



## Water loss from urban water supply networks and the factors affecting it

Seyed Hamid Alavi

Water Engineering and Hydraulic Structure, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

\* & R U U H V S R Q G L Seyed Hamid Alavi @ Tarbiat Modares University  
© The Author(s) (2023)

Received: 17 July 2023

Accepted: 02 Sept 2023

Published: 09 Sept 2023

### Extended Abstract

#### Introduction

Water loss in urban water distribution systems is a significant issue, particularly in regions with scarce water resources. Annual water losses cause substantial damage to water resources, infrastructure, and the environment, while also imposing financial burdens on water distribution companies. Leakage, a major component of water loss, results from aging infrastructure, soil stress, traffic loads, pressure fluctuations, improper installation, and inadequate backfilling. By examining factors influencing leakage, such as pressure, pipe material, soil characteristics, and temperature, the occurrence and volume of leaks can be managed effectively. This study explores the fundamentals of water loss, its types, causes, and methods for calculating leakage, with a focus on optimizing pressure and soil conditions to minimize water loss.

#### Materials and Method

The study reviews existing research and experimental data to analyze the factors influencing leakage in water distribution systems. Key parameters such as pressure, pipe material, soil type, and temperature are evaluated to understand their impact on leakage rates. The relationship between pressure and leakage is examined using the orifice equation and the FAVAD (Fixed and Variable Area Discharge) theory. Experimental and field studies are referenced to validate the findings, particularly focusing on the variability of the leakage exponent ( $\alpha$ ) and its dependence on pipe material and crack geometry. Soil characteristics, including grain size distribution and hydraulic conductivity, are also analyzed to assess their influence on leakage.

#### Results and Discussion

The results indicate that pressure is a critical factor influencing leakage, with the leakage exponent ( $\alpha$ ) ranging from 0.5 to 2.79, often exceeding the theoretical value of 0.5. This variability is attributed to differences in pipe material, crack geometry, and soil conditions. Studies show that reducing pressure through pressure management techniques, such as pressure-reducing valves, can significantly decrease leakage rates. Temperature also plays a role, as higher temperatures reduce the viscosity of water and increase leakage rates, particularly in thermoplastic



pipes like HDPE. Pipe material significantly affects leakage behavior, with corroded steel pipes exhibiting higher leakage exponents due to reduced material integrity. Soil characteristics, particularly grain size (D50) and hydraulic conductivity, influence leakage rates, with coarser soils allowing higher leakage compared to finer soils.

### **Conclusion**

The study concludes that effective leakage management requires a comprehensive understanding of the factors influencing leakage, including pressure, pipe material, soil characteristics, and temperature. Pressure management emerges as a cost-effective strategy for reducing leakage, while selecting appropriate pipe materials and optimizing soil backfill can further minimize water loss. Future research should focus on the impact of temperature on the viscoelastic properties of pipes, the role of soluble soils in pipe degradation, and leakage behavior at pipe joints. Addressing these factors will contribute to more sustainable and efficient water distribution systems, particularly in water-scarce regions.

**Keywords:** leakage management, leakage flow, Water supply network, Pressure, Crack

Extended Abstract



## Water loss from urban water supply networks and the factors affecting it

Seyed Hamid Alavi

Water Engineering and Hydraulic Structure, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

\*Corresponding Author email: [Seyedhamidalavi@modares.ac.ir](mailto:Seyedhamidalavi@modares.ac.ir)

© The Author(s) 2024

Received: 17 July 2023

Accepted: 02 Sept 2023

Published: 09 Sept 2023

### Abstract

Water loss is a significant issue that leads to substantial damage to water resources, civil infrastructure, the environment, and water distribution companies. Urban water supply networks, particularly in regions with scarce water resources, face challenges related to water loss. Leakage from these networks constitutes a major portion of the overall water loss. Factors contributing to leakage include the aging of water supply systems, pipe damage due to soil stresses and urban traffic, fluctuations in water pressure, improper urban plumbing practices, and inadequate embankments. Examining factors such as pressure, pipe type, soil environment, and temperature can help identify the causes of leakage and effectively manage and mitigate its volume. Laboratory and field investigations have revealed that the leakage power, contrary to the pressure-leakage relationship, falls within the range of 0.5 to 2.79, with values exceeding 0.5 due to variations in pipe types, dimensions, and the type of cracks. Reducing the  $D_{50}$  (median grain size) of the soil and selecting an appropriate soil granulation around the pipes can effectively reduce the leakage flow rate. This article provides an overview of water wastage, its types, and underlying causes, followed by a discussion on the fundamentals of leakage calculation.

**Keywords:** leakage management, leakage flow, Water supply network, Pressure, Crack.



## هدررفت آب از شبکه‌های آبرسانی شهری و عوامل مؤثر بر آن

سیدحمید علوی

گروه مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

\*ایمیل نویسنده مسئول: [Seyedhamidalavi@modares.ac.ir](mailto:Seyedhamidalavi@modares.ac.ir)

© The Author(s) 2024

چاپ: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۱

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۶

### چکیده

هدررفت آب سالانه خسارات بسیاری به منابع آب، زیرساخت‌های عمرانی، محیط‌زیست و شرکت‌های توزیع آب وارد می‌کند. هدررفت آب از شبکه‌های آبرسانی شهری، به‌ویژه در مناطقی که منابع آب کمیاب هستند، یک مسئله مهم است. نشت از سامانه‌های آبرسانی شهری که بخشی از هدررفت آب را تشکیل می‌دهد، بخش عمده‌ای از آن را در بر می‌گیرد. این موضوع به دلایل بسیاری چون قدیمی شدن شبکه آبرسانی، آسیب رسیدن به لوله‌ها به دلیل تنش‌های سربار خاک و ترافیک شهری و همچنین افت و خیز فشار شبکه آبرسانی، اجرای نادرست لوله‌کشی شهری و خاکریز نامناسب است. با بررسی مؤلفه‌های تأثیرگذار در دبی نشت مثل فشار، جنس لوله، محیط خاکی پیرامون لوله و دما، می‌توان میزان رخداد نشت را کاهش داد و حجم نشتی را مدیریت کرد. با بررسی‌های آزمایشگاهی و میدانی انجام شده بر خلاف رابطه‌ی روزنه فشار-نشت، توان نشت در بازه‌ی ۰/۵ تا ۲/۷۹ قرار گرفته و بیشتر از ۰/۵ است که تفاوت در جنس لوله، تفاوت ابعاد و نوع ترک در تغییر توان در بازه‌ی گفته شده مؤثر است. با انتخاب مناسب دانه‌بندی خاک پیرامون لوله و کاهش  $D_{50}$  خاک می‌توان دبی نشت را کاهش داد. در مقاله‌ی حاضر ابتدا کلیاتی از هدررفت آب، انواع آن و دلایل آن مطرح می‌شود سپس به مبانی محاسبه‌ی نشت پرداخته می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** مدیریت نشت، دبی نشت، شبکه آبرسانی، فشار، ترک

## ۱- مقدمه

طی قرن بیستم جمعیت جهانی رشدی ناگهانی از ۴ میلیارد نفر در سال ۱۹۷۴ میلادی به ۶ میلیارد نفر در سال ۲۰۰۰ میلادی داشت. این افزایش جمعیت نشان از تأمین بودن هوای پاک، غذا، آب سالم و بهداشت مناسب بود. بشر در طول نیمه‌ی دوم قرن بیستم دریافت که منابع محدود زمین جوابگوی این رشد نیست و نمی‌توان به صورت قبل ادامه داد (Thornton et al., 2008). دسترسی به آب یکی از مؤلفه‌های مهم رشد جمعیت است و بشر نیازمند است جهت حفظ بقای خود با روش‌های مهندسی به برداشت، تصفیه و انتقال آب بپردازد. در کشورهای در حال توسعه، مشکل تأمین آب بهداشتی وجود دارد و در کشورهای توسعه‌یافته مشکل شکل دیگری نیز دارد. در این کشورها به دلیل هدررفت آب، خطر ناپایداری منابع آب در درازمدت وجود دارد. این کشورها در انتقال آب با حجم و کیفیت بالا موفق عمل کرده‌اند اما به میزان زیادی هدررفت آب دارند (Thornton et al., 2008).

سامانه‌های توزیع آب در سراسر جهان در حال زوال هستند، در حالی که تقاضا برای این سامانه‌ها و در نتیجه منابع آب طبیعی، روزبه‌روز در حال افزایش است. تلفات ناشی از سامانه‌های توزیع آب در بسیاری از شهرها در سراسر جهان به سطوح هشدار دهنده‌ای رسیده است. تلفات آب شامل مؤلفه‌های مختلفی از جمله تلفات فیزیکی (نشتی)، استفاده غیرقانونی، استفاده بدون اندازه‌گیری و ناشی از عدم ثبت کنتور آب است. نشت بخش بزرگی را از تلفات آب تشکیل می‌دهد، گاهی اوقات تا بیش از ۷۰٪ از کل تلفات آب گزارش شده است (Van Zyl & Clayton, 2007).

نشت آب در سیستم‌های توزیع آب جهانی چالش مهمی است، تخمین هدررفت بسته به مکان از ۱۰٪ تا ۵۵٪ از حجم ورودی آب به شبکه متغیر است (Ávila et al., 2021). انجمن بین‌المللی آب<sup>۱</sup> (IWA) در سال ۱۹۹۱ نشان داد که تلفات آب کشورهای توسعه‌یافته ۸-۲۴ درصد است، کشورهای تازه صنعتی شده با تلفات ۱۵-۲۴ درصد و کشورهای در حال توسعه نرخ بسیار بالاتری از ۲۵-۴۵ درصد داشته‌اند (Farley et al., 2001). هزینه‌ی سالانه آب بدون درآمد<sup>۲</sup> (NRW) برای شرکت‌های آب در سراسر جهان تقریباً ۱۴ میلیارد دلار است که یک سوم این هزینه بر کشورهای در حال توسعه تأثیر می‌گذارد. نشت در کشورهای در حال توسعه منجر به از دست دادن حدود ۴۵ میلیون مترمکعب آب در روز می‌شود که برای تأمین آب ۲۰۰ میلیون نفر کافی است (Kingdom et al., 2006). تحقیقات اخیر توسط Liemberger & Wyatt (2018) نشان می‌دهد که برآوردهای قبلی NRW محافظه‌کارانه بوده است، با برآورد NRW جهانی ۳۴۶ میلیون مترمکعب در روز یا ۱۲۶ میلیارد مترمکعب در سال، که منجر به هزینه سالانه آب از دست رفته بالغ بر ۳۹ میلیارد دلار آمریکا می‌شود حتی با قیمت محافظه‌کارانه ۰/۳۱ دلار در هر متر مکعب.

<sup>1</sup> International Water Association

<sup>2</sup> Non-Revenue Water

نشت آب از سامانه‌های آبرسانی شهری تأثیرات مخربی نیز در زیرساخت‌های شهری دارد و باعث شسته‌شدن و روان‌شدگی خاک می‌شود. در این موارد لوله‌ها آسیب‌های بیشتری می‌بینند (Mohsin & Majid, 2014) و با ایجاد فرونشست، باعث آسیب به جاده‌ها و ساختمان‌ها نیز می‌شود (Pike, 2016).

همه‌ی موارد ذکر شده نشان از اهمیت مدیریت نشت و بررسی مؤلفه‌های مؤثر بر آن می‌دهد. در ادامه کلیاتی از هدررفت آب، انواع آن و دلایل آن گفته می‌شود سپس به روش‌های متداول محاسبه‌ی نشت پرداخته می‌شود و یکی از فرمول‌های بنیادی نشت در آن توضیح داده می‌شود.

## ۲- انواع هدررفت آب

تلفات آب در یک سیستم توزیع آب شامل تلفات ظاهری<sup>۳</sup> و واقعی<sup>۴</sup> است. تلفات واقعی عمدتاً ناشی از نشت از لوله‌ها، اتصالات سرویس و سرریز در مخازن ذخیره‌سازی است، در حالی که تلفات ظاهری ناشی از مصرف غیرمجاز، عدم دقت اندازه‌گیری و خطاهای پردازش داده است (Karadirek & Aydin, 2022). انجمن بین‌المللی آب (IWA) دو نوع از هدررفت آب که تولیدکنندگان با آن مواجه هستند را شرح داده است (Thornton et al., 2008):

هدررفت حقیقی (واقعی): نشت از سامانه‌های توزیع، اتصالات، تبدیل‌ها، نشت از مخازن هوایی و زمینی، سرریز مخازن، کانال‌های روباز و شیرهای تخلیه هدررفت حقیقی نام دارد. همه‌ی سامانه‌های آب در جهان مقداری هدررفت حقیقی دارند. کارکنان نشت‌یابی معتقدند که هدررفت حقیقی را نمی‌توان به صورت کامل از بین برد؛ در شبکه‌های تازه تأسیس نیز مقدار حداقلی از هدررفت حقیقی وجود دارد ولی تجربه نشان داده است که می‌توان هدررفت حقیقی را چنان مدیریت کرد تا در یک محدوده‌ی اقتصادی مناسب قرار گیرد.

هدررفت مجازی (ظاهری): آبی است که به صورت غیرفیزیکی از دست می‌رود و درآمدی نیز ندارد. دلیل این امر می‌تواند خطای سامانه‌های اندازه‌گیری، داده‌های آماری و یا هرگونه آبدزدی و استفاده‌ی غیرقانونی از آب باشد. این بخش از هدررفت، هدررفت مجازی نام دارد.

طبق روش ارائه شده توسط انجمن بین‌المللی آب مجموع هدررفت حقیقی و مجازی به اضافه‌ی مقدار مصرف مجاز و ثبت نشده، آب به حساب نیامده نام دارد.

هدررفت حقیقی از سه بخش، که در شکل (۱) نشان داده شده است، تشکیل شده است (Thornton et al., 2008).

<sup>3</sup> Apparent  
<sup>4</sup> Real

شکل ۱. انواع هدررفت حقیقی و روش‌های مقابله (Thornton et al., 2008)

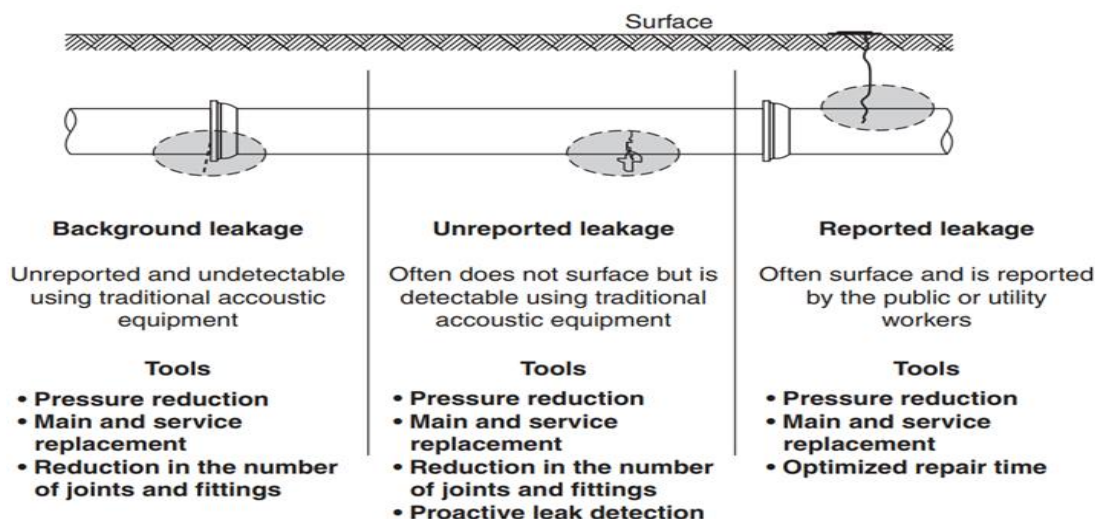


Fig 1. Types of real water loss and coping methods (Thornton et al., 2008)

الف) نشت و شکست‌های گزارش‌شده: این نوع نشت‌ها قابل رؤیت، مشکل‌ساز، با دبی زیاد بوده و زمان کمی طول می‌کشد تا مشتریان و یا پرسنل آب و فاضلاب به دلیل کاهش فشار یا قطعی، متوجه آن شوند.

ب) نشت و شکست‌های گزارش‌نشده: این نوع نشت‌ها قابل رؤیت نبوده ولی دارای دبی زیاد هستند. همچنین زمان زیادی طول می‌کشد تا مشتریان و یا پرسنل آب و فاضلاب به دلیل کاهش فشار یا قطعی، متوجه آن شوند.

ج) نشت پس‌زمینه: تراوش‌های به هم پیوسته‌ای است که در زانویی‌ها و اتصالات وجود دارند. دبی در این نوع نشت آن‌قدر پایین است که با دستگاه‌های نشت‌یاب آکوستیک معمولی قابل تشخیص نیست. این نشت آن‌قدر ادامه پیدا می‌کند تا زیاد شده و قابل شناسایی شود تنها راه کاهش آن مدیریت فشار و جایگزینی زیرساخت‌ها است.

تصور اشتباه رایج این است که شکست در شاه‌لوله‌ها، چون زود به سطح می‌رسد و منجر به اختلال در آبرسانی می‌گردد، اصلی‌ترین عامل هدررفت آب در لوله‌ها است. اغلب تصور می‌شود که حجم زیادی آب در اثر خرابی ناگهانی لوله‌ها در مدتی کوتاه از دست می‌رود ولی در اثر نشت‌ها و شکست‌های پنهان که سال‌ها ادامه می‌یابد تا تعمیر شود حجم بیشتری آب از دست می‌رود (Thornton et al., 2008).

هدررفت و نشت آب از شبکه‌های توزیع آب<sup>۵</sup> (WDN) در ایران که منابع آبی کمیاب است و کشور با بحران آب مواجه است، موضوع مهمی است. بر اساس مطالعه‌ای، میانگین سطح آب محاسبه‌نشده<sup>۶</sup> (UFW) در ایران از سال ۱۹۹۷ تا اوایل دهه ۲۰۰۰، ۴۰/۶٪ و ناشی از تلفات حقیقی و مجازی به ترتیب ۵۴ و ۴۵٪ بوده است (Boudaghpour & Sabooteh, 2020).

<sup>5</sup> Water Distribution Network

<sup>6</sup> Unaccounted for Water

در بسیاری از موارد، نشتی گزارش نشده در خطوط لوله WDN، به ویژه WDN های قدیمی، باعث نسبت بالایی از کل تلفات سالانه می‌شود. بیش از ۳۰ درصد هدررفت آب شرب از طریق سیستم‌های توزیع آب در ایران باعث نگرانی عمده شرکت‌های آب ایران شده است که در منطقه‌ای نیمه‌خشک واقع شده است (Mahdavi et al., 2011).

### ۳- دلایل هدررفت حقیقی

هدررفت آب در شبکه‌های توزیع آب به دلایل مختلفی می‌تواند رخ دهد. برخی از دلایل رایج عبارتند از نشت گزارش نشده، خرابی یا شکستگی لوله، و فشار بالا (Ribeiro et al., 2018) (Iwanek & Suchorab, 2017) (Kourbasis et al., 2020). نشت‌های گزارش نشده، به ویژه در لوله‌های پلاستیکی، قطرهای بزرگ و شرایط فشار کم، به سختی قابل یافتن هستند و می‌توانند به طور قابل توجهی در تلفات آب نقش داشته باشند (Kanakoudis & Tsitsifli, 2019). خرابی یا شکستگی لوله می‌تواند منجر به جریان آب به سطح خاک شود که منجر به از دست دادن آب قابل مشاهده می‌شود (Ociepa et al., 2018). درک و پرداختن به این دلایل هدررفت واقعی آب برای مدیریت کارآمد و پایدار منابع آب در سیستم‌های توزیع آب بسیار مهم است.

بر اساس مقاله‌ای از آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده سیستم‌های توزیع آب شبکه‌های پیچیده‌ای از لوله‌ها، پمپ‌ها و تأسیسات ذخیره‌سازی هستند که آب تمیز را به خانه‌ها و مشاغل می‌رسانند. با بالا رفتن سن این سیستم‌ها، زوال می‌تواند به دلیل خوردگی، فرسایش مواد و فشارهای خارجی رخ دهد. خراب شدن سیستم‌های توزیع آب می‌تواند منجر به شکستگی در لوله‌ها و تأسیسات ذخیره‌سازی شود (US EPA, 2015). در کتاب کنترل هدررفت آب در شبکه‌های توزیع دلایل خرابی لوله‌ها آب در شکل (۲) ارائه شده است (Thornton et al., 2008):

شکل ۲. دلایل خرابی لوله‌ها در شبکه‌های توزیع

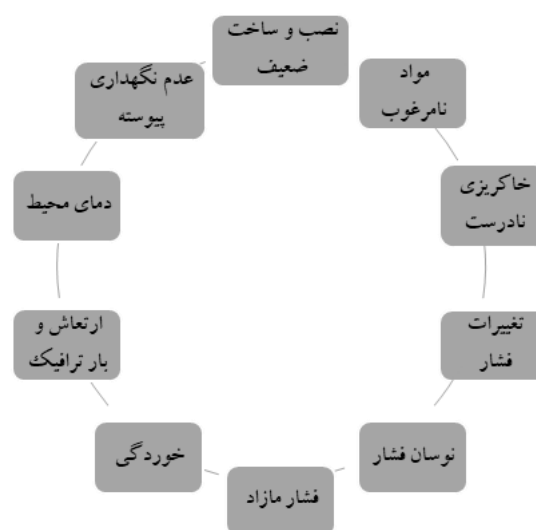


Fig 2. Reasons for pipe failure in distribution networks



در ادامه به شرح مؤلفه‌های مؤثر در دبی نشت پرداخته شده است.

#### ۴ - عوامل مؤثر در حجم نشت

مؤلفه‌های مؤثر در حجم نشت که محققان به آن پرداخته‌اند فشار، دما، جنس لوله، نوع و اندازه‌ی ترک و مصالح پیرامون ترک است. آن‌ها تلاش داشته‌اند نقطه‌ای بهینه در انتخاب فشار، نوع لوله و خاکریز مناسب دبی نشت را معرفی کنند. با کنترل این عوامل می‌توان هدررفت آب را به حداقل رساند. موارد زیر یافته‌های پژوهشگران در این زمینه است.

##### ۱-۴ - فشار

از گذشته تاکنون، رفتار هیدرولیکی روزنه‌ها به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است و عکس‌العمل آن‌ها را با درجاتی از اطمینان می‌توان پیش‌بینی کرد. یکی از عوامل اصلی مؤثر بر نشت، فشار در سامانه‌های توزیع است. در گذشته، دیدگاه مرسوم این بود که نشت از سامانه‌های توزیع آب، نسبتاً غیرحساس به فشار است، همان‌طور که توسط معادله‌ی روزنه به‌صورت زیر نشان داده شده است (Van Zyl & Clayton, 2007).

$$q = AC_d\sqrt{2gh} \quad (1)$$

که در آن  $q$  دبی جریان،  $C_d$  ضریب تخلیه،  $A$  مساحت روزنه،  $g$  شتاب گرانش و  $h$  اختلاف فشار روی دهانه است. معادله‌ی روزنه (۱) برای روزنه‌ای در کنار مخزن به‌دست آمد و تبدیل تمام انرژی پتانسیل را به انرژی جنبشی توصیف می‌کند. ضریب تخلیه برای اعمال تلفات انرژی و کاهش قطر جت در پایین‌دست روزنه، ضرب شده‌است. برای اعمال این معادله برای نشت در لوله‌ها می‌توان آن را به شکل کلی‌تر زیر نوشت.

$$q = ch^\alpha \quad (2)$$

که در آن  $c$  به عنوان ضریب نشت و  $\alpha$  توان نشت تعریف می‌شود. تعدادی از مطالعات میدانی نشان داده است که  $\alpha$  می‌تواند به طور قابل توجهی بزرگتر از ۰/۵ باشد و معمولاً بین ۰/۵ و ۲/۷۹ با میانگین ۱/۱۵ متغیر است (Van Zyl & Clayton, 2007). این بدان معنی است که نشت در سامانه‌های توزیع آب نسبت به فشار بسیار حساس‌تر از آنچه تصور می‌شود، است. محدوده توان‌های مشاهده شده منعکس کننده تفاوت‌های اساسی در تأثیر فشار بر میزان نشت است. به عنوان مثال، کاهش فشار به نصف در یک لوله منجر به کاهش دبی ۲۹٪، ۵۰٪ و ۸۲٪ برای توان‌های ۰/۵، ۱/۰ و ۲/۵ می‌شود.

May (1994) دریافت که توان فشار  $\alpha$  به جنس لوله و شکل ناحیه نشتی بستگی دارد، زیرا در لوله‌های تغییرشکل‌پذیر افزایش فشار لوله می‌تواند منجر به افزایش سطح مقطع نشتی شود:

$$A = A_0 + mh \quad (3)$$

که در آن  $A_0$  مساحت نشت اولیه و  $m$  شیب معادله فشار-مساحت است. این موضوع مبنای تئوری دبی مساحت ثابت و متغیر (FAVAD<sup>v</sup>) قرار گرفت. با تلفیق نظریه FAVAD با شکل نمایی معادله فشار-نشت ( $\alpha = 0.5$ )، Cassa et al. (2010) معادله نشتی را در قالب معادله (۴) ارائه کردند:

$$q = C_d \sqrt{2g} (A_0 h^{0.5} + m h^{1.5}) \quad (4)$$

مدیریت فشار در سامانه‌های آبرسانی شهری می‌تواند تأثیر مستقیمی بر نشت و آسیب‌های لوله‌ها داشته باشد. بر اساس تحقیق (Tabesh & Vaseti, 2006) مدیریت فشار معمولاً بهینه‌تر و مقرون به صرفه‌تر از روش‌های دیگر کاهش نشت است. آن‌ها روشی جهت کاهش نشت در شبکه‌های توزیع آب شهری از طریق کمینه نمودن مجموع مربعات فشار اضافی در گره-های سیستم ارائه کردند و به این نتیجه رسیدند که با استفاده از شیرهای فشارشکن در نقاط مناسب و بهینه نمودن مقدار فشار خروجی شیرآلات، فشار تک‌تک گره‌های شبکه به حداقل مقدار در محدوده استاندارد، کاهش می‌یابد.

#### ۴-۲- دما

دما در ویسکوزیته‌ی سینماتیکی یک سیال، تأثیرگذار است، عدد رینولدز برای یک بازشدگی یا روزنه را می‌توان به صورت زیر نوشت. از معادله‌ی (۵) نتیجه می‌شود که دبی نشتی برای  $Re$  ثابت، (مثلاً برای حداکثر جریان آرام یا انتقالی) متأثر از دمای سیال است. به طور مثال، ویسکوزیته آب زمانی که دمای آن از ۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد تقریباً نصف می‌شود، به این معنی که حداکثر جریان آرام یا متلاطم تقریباً دو برابر می‌شود (Van Zyl & Clayton, 2007).

$$Re = \frac{4vR}{\nu} = \frac{4q}{\nu P} \quad (5)$$

که در آن  $\nu$  سرعت،  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیکی سیال و  $R$  شعاع هیدرولیکی روزنه است (به عنوان مساحت جریان  $A$  تقسیم بر محیط خیس شده  $P$  تعریف می‌شود).

(Sadr-Al-Sadati & Jalili Ghazizadeh, 2019) به بررسی تأثیر دما در نشت پرداختند. در این مطالعه، میزان آب نشتی از یک شکاف طولی در لوله HDPE به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها و نتایج عددی ایشان نشان داد که دما باید به عنوان یک پارامتر مهم در نشت شبکه‌های توزیع آب، WDN در نظر گرفته شود. افزایش دما نه تنها نرخ نشت را افزایش می‌دهد، بلکه تنش تسلیم لوله‌های HDPE را کاهش می‌دهد که ممکن است باعث تغییر شکل پلاستیک شکاف‌های طولی در شبکه‌های توزیع آب شود. در نتیجه، میزان توان نشت می‌تواند بالاتر از مقدار پیشنهادی ۱/۵ باشد که به عنوان حداکثر توان نشتی در فاز الاستیک در نظر گرفته می‌شود. افزون بر این، رفتار پلاستیکی و خواص ویسکوالاستیک لوله‌های HDPE باعث تغییر دائمی ناحیه‌ی اولیه دهانه نشتی می‌شود. در جدول (۱) ضریب اصلاح

<sup>7</sup> Fixed and Variable Area Discharge

الاستیسیته لوله متناسب با تغییرات دما آورده شده است. بنابراین اگر شبکه‌های توزیع آب در معرض فشار قرار گیرند، توان نشی ( $\alpha$ ) و ضریب نشت ( $C_d$ ) تغییر خواهند کرد. این تغییر رفتار به ویژه در مناطق گرمسیری، که آب با درجات بالاتر در خطوط لوله جریان دارد، از اهمیت بیشتری برخوردار است، به طوری که اجتناب از نوسانات فشار و مدیریت بهینه‌ی فشار در شهرهای گرمسیری ضروری است.

جدول ۱. ضریب اصلاح الاستیسیته بر اساس تغییرات دما

Table 1. Elasticity correction factor based on temperature changes

Temperature (°C)	Elasticity correction factor (k)
10	1.32
16	1.18
23	1
27	0.93
32	0.82
38	0.73
43	0.64

#### ۴-۳- جنس لوله

Van Zyl و Clayton (2007) نشان دادند که جنس لوله نقش مهمی در رفتار نشی لوله‌ها دارد. فشار آب در لوله توسط تنش‌های موجود در دیواره‌ی لوله گرفته می‌شود و بنابراین ممکن است عاملی در شکست و رفتار نشی باشد. اثرات زیر را می‌توان به افزایش فشار داخلی لوله مرتبط کرد.

(الف) ترک‌ها یا شکستگی‌های کوچکی که در فشار کم نشت نمی‌کنند، باعث ایجاد بازشدگی‌های جدید می‌شود.

(ب) مساحت دهانه‌های موجود در لوله به دلیل افزایش تنش در دیواره‌ی لوله، افزایش می‌یابد.

(ج) ترکیدگی لوله‌ها افزایش می‌یابد (Thornton & Lambert, 2005) و (Farley & Trow, 2003) همراه با افزایش متناظر در هزینه‌های نگهداری.

Greyvenstein & Van Zyl (2007) به صورت آزمایشگاهی میزان نشت از لوله‌های آسیب‌دیده در صحرا و لوله‌های مصنوعی آسیب‌دیده را مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه شامل سوراخ‌های گرد، ترک‌های طولی و محیطی در لوله‌های uPVC، فولاد و آزیست سیمان بود. همه‌ی جریان‌ها متلاطم بودند و نشت‌ها در معرض جو بودند. توان‌های نشت حاصل بین ۰/۴۱ و ۲/۳۰ متغیر بود. یافته‌های اصلی مطالعه‌ی Van Zyl & Clayton (2007) به شرح زیر بود:

(الف) توان‌های نشت یافت‌شده در مطالعات میدانی غیرواقعی نیستند.

(ب) بیشترین توان‌های نشت در لوله‌های فولادی زنگ‌زده رخ داده است، احتمالاً به دلیل خوردگی که باعث کاهش مواد حفاظت‌کننده در اطراف سوراخ می‌شود. این برخلاف تصور است که لوله‌های پلاستیکی به دلیل مدول الاستیسیته پایینی، نشت بیشتری دارند.

(ج) سوراخ‌های گرد دارای توان‌های نشت نزدیک به مقدار نظری ۰/۵ بودند و تفاوت معناداری بین لوله‌های فولادی و uPVC برای سوراخ‌های گرد مشاهده نشد.

(د) علاوه بر سوراخ‌های دچار خوردگی، بزرگترین توان‌های نشت برای ترک‌های طولی یافت شد. به دلیل این که تنش‌های محیطی در لوله‌ها معمولاً به طور قابل توجهی بیشتر از تنش‌های طولی است.

(ه) توان‌های نشت برای ترک‌های محیطی در لوله‌های uPVC گاهی کمتر از ۰/۵ بود، که نشان می‌دهد که بازشدگی ممکن است با افزایش فشار منقبض شود. این حالت به این شکل توضیح داده می‌شود که تجهیزات آزمایشگاهی اجازه نمی‌دهد تنش‌های طولی قابل توجهی در لوله ایجاد شود. تصور می‌شود که تنش‌های محیطی باعث کشیده شدن ترک‌ها و در عین حال کاهش سطح آن شده است. این نتایج متعاقباً از طریق تحلیل اجزای محدود تأیید شده است (Cassa, 2005).

Ferrante (2012) فرمولی با توان متغیر برای  $h$  به جای ۱/۵ پیشنهاد کرد. (Cassa & Van Zyl (2013) نشت یک ترک به طول ۶۰ میلی‌متر را روی یک لوله ۱۱۰ میلی‌متری uPVC مطالعه کردند و با استفاده از یک مدل اجزاء محدود، معادلاتی را برای پیش‌بینی شیب معادله فشار-مساحت ( $m$ ) به عنوان تابعی از ویژگی‌های لوله همچون جنس لوله پیشنهاد کردند.

#### ۴-۴- نوع و اندازه ترک

در تحقیقی که (Van Zyl & Clayton (2007) انجام دادند، به بررسی سوراخ‌های گرد، ترک‌های طولی و محیطی در لوله‌های uPVC، فولاد و آزیست سیمان پرداختند و به این نتیجه رسیدند که توان‌های نشت بین ۰/۴۱ و ۲/۳۰ متغیر است و سوراخ‌های گرد دارای توان‌های نشت نزدیک به مقدار نظری ۰/۵ بوده و تفاوت معناداری بین لوله‌های فولادی و uPVC برای سوراخ‌های گرد مشاهده نشده است. علاوه بر سوراخ‌های دچار خوردگی، بزرگترین توان‌های نشت برای ترک‌های طولی یافت شد. توان‌های نشت برای ترک‌های محیطی در لوله‌های uPVC گاهی کمتر از ۰/۵ بود، که نشان می‌دهد بازشدگی ممکن است با افزایش فشار منقبض شود. جدول (۲) نشان می‌دهد که دهانه‌های نشتی با محیط‌های خیس‌شده‌ی کشیده (مانند ترک‌ها) می‌توانند دبی بسیار بزرگتری را برای جریان آرام یا انتقالی نسبت به دهانه‌های مدور با همان مساحت عبور دهند (Van Zyl & Clayton, 2007).

جدول ۲. توان‌های نشت آزمایشگاهی برای تعدادی از شکست‌ها و لوله‌ها (Van Zyl & Clayton, 2007)

Table 2. Laboratory leakage exponents for a number of failures and pipes (Van Zyl & Clayton, 2007)

Failure type	Leakage exponent		
	uPVC	Asbestos cement	Mild steel
Round hole	0.52	—	0.52
Longitudinal crack	1.38–1.85	0.79–1.04	—
Circumferential crack	0.41–0.53	—	—
Corrosion cluster	—	—	0.67–2.30

Cassa & Van Zyl (2013) در مطالعه عددی خود در تعیین شیب معادله فشار-مساحت، تأثیر نوع و اندازه‌ی ترک را در نظر گرفتند و برای ترک طولی، محیطی و مارپیچی معادلاتی به دست آوردند. آن‌ها شیب معادله فشار-مساحت به شکل معادلات (۶) تا (۸) را به ترتیب برای ترک طولی، مارپیچی و محیطی به دست آوردند.

$$m = \frac{2.93157 \cdot d^{0.3379} \cdot L_c^{4.80} \cdot 10^{0.5997(\log L_c)^2} \cdot \rho \cdot g}{E \cdot t^{1.746}} \quad (۶)$$

$$m = \frac{3.7714 \cdot d^{0.178569} \cdot L_c^{6.051} \cdot \sigma_1^{0.0928} \cdot 10^{1.05(\log L_c)^2} \cdot \rho \cdot g}{E \cdot t^{1.6795}} \quad (۷)$$

$$m = \frac{1.64802 \times 10^{-5} \cdot L_c^{4.87992662} \cdot \sigma_1^{1.09182555} \cdot 10^{0.82763163(\log L_c)^2} \cdot \rho \cdot g}{E \cdot t^{0.33824224} \cdot d^{0.186376316}} \quad (۸)$$

که در آن  $d$  قطر داخلی لوله،  $L_c$  طول ترک،  $\sigma_1$  تنش طولی (برای ترک‌های مارپیچی و محیطی)،  $t$  ضخامت جدار لوله و  $E$  مدول الاستیسیته جنس لوله است. آن‌ها نتیجه گرفتند که شیب معادله فشار-مساحت مستقل از عرض اولیه ترک است و برای ترک‌های طولی بیشترین حساسیت به تغییرات فشار دارند بعد از ترک‌های مارپیچی و سپس ترک‌های محیطی.

#### ۴-۵- مصالح پیرامون لوله

Noack & Ulanicki (2008) نشت ایده‌آل از یک روزنه‌ی دایره‌ای را با استفاده از معادله‌ی داریسی- وایسباخ و مدل خاک بعدی، با معادله‌ی انتشار استاندارد، مدل‌سازی کردند. آن‌ها با ترکیب معادلات ذکر شده، در قالب یک مدل پایدار، تأثیر

نفوذپذیری خاک بر مشخصات نشت از لوله را تعیین کردند. آن‌ها همچنین توان  $\alpha$  را برای خاک‌های مختلف پیدا کردند. مقدار توان به دست آمده برای نفوذپذیری بسیار کم، نزدیک به ۱ بود؛ یعنی خروجی از قانون جذر پیروی نمی‌کرد. با این حال، با افزایش نفوذپذیری، توان تا رسیدن به ۰/۵ کاهش یافت؛ یعنی خروجی لوله از قانون ریشه مربع پیروی می‌کرد. آن‌ها چندین آزمایش را روی مدل آزمایشگاهی با خاک رس و خاک معمولی انجام دادند. مقادیر توان برای خاک معمولی ۰/۳ و برای خاک رسی ۰/۵ بود و همچنین نتایج با مقادیر مدل عددی متفاوت بود.

van Zyl (2014) پیش‌بینی کرد که خاک‌های اطراف یک نشتی ممکن است بر رابطه‌ی فشار- نشت تأثیر بگذارند، بعید است که هر خاکی ظرفیت فشارهایی را که معمولاً در سامانه‌های توزیع آب یافت می‌شود، داشته باشد؛ بنابراین، خاک کمی بر فشار- نشت تأثیر می‌گذارد.

Walski et al. (2004) با ارائه معادلات نظری به این نتیجه رسیدند که هر دو تلفات خاک و روزنه با غلبه اولی در برخی موارد، در نشت تأثیرگذار بودند. آن‌ها یک عامل بدون بعد، OS را به صورت معادله (۹) تعریف کردند که نشان‌دهنده‌ی تسلط خاک یا روزنه است. هنگامی که OS در حدود مرتبه ۱ است، افت خاک و روزنه به یک اندازه موثر است. در مورد OS بسیار کوچک ( $OS < 0.01$ )، تلفات خاک غالب است و زمانی که OS بسیار بزرگ است ( $OS > 100$ )، افت روزنه غالب است.

$$OS = \frac{h}{h_s} = \frac{KA_s q}{2gL} \left( \frac{1}{C_d A} \right)^2 \quad (9)$$

Latifi et al. (2018) نیز به تحقیق درباره‌ی پارامترهای جنس خاک بر میزان نشت از لوله‌ها پرداختند. آن‌ها با انتخاب چند نمونه خاک، نشت از لوله در حضور خاک در آزمایشگاه را شبیه‌سازی کردند. برای حذف اثر تغییرات فشار، بر میزان نشت از خاک‌های مختلف، یک توان واحد برای فشار در رابطه‌ی نشت-فشار برای تمامی خاک‌ها محاسبه شد؛ سپس با لحاظ نمودن پارامترهای  $D_{10}$ ،  $D_{50}$ ، شاخص خمیری (PI) و ضریب هدایت هیدرولیکی خاک ( $k$ )، روابط زیر بین دبی نشت و هر یک از پارامترهای جنس خاک به دست آمد. ضرایب  $R^2$  خوبی با توجه به پیچیدگی رفتار خاک به دست آمده است و نشان می‌دهد روابط در پیش‌بینی دبی نشت برای شرایط محیطی این آزمایش مناسب هستند.

$$Q = 13.33D_{50}^{0.1133} p^{0.5745} \quad R^2 = 0.74 \quad (10)$$

$$Q = 0.202 \ln(4.2k) D_{50}^{0.1133} p^{0.5745} \quad R^2 = 0.69 \quad (11)$$

$$Q = 17.105PI^{-0.155} p^{0.5745} \quad R^2 = 0.63 \quad (12)$$

در این روابط، تأثیر مشخصات خاک و تغییرات آن‌ها بر میزان دبی نشت به خوبی ملاحظه گردید. به نحوی که در خاک‌های درشت‌دانه‌تر مقدار نشت از لوله بیشتر از خاک‌های ریزدانه‌تر به دست آمد. همچنین در خاک‌های دارای شاخص خمیری بالاتر، مقدار نشت کمتری به دست آمد که می‌تواند ناشی از افزایش مقدار ریزدانه‌ها در خاک و مقاومت خاک ریزدانه در زهکشی نشتاب باشد. براساس نتایج به دست آمده افزایش چسبندگی در خاک‌های دانه‌ای یا بخش ریزدانه خاک موجود یا به عبارتی افزایش سهم رس نسبت به سیلت در بخش ریزدانه‌ی خاک می‌تواند موجب کاهش نشت شود. همچنین ملاحظه گردید که در خاک‌های دارای ضریب هدایت هیدرولیکی بالاتر، مقدار نشت بیشتری اندازه‌گیری شده‌است.

(Latifi et al. (2022) به بررسی اثرات خواص مختلف خاک اطراف لوله بر دبی نشتی پرداختند. بدین منظور نشت از لوله‌های پلی‌اتیلن در شرایط آزمایشگاهی با ترک‌های طولی در پنج نوع خاک مختلف و با ترک‌های محیطی در پنج نوع خاک دیگر شبیه‌سازی شد و میزان نشت اندازه‌گیری شد. سپس برای هر نوع خاک رابطه دبی- فشار به دست آمد. نتایج نشان داد که خواص خاک بر میزان نشت از ترک‌های طولی و محیطی مؤثر است. همچنین مشاهده شد که در خاک، میزان نشت از تئوری FAVAD پیروی می‌کند. با مقایسه ویژگی‌های مختلف خاک، مشخص شد که بین پارامترهای اندازه ذرات خاک، حد خمیری و نفوذپذیری هیدرولیکی خاک‌ها و دبی نشتی همبستگی وجود دارد. با بررسی این همبستگی مشخص شد که پارامتر  $D_{50}$  خاک، نفوذپذیری هیدرولیکی و وزن واحد خشک شاخص‌های بهتری برای معرفی خصوصیات خاک در اطراف ترک‌ها هستند.

## ۵- نتیجه‌گیری

هدررفت آب با توجه به توسعه‌یافتگی کشورها از ۱۰٪ تا ۵۵٪ است که می‌تواند پاسخگوی نیاز حدود ۲۰۰ میلیون نفر باشد. با توجه به این میزان هدررفت و خطر بالفعل کاهش منابع آب قابل بهره‌برداری، مدیریت نشت و بررسی عوامل تأثیرگذار در هدررفت آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نتایج مطالعات میدانی مدیریت فشار نشان داده است که نشتی نشتی اغلب به طور قابل توجهی بالاتر از مقدار ۰/۵ است. با توجه به تأثیر بالای فشار در دبی نشت، یکی از مناسب‌ترین روش‌های در کاهش نشت، کاهش فشار در سیستم‌های آبرسانی شهری با استفاده از شیرهای فشارشکن است. محققین به شناسایی و تجزیه و تحلیل عواملی پرداختند که ممکن است مسئول توان‌های نشت بالاتر باشند. یک عامل مهم رفتار جنس لوله است رفتار مواد لوله می‌تواند بازه‌ی توان‌های نشت مشاهده شده در محیط را تغییر دهد. جنس لوله، نوع و اندازه ترک در شیب معادله فشار-مساحت تأثیرگذار است. شیب معادله فشار-مساحت نسبت به تغییرات فشار نسبت به ترک‌های محیطی بیشترین حساسیت را نشان می‌دهد. همچنین دما علاوه بر تغییر هیدرولیک جریان می‌تواند مدول الاستیسیته لوله را تغییر داده و ابعاد ترک تحت تأثیر آن قرار گیرد. پیچیدگی اندرکنش بین یک لوله نشتی و خاک اطراف آن مورد بحث قرار گرفته است و نتیجه‌گیری شد که رابطه‌ی بین فشار و نشت خطی نیست. با افزایش  $D_{50}$  خاک دبی نشت افزایش می‌یابد. نفوذپذیری هیدرولیکی و وزن واحد خشک شاخص‌های مناسبی در تعیین خصوصیات خاک است. میزان نشت از سامانه‌های آبرسانی شهری در ایران مربوط به مطالعات قبل از سال ۲۰۰۰ میلادی است و با توجه گذشت زمان و پیشرفت فناوری

در سیستم‌های اندازه‌گیری نشت، لازم است بررسی‌های بیشتری در حجم نشت در ایران صورت گیرد. تحقیقات بیشتری برای ارزیابی تأثیر پارامترهای دما بر روی خواص ویسکوالاستیک لوله‌های HDPE و تأثیر آن‌ها بر رفتار WDNs مورد نیاز است. مطالعات انجام شده در بخش تأثیر نوع ترک در معادله شیب-مساحت به صورت عددی بوده است و نیاز است مطالعات تجربی نیز به بررسی آن پردازد. نیاز است در مطالعات مقدار مدول الاستیسیته لوله و نسبت پواسون ذکر شود تا در مطالعات عددی جهت مقایسه نتایج از آن‌ها بهره‌برداری شود. در پژوهش‌های انجام شده تأثیر خاک‌های حل‌شونده چون آهک در خرابی لوله و در نتیجه در دبی نشت بررسی نشده است. با توجه به این که سامانه‌های آبرسانی شهری ممکن است در این محیط‌ها قرار گیرند پیشنهاد می‌شود به این موضوع نیز پرداخته شود. درباره‌ی دبی نشت در اتصالات نیز نیاز به تحقیقات بیشتری است.

## ۶- تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

## ۷- مراجع

- Ávila, C. A. M., Sánchez-Romero, F.-J., López-Jiménez, P. A., & Pérez-Sánchez, M. (2021). Leakage management and pipe system efficiency. Its influence in the improvement of the efficiency indexes. *Water*, 13(14), 1909. <https://doi.org/doi: 10.3390/W13141909>
- Boudaghpour, S., & Sabooteh, S. (2020). Environmental leakage pollutions evaluations in urban water distribution network using unaccounted water principles (shokuhieh industrial town in Iran). *Stavební Obzor - Civil Engineering Journal*, 29(2), 219–228. <https://doi.org/10.14311/CEJ.2020.02.0019>
- Cassa, A. M. (2005). A numerical investigation into the behaviour of leak openings in pipes under pressure. University of Johannesburg
- Cassa, A. M., & Van Zyl, J. E. (2013). Predicting the head-leakage slope of cracks in pipes subject to elastic deformations. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 62(4), 214–223. <https://doi.org/10.2166/aqua.2013.094>
- Cassa, A. M., Van Zyl, J. E., & Laubscher, R. F. (2010). A numerical investigation into the effect of pressure on holes and cracks in water supply pipes. *Urban Water Journal*, 7(2), 109–120.
- Farley, M., & Trow, S. (2003). Losses in water distribution networks. IWA publishing.
- Farley, M., Water, S., Supply, W., Council, S. C., & World Health Organization. (2001). Leakage management and control: A best practice training manual. World Health Organization.
- Ferrante, M. (2012). Experimental investigation of the effects of pipe material on the leak head-discharge relationship. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(8), 736–743.
- Greyvenstein, B., & Van Zyl, J. E. (2007). An experimental investigation into the pressure-leakage relationship of some failed water pipes. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 56(2), 117–124.
- Iwanek, M., & Suchorab, P. (2017). The assessment of water loss from a damaged distribution pipe using the FEFLOW software. 15, 03006. <https://doi.org/10.1051/ITMCONF/20171503006>
- Kanakoudis, V., & Tsitsifli, S. (2019). Water networks management: New perspectives. *Water*, 11(2), 239. <https://doi.org/10.3390/W11020239>



- Karadirek, I. E., & Aydin, M. E. (2022). Water losses management in urban water distribution systems. In M. Bahadir & A. Haarstrick (Eds.), *Water and wastewater management: Global problems and measures* (pp. 53–65). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-95288-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-95288-4_6)
- Kingdom, B., Liemberger, R., & Marin, P. (2006). The challenge of reducing non-revenue water in developing countries—How the private sector can help: A look at performance-based service contracting.
- Kourbasis, N., Patelis, M., Tsitsifli, S., & Kanakoudis, V. (2020). Optimizing water age and pressure in drinking water distribution networks. *Environmental Sciences Proceedings*, 2(1), 51. <https://doi.org/10.3390/ENVIRONSCIPROC2020002051>
- Latifi, M., Naeeni, S. T. (Omid), & Mahdavi, A. (2018). Experimental assessment of soil effects on the leakage discharge from polyethylene pipes. *Water Supply*, 18(2), 539–554. <https://doi.org/10.2166/ws.2017.134>
- Latifi, M., Parvaneh, R., & Naeeni, S. T. (Omid). (2022). Investigating the influence of surrounding soil properties on leakage discharge from cracks in polyethylene pipes. *Engineering Failure Analysis*, 141, 106676. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106676>
- Liemberger, R., & Wyatt, A. (2018). Quantifying the global non-revenue water problem. *Water Science and Technology: Water Supply*, 19, ws2018129. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.129>
- Mahdavi, M., Hosseini, K., Behzadian, K., Ardehsir, A., & Jalilsani, F. (2011). Leakage control in water distribution networks by using optimal pressure management: A case study. *Water Distribution Systems Analysis*, 1110–1123. [https://doi.org/10.1061/41203\(425\)101](https://doi.org/10.1061/41203(425)101)
- May, J. (1994). *Pressure dependent leakage, world water and environmental engineering*. Water Environment Federation: Washington DC, USA.
- Mohsin, R., & Majid, Z. (2014). Erosive failure of natural gas pipes. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 5(4), 04014005.
- Noack, C., & Ulanicki, B. (2008). Modelling of soil diffusibility on leakage characteristics of buried pipes. *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*, 1–9.
- Ociepa, E., Molik, R., & Lach, J. (2018). Assessment of water loss level on the example of selected distribution systems. 10<sup>th</sup> Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering EKO-DOK 2018, 44, 00131. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/20184400131>
- Pike, S. (2016). *Experimental investigation of leakage-induced pipe erosion outside of pipe leaks*. University of Cape Town.
- Ribeiro, L., Sousa, J., Muranho, J., & Marques, A. S. (2018). Locating unreported leaks with modelling tools and pressure monitoring: A case study. *EPiC Series in Engineering*, 3, 1758–1765. <https://doi.org/10.29007/79RG>
- Sadr-Al-Sadati, S. A., & Jalili Ghazizadeh, M. (2019). The experimental and numerical study of water leakage from High-Density Polyethylene pipes at elevated temperatures. *Polymer Testing*, 74, 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.01.014>
- Tabesh, M., & Vaseti, M. M. (2006). Leakage reduction in water distribution networks by minimizing the excess pressure. *Iran-Water Resources Research*, 2(2), 53–0. (In Persian)
- Thornton, J., & Lambert, A. (2005). Progress in practical prediction of pressure: Leakage, pressure: Burst frequency and pressure: Consumption relationships. *Proceedings of IWA Special Conference 'Leakage*, 12–14.
- Thornton, J., Sturm, R., & Kunkel, G. (2008). *Water loss control*. McGraw-Hill Education.
- US EPA, O. (2015, August 19). *Drinking water distribution systems [Overviews and Factsheets]*. <https://www.epa.gov/dwsixyearreview/drinking-water-distribution-systems>

van Zyl, J. E. (2014). Theoretical modeling of pressure and leakage in water distribution systems. *Procedia Engineering*, 89, 273–277.

Van Zyl, Je., & Clayton, C. R. I. (2007). The effect of pressure on leakage in water distribution systems. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 160(2), 109–114.

Walski, T., Bezts, W., Posluszny, E. T., Weir, M., & Whitman, B. (2004). Understanding the hydraulics of water distribution system leaks. In *Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management* (pp. 1–10).