بهره گیری از الگوریتم ژنتیک (GA)، مجموع وزنی مربعات خطا بین داده های مدل شده و اندازه گیری شده را به حداقل می رساند. در این مدل که بصورت رابطه ۳۷ ارائه شد، فرض می شود تمام لوله ها دارای مقادیر یکسان α و β هستند. الگوریتم مذکور بر روی یک شبکه کوچک شامل

سه نقطه اندازه‌گیری جریان و فشار آزمایش شد و نتایج نشان داد که هم‌تخمینی این دو پارامتر می‌تواند رفتار نشت را با دقت قابل‌قبولی بازتولید کند (Di Nardo et al., 2015).

$$D_i^k = n_{ui} \times c_d^k + c(p_i^k)^\gamma \quad (37)$$

D_i^k دبی گره i در ساعت k می‌باشد n_{ui} تعداد مشترکین که از گره i برداشت می‌کنند، c_d^k مقدار تقاضای سرانه‌ی آب در ساعت k است که میانگین روزانه‌ی آن بیانگر تقاضای روزانه‌ی سرانه‌ی آب شیرین می‌باشد و p_i^k هد فشار در گره i را نشان می‌دهد و ضریب c که به تعداد مشترکین و تمام طول لوله ای که به هر گره متصل است بستگی دارد.

با این حال، مطالعات بعدی نشان دادند که تخمین همزمان α و β می‌تواند بسیار حساس به تغییرات کوچک در داده‌های کالیبراسیون باشد، زیرا ممکن است پارامتر α دارای زیر مجموعه‌های بزرگ باشد. بنابراین، کالیبراسیون مشترک ضریب نشت و توان به دلیل تمایل مشکل کالیبراسیون به شرایط نامناسب غالباً ممکن است در عمل دشوار باشد. لذا روش تخمین پارامتر نشت و عدم قطعیت پارامترهای نشت و ارزیابی اثر آن بر نتایج مدل‌سازی مورد مطالعه قرار گرفت (Rokstad & Ugarelli, 2017).

۳- نتیجه‌گیری

مرور نظام‌مند پیشینه تحقیق نشان داد که نشت‌زمینه، با وجود سهم قابل توجه در تلفات واقعی آب، نسبت به دیگر انواع نشت یعنی نشت گزارش شده و نشت گزارش نشده کمتر مورد توجه قرار گرفته است. پایه نظری تحلیل نشت‌زمینه بر روابط اصلاح‌شده روزنه و مدل‌های مشابه استوار است. در این چارچوب، نشت با پارامترهایی چون سطح اولیه نشت، شیب رابطه فشار-مساحت و ضریب تخلیه توصیف می‌شود. برخلاف معادله توانی متداول (N1) که به شدت وابسته به داده‌های کالیبراسیون است، مدل اصلاح‌شده روزنه قادر است رفتار نشت را واقع‌بینانه‌تر و قابل‌تعمیم‌تر بیان کند. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که مساحت نشت در شرایط الاستیک اغلب رابطه‌ای خطی با فشار دارد و همین امر، استفاده از مدل‌های فیزیکی مانند FAVAD را نسبت به روابط صرفاً تجربی توجیه‌پذیرتر می‌سازد.

همچنین پژوهش‌ها نشان می‌دهد که در مقیاس شبکه، توان نشت معمولاً از میانگین توان نشت‌های منفرد بزرگ‌تر است. به بیان دیگر، با تحلیل داده‌های مدیریت فشار در سطح DMA می‌توان ویژگی‌های سامانه‌ای نشت‌ها را استنباط کرد. در این میان، نقش جنس و رفتار مکانیکی لوله‌ها بسیار مهم است؛ چراکه پدیده‌هایی مانند ویسکوالاستیسیته و تغییر شکل‌های پلاستیک در لوله‌های پلیمری می‌تواند فرضیات مدل‌های الاستیک را نقض کند. بنابراین، توسعه مدل‌هایی که این ویژگی‌های ماده و رفتار زمان‌مند نشت را در نظر بگیرند، از اولویت‌های پژوهش‌های آتی است.

در این مقاله مروری، تلاش شد با بررسی روند مدل‌سازی نشت‌زمینه در مطالعات مختلف، به ویژه در مدل‌های برآورد نشت در شبکه‌های آبرسانی، تصویر روشن‌تری از جایگاه این نوع نشت ارائه شود. نتایج بررسی‌ها نشان داد که اکثر مدل‌های موجود، وابستگی شدیدی به فشار دارند و به تاثیرات زمانی نظیر فرسودگی لوله‌ها کمتر پرداخته‌اند. همچنین، شکاف قابل توجهی بین ادبیات تحقیق و کاربردهای عملی در زمینه مدیریت نشت‌زمینه مشاهده می‌شود. مرور انجام‌شده نشان می‌دهد که گنجانیدن نشت‌زمینه در مدل‌های پیش‌بینی و بهینه‌سازی، به ویژه در شرایط فقدان داده، نیازمند توسعه مدل‌های جدید یا استفاده از رویکردهای تلفیقی و داده‌محور است.

بر این اساس، می‌توان پیشنهادهای زیر را برای مسیرهای آتی پژوهش مطرح کرد:

۱. استانداردسازی روش‌های برآورد پارامترهای کلیدی نشت‌زمینه (مانند سطح اولیه و شیب فشار-مساحت) از طریق آزمایش‌های میدانی قبل و بعد از تغییر فشار.

۲. توسعه مدل‌های FAVAD که اثرات ویسکوالاستیک و پلاستیک مواد مختلف لوله را در نظر بگیرند و در شرایط آزمایشگاهی و میدانی اعتبارسنجی شوند.

۳. پیاده‌سازی روابط اصلاح‌شده روزنه در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی شبکه مانند EPANET و بازنگری در نتایج مطالعاتی که صرفاً به معادله توانی تکیه داشته‌اند.

۴. توسعه چارچوب‌های بهینه‌سازی چندهدفه که فشار، انرژی، هزینه و سطح اقتصادی نشت را به طور هم‌زمان در نظر بگیرند.

۵. اجرای مطالعات مقایسه‌ای بر روی شبکه‌های نمونه واقعی و آزمودن مجموعه‌ای از روش‌های مختلف برای ارائه راهنمای عملی انتخاب رویکرد مناسب، متناسب با شرایط داده و محدودیت‌های هر منطقه.

در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که مسیر واقع‌بینانه برای مدیریت نشت‌زمینه، اتکا به مدل‌های فیزیکی مانند FAVAD همراه با بهره‌گیری از روش‌های کم‌داده و چارچوب‌های بهینه‌سازی اقتصادی است. چنین رویکردی نه تنها اتکای بیش از حد به ضرایب تجربی را کاهش می‌دهد، بلکه امکان کالیبراسیون تکرارپذیر و تصمیم‌گیری اقتصادی مبتنی بر ریسک را نیز برای شرکت‌های آب و فاضلاب فراهم می‌سازد.

۴- منابع و ماخذ

تابش، م. (۱۳۹۴) مدل‌سازی پیشرفته شبکه‌های توزیع آب. انتشارات دانشگاه تهران.

جلیلی قاضی زاده، م. ، ایدی ضیال‌الدین (۲۰۱۶) 'ارائه روابط تحلیلی مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب، محیط

شناسی، ۴۲ ص ۵۱۷-۵۲۹ (۳). DOI:10.22059/jes.2016.60064

- Alvisi, S., & Franchini, M. (2009). Multiobjective optimization of rehabilitation and leakage detection scheduling in water distribution systems. *Journal of water resources planning and management*, 135(6), 426–439.
- Berardi, L., & Giustolisi, O. (2021). Calibration of design models for leakage management of water distribution networks. *Water resources management*, 35(8), 2537–2551.
- Brater, E., & King, H. (1996). Analysis of flow in water distribution networks, Technomic Publishing Co., Inc. Handbook of Hydraulics. Lindell E. James. In: New York: Mc Graw Hill.
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Gisonni, C., & Iervolino, M. (2015). A genetic algorithm for demand pattern and leakage estimation in a water distribution network. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 64(1), 35–46.
- Farley, M., & Trow, S. (2003). *Losses in water distribution networks*: IWA publishing.
- Germanopoulos, G. (1985). A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models. *Civil engineering systems*, 2(3), 171–179.
- Goodwin, S. J. (1980). *The results of the experimental programme on leakage and leakage control*: Wrc Environmental Protection.
- Idelchik, I. E. (1994). *Handbook on Hydraulic Resistance*, CRC: Begell house.
- Jowitt, P. W., & Xu, C. (1990). Optimal valve control in water-distribution networks. *Journal of water resources planning and management*, 116(4), 455–472.
- Lambert, A., & Morrison, J. A. E. (1996). Recent developments in application of 'bursts and background estimates' concepts for leakage management. *Water and Environment Journal*, 10(2), 100–104.
- Lambert, A. O. (2002). International report: water losses management and techniques. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2(4), 1–20.
- Levin, S. J. (2019). An evaluation of the pressure-leakage response of selected water distribution networks in South Africa.
- Lopez, L. L., van Zyl, J. E., & Kelly, P. A. (2025). Conceptual Framework for Leak Development in Water Distribution Systems. *Journal of water resources planning and management*, 151(6), 04025011.
- Marzola, I., Alvisi, S., & Franchini, M. (2021). Analysis of MNF and FAVAD model for leakage characterization by exploiting smart-metered data: The case of the Gorino Ferrarese (FE-Italy) district. *Water*, 13(5), 643.
- Maskit, M., & Ostfeld, A. (2014). Leakage calibration of water distribution networks. *Procedia Engineering*, 89, 664–671.
- May, J. (1994). Pressure dependent leakage. *World water and environmental engineering*, 17(8), 10.
- Morrison, J., Tooms, S., & Lambert, A. (2024). *DMA management guidance notes*. IWA Water Loss Specialist Group. Retrieved from <https://globalnrw.com>

- Özdemir, Ö., Firat, M., Yılmaz, S., & Usluer, M. (2021). Analysis of the effect of pressure control on leakages in distribution systems by FAVAD equation and field applications. *Water Practice & Technology*, 16(2), 320–332.
- Paris, P., & Erdogan, F. (1963). A critical analysis of crack propagation laws. *Journal of basic engineering*, 85(4), 528–533.
- Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D. A., & Koppel, T. (2010). A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*, 7(1), 25–45.
- Rokstad, M. M., & Ugarelli, R. M. (2017). Investigation of the ability to accurately estimate background leakage parameters in WDS network simulation models. *Journal of water resources planning and management*, 143(4), 04017002.
- Ssozi, E. N., Reddy, B. D., & van Zyl, J. E. (2016). Numerical investigation of the influence of viscoelastic deformation on the pressure-leakage behavior of plastic pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(3), 04015057.
- Tolson, B. A., & Khedr, A. (2014). Battle of background leakage assessment for water networks (BBLAWN): An incremental savings approach. *Procedia Engineering*, 89, 69–77.
- van Zyl, J. E., & Cassa, A. (2014). Modeling elastically deforming leaks in water distribution pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(2), 182–189.
- van Zyl, J. E., Lambert, A. O., & Collins, R. (2017). Realistic modeling of leakage and intrusion flows through leak openings in pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(9), 04017030.
- Wang, J., Wang, H., & Nie, L. (2024). Hydraulic simulation of water supply network leakage based on EPANET. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 15(1), 05023006.
- Wiggert, D. C. (1968). Unsteady flows in lines with distributed leakage. *Journal of the hydraulics division*, 94(1), 143–162.
- Wu, Z. Y., Farley, M., Turtle, D., Kapelan, Z., Boxall, J. B., Mounce, . . . Wu, Z. (2011). Online monitoring and detection. *Chapter*, 9, 168–189.

¹ Non-Revenue Water

² Burst And Background Losses Estimate

³ Fixed and Variable Area Discharge

⁴ Infrastructure Leakage Index

⁵ District Metered Area

⁶ Minimum Night Flow

⁷ Unavoidable Background Leakage

⁸ Background Leakage

⁹ Infrastructure Condition Factor

¹ Potentially discoverable leak⁰

¹ Pressure-Driven Analysis ¹

¹ Emitter coefficients ²

¹ Incidence matrix ³

¹ Emitter ⁴