



A review of granular soil fluidization due to pipe water leakage

Seyed Hamid Alavi*, Masoud Ghodsian

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

Corresponding Author email: seyedhamidalavi@modares.ac.ir

© The Author (s) 2025

Received: 16 May 2025

Revised: 19 Aug 2025

Accepted: 22 Sept 2025

Published: 01 Oct 2025

Extended Abstract

Introduction

Introduction: Leakage from water distribution systems is a global issue, causing significant annual economic losses and environmental damage. A primary consequence of such leaks is soil fluidization, a process where saturated granular soil around a pipe begins to behave like a fluid due to increased pore water pressure. This phenomenon can lead to the formation of cavities and sinkholes, posing severe risks to urban infrastructure, including pipeline damage and road collapse. While the fundamental principles of fluid flow in porous media and through orifices are well-established, the specific, complex interplay in leak-induced fluidization remains an active area of research. This review synthesizes existing knowledge on the mechanisms of soil fluidization triggered by water pipeline leaks, examining the critical factors influencing its initiation and progression, and identifies key gaps for future investigation to enhance predictive models and mitigation strategies.

Materials and Methods

This study employed a systematic literature review methodology to comprehensively analyze the current state of knowledge on leak-induced soil fluidization. Research papers, conference proceedings, and technical reports from the fields of hydraulic engineering, geotechnics, and fluid dynamics were identified and critically evaluated. The review focused on both experimental (laboratory-scale physical models) and numerical studies. Key aspects examined included the hydraulic behavior of leaks through orifices and soil, the initiation criteria for fluidization, the characterization of the fluidized zone (e.g., dimensions, velocity fields), and the influence of various parameters such as leak characteristics (pressure, flow rate, orifice geometry, direction), soil properties (grain size, uniformity, permeability, cohesion), and burial conditions (cover depth). The limitations and contributions of each study were assessed to build a coherent understanding of the phenomenon.

Results and Discussion

The analysis reveals that leak-induced fluidization is a complex, non-linear process governed by the coupled behavior of orifice flow and seepage in soil. The transition from Darcy flow to non-Darcy flow and eventual fluidization is initiated when the seepage force from the leak exceeds the buoyant weight of the soil grains. Experimental studies, often using 2D models, have consistently shown that the dimensions of the fluidized cavity are highly sensitive to the leak flow rate and internal pipe pressure. Soil properties exert a dominant influence; coarse-grained, permeable soils experience higher leak rates but may exhibit more limited cavity expansion due to higher particle weight, whereas finer soils can show greater vertical expansion. The uniformity coefficient (C_u) also plays a role, though it has not been fully integrated into predictive equations. Orifice characteristics, including shape, size, and material (affecting elastic/plastic deformation via the FAVAD theory), significantly impact the leak flow rate. Research has identified distinct fluidization regimes, from localized cavities to full-scale fluidization, and stages of development from initial disturbance to final equilibrium. Furthermore, the interaction between the fluidizing jet and the pipe itself can cause erosion, exacerbating the leak. While several empirical equations have been proposed to predict fluidized area and height, they often rely on dimensional parameters and have not universally incorporated key variables like orifice size or soil uniformity, limiting their general applicability. Advanced 3D studies using techniques like CFD-DEM and

transparent soils offer deeper microscopic insights but sometimes sacrifice direct correspondence to real soil-water conditions.

Conclusion

Uncontrolled leakage from buried water pipelines is a critical concern in geotechnical and water engineering, with soil fluidization being a major failure mechanism. This review consolidates evidence that fluidization is influenced by a multitude of interacting factors: leak hydraulics, soil characteristics, and burial conditions. A comprehensive understanding of this phenomenon is essential for the safe design, risk assessment, and monitoring of buried infrastructure. Future research should prioritize several key areas: 1) Conducting 3D experimental studies with minimal intrusive measurement techniques to better represent real-world conditions and compare findings with existing 2D model results. 2) Investigating the interaction between multiple, adjacent leaks and their combined effect on fluidization. 3) Exploring the influence of pipe scale and soil stratigraphy on the leakage and fluidization process. 4) Developing improved, fully dimensionless predictive models that incorporate a wider range of variables, including orifice geometry, soil cohesion, and uniformity. Addressing these gaps will facilitate the development of more robust empirical and numerical models, ultimately leading to improved strategies for predicting, preventing, and mitigating the damaging effects of pipeline leaks on urban infrastructure.

Keywords: Granular soil fluidization, Water leakage, Seepage, Water distribution network

Acknowledgments

We gratefully acknowledge the financial support from Modares Science and Technology Park for this research.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Author Contributions

Seyed Hamid Alavi: Writing, Methodology, Investigation & Data Collection; **Masoud Ghodsian:** Supervision, Editing, Methodology, and Validation.

Citation: Alavi, S.H., & Ghodsian M. (2025). A review of granular soil fluidization due to pipe water leakage. *Technical Strategies in Water Systems*, 3(2), 151-169. <https://doi.org/10.82185/tsws.2025.1206966>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



مروری بر روان‌شدگی خاک دانه‌ای ناشی از نشت لوله‌های آب

سیدحمید علوی*، مسعود قدسیان

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

ایمیل نویسنده مسئول: seyedhamidalavi@modares.ac.ir

© The Author (s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۰۷/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۶

چکیده

جریان متمرکز نشت لوله‌های آب شهری باعث روان‌شدگی خاک دانه‌ای می‌شود. روان‌شدگی خاک به‌راه‌های مختلف می‌تواند به زیرساخت‌های سامانه‌های آب و ناحیه اطراف آن آسیب وارد کند. مطالعات بسیاری درباره روان‌شدگی ذرات دانه‌ای ناشی از جریان سیال در علوم مختلف از جمله مهندسی عمران انجام شده است. هدف این پژوهش، مطالعه‌ای جامع درباره مبانی جریان سیال از روزنه‌ها و همچنین خاک دانه‌ای است که به‌طور خاص به روان‌شدگی خاک ناشی از نشت لوله‌های آب شهری می‌پردازد. این پژوهش مواردی مانند جریان از طریق مصالح دانه‌ای، جریان از طریق روزنه‌ها، و جریان ترکیبی از طریق روزنه و تراوش در خاک، خرابی لوله‌ها ناشی از روان‌شدگی؛ شروع روان‌شدگی، مطالعات در زمینه روان‌شدگی و نقد آن‌ها، و جمع‌بندی و پیشنهادها را پوشش می‌دهد. یافته‌های مروری حاضر نشان می‌دهد که نشت متمرکز نه تنها تابع هد هیدرولیکی است، بلکه به مشخصات هندسی روزنه، دانه‌بندی خاک، فشار داخلی لوله و دمای سیال نیز وابسته است. شروع روان‌شدگی تحت عوامل دیگری مانند چسبندگی ذرات خاک و شکل آن‌ها قرار می‌گیرد و نیاز به انرژی بیشتری برای فعال‌سازی نیاز دارد. مطالعات بیانگر آن هستند که با افزایش فشار، ناحیه روان‌شدگی به‌صورت عمودی و جانبی گسترش یافته و می‌تواند به ایجاد فروچاله و یا آسیب به تاسیسات پیرامونی بیانجامد. خاک‌های درشت‌دانه با تخلخل کمتر و سربار بیشتر، دچار روان‌شدگی کمتر می‌شوند. پیشگیری مؤثر با طراحی و اجرای صحیح خطوط لوله آغاز می‌شود. در طراحی خطوط لوله انتخاب مسیر، تحلیل تنش لوله و انتخاب مصالح پرکننده نقش کلیدی دارد. اندرکنش همزمان جریان از روزنه روی لوله و تراوش در خاک، لزوم توسعه مدل‌های آزمایشگاهی و عددی سه‌بعدی را دوچندان می‌کند. در پایان، تحقیق بر روی تأثیر فاصله بین دو روزنه و تغییر قطر لوله‌های نشتی به‌عنوان خلا پژوهشی توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: روان‌شدگی خاک دانه‌ای، نشت آب، تراوش، شبکه آبرسانی

استناد: علوی، س.ح.، قدسیان، م. (۱۴۰۴). مروری بر روان‌شدگی خاک دانه‌ای ناشی از نشت لوله‌های آب. راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی،

۳(۲): ۱۵۱-۱۶۹. <https://doi.org/10.82185/tsws.2025.1206966>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

نشت از سامانه‌های آبی، اتفاقی رایج در جهان است که سالانه خسارات بسیاری به شرکت‌ها، دولت‌ها و محیط زیست وارد می‌کند. احتمال اینکه در طراحی و اجرای سامانه آبی، نشت در طولانی مدت اتفاق نیفتد، در سراسر جهان ناچیز است. پژوهشگران دلایل بسیاری از جمله نوسانات فشار داخلی سامانه آبی، بار ترافیکی بر روی سامانه آبی، نواقص اجرا و ساخت را برشمرده‌اند (Alavi, 2023). در همین راستا شرکت‌ها و دولت‌ها نیاز به تعیین هزینه-فایده تعمیر سامانه‌های آبی دارند. در برآورد خسارت نشت علاوه بر محاسبه‌ی حجم آب آن، توجه به خسارت نشت بر زیرساخت‌های شهری و ایجاد ناپایداری خاک نیز اهمیت دارد (Cui et al., 2012; Guo Shuai et al., 2013; Waltham, 1993). نشت سامانه‌های آبی باعث روان‌شدگی^۱ خاک می‌شود. در این حالت، ذرات جامد خاک تحت تأثیر جریان سیال (مانند آب) رفتار سیال‌گونه پیدا می‌کنند. این اتفاق زمانی رخ می‌دهد که سیال در محیط دانه‌بندی‌شده خاک جریان یابد و نیروی مقاومتی کافی برای تحمل وزن ذرات ایجاد کند. (Leva, 1959). در نتیجه، افزایش فشار آب منفذی ناشی از نشت لوله‌های آب، ظرفیت باربری زمین را کاهش داده و می‌تواند باعث ایجاد حفره و فروچاله شود. (Monzer et al., 2022). این پدیده در نهایت به زیرساخت‌های شهری آسیب وارد کرده و موجب تضعیف پی‌ها، نشست سطحی و آسیب به سازه‌های مجاور می‌گردد (Cui et al., 2011). برآوردها نشان می‌دهد در آمریکا هزینه سالانه خسارات ناشی از فروچاله‌ها که بسیاری از آنها نتیجه نشت لوله هستند بیش از ۳۰۰ میلیون دلار است، هرچند احتمالاً این رقم کمتر از میزان واقعی به دلیل کم‌گزارش‌دهی است (Dastpak et al., 2023).

پدیده‌ی روان‌شدگی یک موضوع چند رشته‌ای است که با رشته‌های مختلف از جمله هیدرولیک، مکانیک محیط‌های دانه‌ای و دینامیک سیالات بررسی می‌شود.

پدیده‌ی روان‌شدگی ناشی از نشت لوله‌های آب ماهیت پیچیده‌ای دارد و نیاز است که مطالعات بیشتری در این زمینه انجام شود. در این پژوهش سعی شده است که بخشی از خلاءهای مطالعاتی این موضوع شناسایی شود.

۲- جریان نشت از خاک و روزنه‌ها

بررسی نشت از خاک و روزنه‌ها در مهندسی هیدرولیک نیازمند توجه به مبانی جریان سیال است. جریان در محیط‌های دانه‌ای بسته به عدد رینولدز (Re) می‌تواند آرام یا آشفته باشد. جریان آرام نخستین بار توسط Darcy (1856) توصیف شد و رینولدز^۲ (۱۸۸۳) آن را به محدوده‌ای که نیروهای لزجت بر لختی غالب است محدود کرد. در شرایط Re کمتر از ۱۰۰ جریان عمدتاً آرام بوده و در بازه ۱۰۰ تا ۵۰۰ حالت گذار رخ می‌دهد (Ziazi & Liburdy, 2020). این اعداد در مقایسه با شرایط آشفتگی جریان در لوله‌ها و رودخانه‌ها (چیزی حدود ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰) بسیار کمتر است، به دلیل اینکه، رفتار جریان در محیط متخلخل متفاوت است و در رابطه رینولدز، به جای عمق رودخانه و یا قطر لوله، قطر میانگین ذرات و یا ضریبی از آن در مخرج قرار می‌گیرد که نسبتاً کوچک است. با افزایش سرعت جریان، پدیده زیرشویی^۳ و در نهایت روان‌شدگی می‌تواند منجر به شکست سازه شود (Güney et al., 2025; Wang, 2024; Xu & Zhang, 2013).

در مورد جریان از طریق روزنه‌ها، رفتار هیدرولیکی تابع فشار، دما، جنس، هندسه، نوع جریان و پدیده‌هایی نظیر حفره‌زایی است. اساس تحلیل، معادله جریان اوریفیس $Q = C_d A_0 \sqrt{2gh}$ است (Douglas et al., 1979)، اما ضریب تخلیه C_d به عواملی همچون شکل و اندازه روزنه، تیزی لبه، ناهمواری سطح داخلی و شرایط سیال وابسته است (Brater & King, 1976; Sadr-Al-

^۱ Fluidization^۲ Reynolds^۳ Piping

(Sadati & Jalili Ghazizadeh, 2019; Van Zyl & Clayton, 2007) ضریب تخلیه (Cd) در اوریفیس‌ها تحت تأثیر عوامل مختلف، به‌ویژه در اوریفیس‌های مستطیلی، ممکن است بین ۰/۶ تا ۰/۸۵ تغییر کند (Nielsen & Weber, 2000). پدیده حفره‌زایی^۱، که با تشکیل و فروپاشی حباب‌های بخار همراه است، علاوه بر کاهش ضریب دبی، موجب فرسایش موضعی نیز می‌شود (Alsaydalani, 2023; Douglas et al., 1979). جنس لوله‌ها نیز در رفتار نشت مؤثر است. Van Zyl & Clayton (2007) نشان‌دادند که جنس لوله نقش مهمی در رفتار جریان خروجی از روزنه دارد. در مطالعه‌ی میدانی (Alavi, 2024) در دانشگاه تربیت مدرس، مشاهده شد در لوله‌ی فلزی در بخش جوش ورق آن دچار ترک خوردگی شده و آب به سطح رسیده بود (شکل ۱ الف). همچنین در حادثه‌ای مشابه، لوله‌ی پلی‌اتیلن دچار سوراخ‌شدگی شده و نشت ناشی از آن به سطح زمین رسیده بود (شکل ۱ ب).

شکل ۱- آسیب‌دیدگی لوله‌های آب‌رسانی (Alavi, 2024)

الف) ترک‌خوردگی لوله‌ی فلزی

ب) سوراخ‌شدگی لوله‌ی پلی‌اتیلن



b) Hole damage in polyethylene pipe

a) Crack damage in steel pipe

Fig 1. Water pipeline damages (Alavi, 2024)

نظریه FAVAD^۲ این اثر را با درنظر گرفتن تغییر مساحت روزنه در اثر فشار توصیف می‌کند (Cassa & Van Zyl, 2013; May, 1994). همچنین، تغییرات دما با تأثیر بر لزجت آب و رفتار مومسان لوله‌های پلی‌اتیلنی می‌تواند نرخ نشت را افزایش دهد (Sadat-Al-Sadati & Jalili Ghazizadeh, 2019; Van Zyl & Clayton, 2007). از سوی دیگر، هندسه روزنه (طولی، محیطی یا گرد) بر حساسیت جریان به فشار و مقادیر ضریب دبی اثر می‌گذارد (Alsaydalani, 2023; Cassa & Van Zyl, 2013). انسداد روزنه توسط ذرات خاک نیز با تغییر رفتار جت خروجی و افزایش مقاومت جریان، موجب نیاز به انرژی بیشتر برای عبور آب می‌شود (Massimilla et al., 1963; Van Zyl & Clayton, 2007).

نشت واقعی در بسیاری از موارد ترکیبی از جریان در خاک و جریان از روزنه است. (Walski et al., 2004) با معرفی شاخص بدون بعد Orifice/Soil (OS) نشان دادند که بسته به شرایط، تلفات هد می‌تواند ناشی از خاک یا روزنه باشد، هرچند در اغلب موارد افت هد ناشی از روزنه غالب است. بررسی‌های آزمایشگاهی نیز اهمیت خصوصیات خاک از جمله دانه‌بندی (d_{10} و d_{50}).

¹ Cavitaion

² Fixed and Variable Area Discharge

شاخص خمیری و نفوذپذیری را بر شدت نشت تأیید کرده است (Latifi et al., 2018; Latifi et al., 2022b). به طور کلی، خاک‌های درشت‌دانه و نفوذپذیر نشت بیشتری نسبت به خاک‌های ریزدانه دارند، در حالی که افزایش چسبندگی و حد خمیری موجب کاهش نشت می‌شود.

بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که رفتار نشت از خاک و روزنه پیچیده و غیرخطی است و تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله عدد رینولدز، هندسه و جنس روزنه، دما، حفره‌زایی، انسداد و ویژگی‌های خاک قرار دارد. این عوامل به صورت توأمان موجب بروز پدیده‌هایی مانند زیرشویی، شکست هیدرولیکی و روان‌شدگی می‌شوند که در خرابی سازه‌های آبی نقش کلیدی دارند.

۳- روان‌شدگی خاک

اصطلاح «روان‌شدگی» در مهندسی شیمی به فرایندی اطلاق می‌شود که طی آن ذرات جامد تحت اثر سیال (گاز یا مایع) رفتاری شبیه سیال پیدا می‌کنند (Kunii & Levenspiel, 1991). این مفهوم با «روان‌گرایی»^۱ (ناپایداری محیط‌های دانه‌ای اشباع در اثر بارهای لحظه‌ای مثل زلزله) و «زیرشویی» (برداشت موضعی ذرات در اثر جریان تراوش) تفاوت دارد.

در مهندسی آب، روان‌شدگی به حالتی گفته می‌شود که در اثر جریان تراوش و افزایش فشار آب منفذی، محیط‌های دانه‌ای اطراف لوله‌های مدفون مانند سیال رفتار کنند. این پدیده ممکن است پنهان بماند تا زمانی که به حد قابل مشاهده برسد.

(Van Zyl et al., 2013) با آزمایش روی لوله‌های نشتی و استفاده از گوی‌های شیشه‌ای نشان دادند که بلافاصله پس از آغاز نشت، سه ناحیه شکل می‌گیرد، ناحیه سیال (روان‌شده)، ناحیه متحرک، و ناحیه ساکن. این محیط‌ها در مطالعات (Lessan, 2021; Ghorbany et al., 2022; Latifi et al., 2022a) و Sharafodin et al. (2024) نیز بررسی شدند. در این مطالعه بیشتر افت هد در نواحی سیال و متحرک رخ داد، در حالی که ناحیه ساکن سهم اندکی داشت. همچنین، وسعت این نواحی بیشتر به سرعت جریان نشت وابسته بود تا اندازه روزنه. با این حال، باید توجه داشت که مصالح واقعی خاکریز اطراف لوله‌ها با گوی‌های شیشه‌ای تفاوت زیادی دارند؛ خاک‌ها توزیع دانه‌بندی متنوع‌تر و شکل‌های غیرکروی‌تری دارند که موجب قفل‌شدگی ذرات می‌شود.

۳-۱- خوردگی لوله‌ها ناشی از روان‌شدگی

لوله‌های آب زیرزمینی شکسته، یکی از منابع اصلی جریان تراوش به محیط اطراف است. به‌طور متوسط، نرخ نشت از این سامانه‌ها در سراسر جهان حدود ۳۵٪ از کل عرضه، تصور می‌شود (Summit, 2008). نشت می‌تواند بسته به نوع علت، در اجزای مختلف شبکه‌های توزیع رخ دهد؛ مثل اتصالات، اتصالات فرول^۲، سوراخ‌ها و شکستگی‌ها. تصور می‌شود که آخرین مورد مهم‌ترین عامل در نرخ کلی نشت باشد.

پژوهش‌های (Mohsin & Majid, 2014; Negonga, 2013) و Pike et al. (2018) نشان می‌دهد روان‌شدگی اطراف روزنه‌ی نشت باعث فرسایش بیشتر آن می‌شود و در نتیجه ابعاد روزنه بزرگتر می‌شود و مشکل را بیشتر می‌کند. شکل (۲) افزایش ابعاد روزنه را ناشی از روان‌شدگی نشان می‌دهد.

(Negonga, 2013) در یک مطالعه آزمایشگاهی، اثر روان‌شدگی بر فرسایش اطراف روزنه لوله‌های توزیع آب را بررسی کرد. روزنه‌ای افقی (شبیه‌سازی نشت از اتصالات) ایجاد شد که موجب روان‌شدگی خاک و حرکت دانه‌های ماسه‌ای گردید. نتایج نشان داد که روان‌شدگی باعث فرسایش اطراف محل نشت می‌شود. فرسایش لوله‌های PVC بیشتر تحت تأثیر اندازه ذرات خاک و سرعت جریان نشت است. همچنین، تیز بودن ذرات خاک نیز نقش مهمی در افزایش فرسایش لوله‌ها دارد.

¹ Liquefaction

² Ferrule

(Mohsin & Majid (2014) به مطالعه‌ی آسیب‌های وارده بر لوله‌های گاز فولادی و پلی‌اتیلن با چگالی متوسط (MDPE) در نزدیکی یک لوله‌ی آب فشار بالا و دارای نشت پرداختند. این مطالعه با بازرسی بصری بر روی نمونه‌های شکست‌خورده انجام شد. تحقیقات نشان داد که روان‌شدگی ناشی از جت خروجی از لوله‌ی آب، خواص فرسایشی ایجاد کرده است. آن‌ها بیان کردند که برخورد روان‌شدگی به لوله‌ی فولادی باعث از بین رفتن پوشش لوله و نازک شدن سطح لوله شد که در نهایت منجر به خرابی آن شد. همچنین روان‌شدگی باعث شسته‌شدن خاک زیر لوله‌ی MDPE شده و نهایتاً این لوله به سمت پایین نشست داشته است. جت پرفشار گاز خروجی از لوله‌ی گاز فولادی نیز باعث روان‌شدگی شده و سطح لوله‌ی MDPE را فرسایش داده است. در شکل (۲) خرابی لوله‌های فولادی و MDPE مشاهده می‌شود.

شکل ۲- خرابی ناشی از روان‌شدگی در لوله‌های انتقال گاز (Mohsin & Majid, 2014)

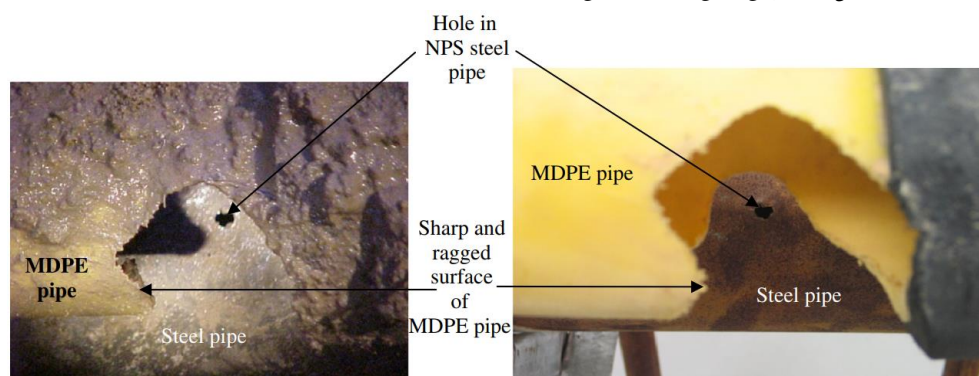


Fig 2. Failure caused by fluidization in gas transmission pipes (Mohsin & Majid, 2014)

(Pike et al. (2018) در آزمایشگاهی اثر فرسایش ناشی از اندرکنش خاک-نشت را بر لوله‌های آب بررسی کردند. یک لوله UPVC با سوراخ ۳ میلی‌متری در زاویه ۴۵ درجه در ماسه مدفون شد و آزمایش پایه با نرخ نشتی ۴۰۰ لیتر بر ساعت انجام گرفت. سپس اثر عوامل مختلف (اندازه ذرات، عمق پوشش، نرخ جریان، جهت نشت و جنس لوله) به صورت جداگانه بررسی شد. نتایج نشان داد که فرسایش قابل توجهی در سطح لوله ایجاد شد که حتی منجر به تشکیل منافذ جدید گردید. بیشترین تأثیر بر نرخ فرسایش مربوط به جهت جت نشتی بود؛ پس از آن نرخ جریان، اندازه ذرات، جنس لوله و در نهایت عمق پوشش قرار داشت. همچنین، شرایطی با جریان نشتی زیاد و ذرات درشت در عمق زیاد بیشترین فرسایش را ایجاد کرد. برعکس، جریان کم با جهت عمودی رو به بالا در محیطی کم‌عمق و با ذرات ریز کمترین فرسایش را به همراه داشت. از نظر جنس لوله، HDPE کمترین فرسایش و پس از آن فولاد و در نهایت UPVC بیشترین فرسایش را داشتند.

۳-۲- شروع روان‌شدگی

شروع روان‌شدگی کامل در محیطی از مواد دانه‌ای زمانی اتفاق می‌افتد که نیروی پसार رو به بالا اعمال‌شده توسط سیال برابر با وزن محیط شود. به عبارت دیگر زمانی اتفاق می‌افتد که فشار رو به بالا با وزن شناور مواد در تعادل باشد (Fluidization, 2020). نشت از لوله‌های تحت فشار، فشار آب منفذی را افزایش داده و روان‌شدگی را آغاز می‌کند (Monzer et al., 2022). تحقیقات نشان داده است که سرعت جریان ورودی آب مورد نیاز برای آغاز روان‌شدگی، به چندین پارامتر کلیدی از جمله اندازه منفذ (روزنه)، تخلخل خاک و ارتفاع بستر وابسته است (Monzer et al., 2023). مطالعات نشان می‌دهد که با افزایش تخلخل خاک و اندازه منفذ، سرعت ورودی لازم برای آغاز روان‌شدگی کاهش می‌یابد. برعکس، افزایش ارتفاع بستر، مقاومت خاک در برابر روانگرایی را بیشتر می‌کند (Monzer et al., 2023). مطالعات آزمایشگاهی مشخص کرده‌اند که روان‌شدگی زمانی رخ می‌دهد که نسبت هد فشار آب داخل لوله به عمق مدفون شدن آن، بیش از ۲ باشد (Liu et al., 2024).

افت فشار در محیط در شروع روان‌شدگی را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی شناخته‌شده‌ی Ergun پیش‌بینی کرد. شروع روان‌شدگی از یک جریان موضعی مانند جریان ناشی از نشت لوله‌ی زیرزمینی ممکن است به انرژی ورودی بیشتر از انرژی مورد نیاز برای خود روان‌شدگی نیاز داشته باشد. برای مثال، اگر مواد محیط از ذرات به هم پیوسته و بسیار زاویه‌دار تشکیل شده باشند، انرژی بیشتری برای غلبه بر درهم تنیدگی دانه‌ها مورد نیاز است (Hartman & Coughlin, 1993; Weisman et al., 1988). این به-عنوان "انرژی فعال‌سازی" روان‌شدگی در نظر گرفته می‌شود (Niven & Khalili, 1998). که علاوه بر مقدار انرژی تلف‌شده در روزنه است.

Cui et al. (2012) از تکنیک DEM-LBM برای بررسی رفتار خاک در برابر نشت لوله‌ی زیرزمینی استفاده کرد. ایشان بیان کرد چسبندگی بین ذرات خاک بر مقادیر فشاری که در آن حفره‌ی روان‌شدگی شروع می‌شود، تأثیر می‌گذارد. نتیجتاً، انرژی فعال‌سازی تحت چسبندگی ذرات خاک، بیشتر می‌شود.

۳-۳- مطالعات در زمینه‌ی روان‌شدگی

مطالعات متعددی برای بررسی روان‌شدگی در محیط مواد دانه‌ای انجام شده است. (Niven & Khalili 1998) آب‌شدگی مواد دانه‌ای را توسط یک جت آب عمودی داخلی به سمت پایین بررسی کردند. آن‌ها آزمایش‌هایی را بر روی مصالح دانه‌ای و قطر جت‌های مختلف با استفاده از مخازن در اندازه‌های مختلف ساخته‌شده از پلکسی‌گلس انجام دادند. در برخی از این آزمایش‌ها، جت در مجاورت دیوار مخزن قرار داشت تا ناحیه‌ی روان‌شدگی را نشان دهد. (Niven & Khalili 1998) در این آزمایش‌ها تشکیل یک منطقه‌ی روان‌شده را مشاهده کردند. با افزایش عمق جت، مناطق روان‌شده از یک فرم باز، محوری، تقریباً بیضوی به یک مشخصات نامتقارن و جوشان تغییر یافته و از آنجا به یک حفره‌ی روان‌شدگی مستغرق، تغییر یافته است. بر اساس این مطالعه، آن‌ها مشاهده کردند که شکل ناحیه‌ی روان‌شدگی برای هر مصالحی، هر قطر جتی و هر دبی تقریباً ثابت است. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که هندسه‌ی ناحیه‌ی روان‌شدگی توسط دو فرایند زیر کنترل می‌شود:

(الف) روان‌شدگی در زیر نوک جت، که پیروی کاهش سرعت خطی یک جت مستغرق است.

(ب) توانایی جریان برای حفظ روان‌شدگی، که قطر ناحیه را کنترل می‌کند.

فرآیند روان‌شدگی شامل سه مرحله مجزا شامل آشفستگی اولیه، فرسایش در حال توسعه و شکست نهایی است (Liu et al., 2024). در مرحله اولیه، جت‌های آب ناشی از نشت باعث افزایش موضعی فشار می‌شوند. در مرحله توسعه، ذرات خاک شروع به جابه‌جایی و مهاجرت می‌کنند و حفره‌هایی در اطراف محل نشت شکل می‌گیرد. در نهایت، روانگرایی کامل و احتمال فروریزش زمین اتفاق می‌افتد. در مطالعات آزمایشگاهی دیگری نیز روان‌شدگی ناشی از سیال هوا با استفاده از مدل‌های دوبعدی مشاهده شد

مانند مطالعات: Apte et al., 1990; Sastry et al., 2003

(Apte et al., 1990) از یک مدل تجربی دوبعدی برای اندازه‌گیری پروفیل فشار استاتیکی در یک محیط فشرده بالای حفره‌ای که توسط جت هوا در جهت بالا تشکیل شده است، استفاده کرد. این کار با استفاده از یک ظرف مستطیل شکل (طول ۵۷۰ میلی‌متر در ارتفاع ۹۲۰ میلی‌متر با عرض‌های داخلی ۱۴، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر) انجام شد (شکل ۳). ظرف دارای یک شکاف (حدود ۱ میلی‌متر) از قسمت پایین آن بود که در عرض قرار داشت. اندازه‌گیری فشار استاتیکی از طریق محیط با ایجاد سوراخ‌هایی به قطر ۱/۶۵ میلی‌متر روی محفظه به‌دست آمد. از مصالح دانه‌ای (یعنی شیشه و پلاستیک) با قطر کره در محدوده ۳-۳/۴ میلی‌متر برای آزمایش‌ها استفاده شد. (Apte et al., 1990) آزمایش‌ها را با افزایش سرعت جریان آغاز کردند. ضمن مشاهده‌ی اندازه‌ی حفره و پروفیل فشار استاتیکی در حفره و محیط، آن‌ها تغییرات ناگهانی در فشار و سرعت گاز را در نزدیکی سقف حفره مشاهده کردند. فشار در داخل حفره افزایش یافت و به حداکثر مقدار در مرز داخلی ناحیه‌ی حفره رسید.

شکل ۳- مدل دوبعدی آزمایش (Apte et al., 1990)

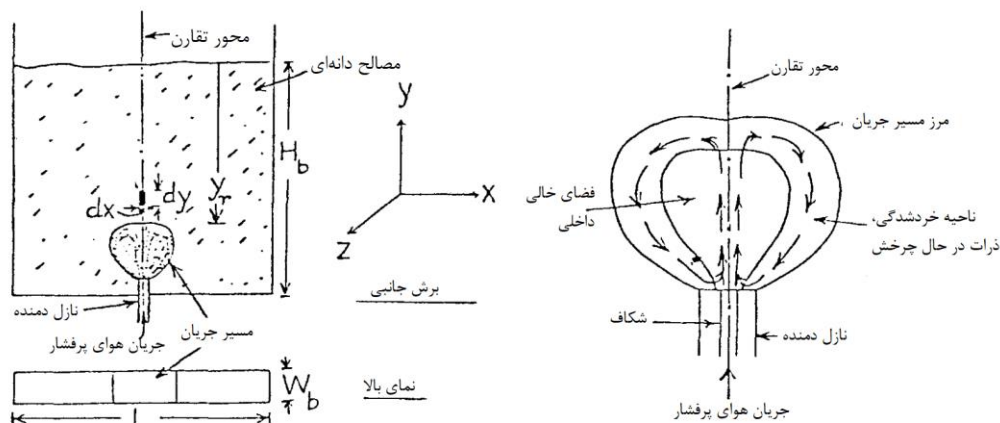


Fig 3. Two-dimensional model from the experiment (Apte et al., 1990)

در ادامه به مطالعات هیدرولیکی در زمینه روان‌شدگی پرداخته می‌شود. (Alsaydalani (2010) در مطالعه‌ی دوبعدی روان‌شدگی به‌صورت آزمایشگاهی، یک جعبه با روزنه‌ای با ابعاد متغیر برای شبیه‌سازی یک ترک ایده‌آل برای یک نشت موضعی طراحی کرد (شکل ۴). ایشان مؤلفه‌های مختلفی را بر روی فرایند روان‌شدگی با استفاده از تکنیک‌های تحلیل تصویر (PIV)^۱ شامل: سرعت جریان، فشار آب منفذی اضافی، فشار بالادست روزنه، اندازه‌ی ذرات، شکل ذرات، ارتفاع محیط و اندازه‌ی روزنه بررسی کرد. نتایج و مشاهدات مطالعه‌ی (Alsaydalani (2010 نشان می‌دهد که روان‌شدگی در محیطی از مصالح دانه‌ای با بالابردن دانه‌ها در ناحیه‌ی فعال محیط ایجاد می‌شود. او نشان داد که شروع این فرایند به ویژگی‌های خاک (اندازه‌ی دانه، شکل دانه، ارتفاع محیط)، سرعت تراوش و اندازه‌ی روزنه بستگی دارد. او بین گام‌های افزایش نرخ نشت، از فواصل زمانی ۵ دقیقه‌ای استفاده کرده است، که با توجه به مطالعه Lessan (2021) برای پایداری مساحت نشت در آن گام زمانی، کافی نیست.

شکل ۴- روزنه‌ی استفاده‌شده در آزمایش (Alsaydalani (2010)



Fig 4. The orifice used in the experiment by Alsaydalani (2010)

(Alsaydalani & Clayton (2014 نشان دادند که با افزایش نرخ جریان، ابتدا جریان داری در اطراف روزنه شکل می‌گیرد و سپس جریان غیرداری ظاهر می‌شود. در آغاز، انسداد نسبی روزنه باعث افزایش فشار بالادست می‌گردد و با غلبه نیروی تراوش بر وزن شناور ذرات، روان‌شدگی شروع می‌شود. ابعاد حفره با افزایش جریان گسترش یافته و نهایتاً به سطح می‌رسد؛ در این میان، دبی، اندازه و شکل ذرات، نفوذپذیری و ارتفاع محیط از پارامترهای کلیدی محسوب می‌شوند.

¹ Particle Image Velocimetry

Philippe & Badiane (2013) دو رژیم روان‌شدگی را معرفی کردند: حالت موضعی (حفره محدود) و حالت کامل که کل ارتفاع نمونه را دربرمی‌گیرد. گذار به روان‌شدگی کامل به یک دبی حداقلی وابسته است که رابطه‌ای خطی با ارتفاع نمونه دارد. همچنین نشان داده شد که در فواصل کم، حفره‌های مجاور با هم ادغام می‌شوند.

Bailey & Zyl (2015) با آزمایش روی محیطی از گوی‌های شیشه‌ای گزارش کردند که سرعت درون حفره به بیش از $2/4 \text{ m/s}$ می‌رسد، در حالی که بیرون از آن از $0/8 \text{ m/s}$ تجاوز نمی‌کند. فشار منفذی اضافی نیز در بالای ناحیه روان‌شدگی بیشینه بوده و سپس به سرعت افت می‌کند؛ این امر بیانگر استهلاک سریع انرژی جریان و دشواری شناسایی نشت در شرایط واقعی است.

Govender (2017) با استفاده از همان دستگاه، اثر شدت جت، ارتفاع محیط و اندازه ذرات را بررسی کرد. نتایج نشان داد که افزایش دبی جت ارتفاع روان‌شدگی را به صورت تصاعدی افزایش می‌دهد، در حالی که کاهش ارتفاع محیط به افزایش خطی آن منجر می‌شود. ذرات درشت‌تر نیز باعث کاهش ارتفاع و فشار منفذی شدند.

He Yongxin et al. (2017) با جت عمودی رو به بالا چهار مرحله روان‌شدگی شامل بدون حفره، حفره پایدار، حفره ناپایدار و روان‌شدگی کامل را شناسایی کردند. مدل آزمایشگاهی ایشان در شکل (۵) مشاهده می‌شود.

شکل ۵- دستگاه آزمایشگاهی He Yongxin et al. (2017)

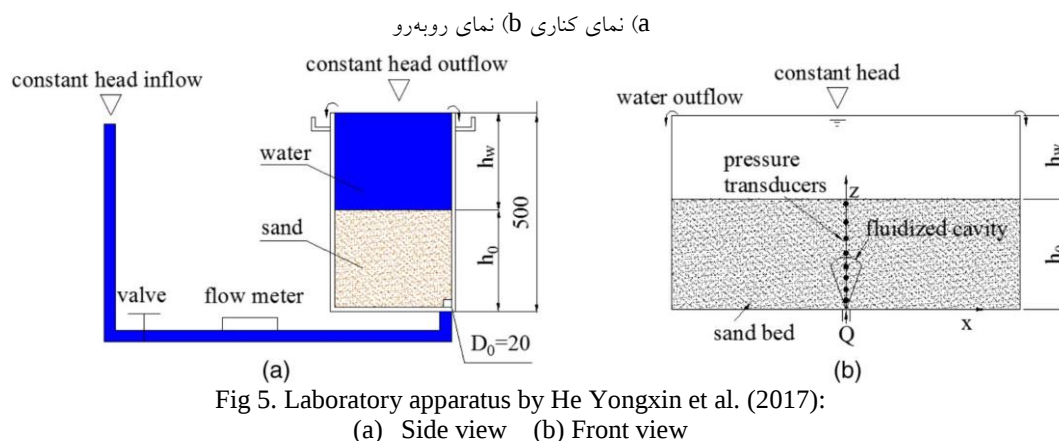


Fig 5. Laboratory apparatus by He Yongxin et al. (2017):
(a) Side view (b) Front view

Mena et al. (2018) با بهره‌گیری از محیط دانه‌ای فلورسانس‌دار و لیزر مسطح، فرایند تشکیل و رشد روان‌شدگی را بررسی کردند. آن‌ها دو رژیم اصلی انبساط را شناسایی نمودند: انبساط منظم که در آن حفره به صورت نمایی تا روان‌شدگی کامل گسترش می‌یابد، و انبساط فوق‌آهسته که با نرخ جریان کوچک‌تر همراه بوده و شامل یک رشد اولیه بسیار کند و سپس شتاب‌گیری در مراحل بعدی است. در این حالت، زمان گذار طولانی‌تر و تغییرات اولیه ارتفاع حفره ناچیز بود. نتایج نشان داد که اندازه ذرات و ارتفاع اولیه محیط بیشترین تأثیر را بر مدت زمان انبساط دارند، در حالی که قطر ورودی تزریق نقش کمتری ایفا می‌کند.

Schulz et al. (2021) به صورت تحلیلی و تجربی در مقیاس‌های دوبعدی و سه‌بعدی تغییرات ارتفاع حفره ناشی از جت آب رو به بالا را بررسی کردند. شکل (۶) شماتیک مدل دوبعدی استفاده شده توسط ایشان است. ایشان با استفاده از اصول بقای جرم، تکانه و انرژی، آن‌ها رابطه‌ای بی‌بعد بر اساس عدد فرود ارائه دادند. نتایج نشان داد با افزایش عدد فرود، سرعت ذرات و جت افزایش می‌یابد، اما در مقادیر بالای عدد فرود این افزایش به صورت لگاریتمی بوده و حساسیت سیستم به تغییرات عدد فرود کاهش می‌یابد.

شکل ۶- شماتیک جعبه‌ی شیشه‌ای و حفره‌ی روان‌شدگی در آزمایش Schulz et al. (2021)

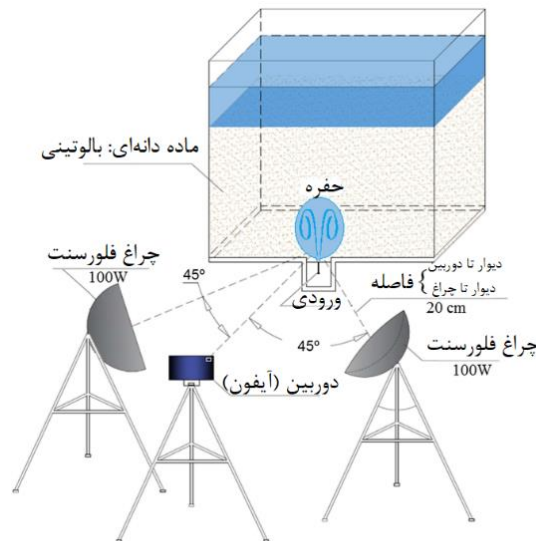


Fig 6. Schematic of the glass box and fluidization cavity in the experiment by Schulz et al. (2021)

Lessan (2021) به‌صورت تجربی ابعاد روان‌شدگی ناشی از نشت رو به پایین از ترک و سوراخ در لوله‌های پلی‌اتیلن مدفون در ماسه سیلیس را بررسی کرد. دستگاه آزمایشگاهی ایشان مطابق شکل (۷) شامل یک پمپ، یک فشار سنج، یک جعبه خاک گالوانیزه و یک شبکه لوله‌کشی بود. نتایج نشان داد که ابعاد روان‌شدگی و دبی نشت با افزایش قطر متوسط ذرات افزایش می‌یابند و توسعه ابعاد در فشارهای بالاتر زمان بیشتری (حدود ۵۰ دقیقه) برای رسیدن به تعادل نیاز دارد.

شکل ۷- جعبه آزمایش (Lessan, 2021)



Fig 7. Experimental setup (Lessan, 2021)

Ghorbany et al. (2022)، با استفاده از یک مدل دوبعدی مشابه آزمایش Lessan (2021)، اثر فشار داخلی لوله، اندازه ذرات و عمق پوشش را بر فرآیند روان‌شدگی بررسی کردند. نتایج نشان داد در فشارهای پایین، مرز میان ناحیه روان‌شده و متحرک قابل تشخیص نیست و گسترش ناحیه متحرک غالب است. افزایش فشار منجر به توسعه بیشتر ناحیه روان‌شدگی در جهت عمودی شد، در حالی که ذرات ریز انبساط بیشتری در راستای قائم و ذرات درشت در راستای افقی ایجاد کردند. همچنین افزایش عمق پوشش سرعت توسعه ابعاد روان‌شدگی را کاهش داد. آن‌ها روابطی برای تخمین مساحت و ارتفاع نسبی ناحیه روان‌شدگی با توجه به فشار، اندازه ذرات و عمق پوشش ارائه کردند (روابط ۱ و ۲). روابط (۱) و (۲)، اثرات فشار داخل لوله، میانگین اندازه‌ی ذرات و عمق پوشش را در نظر می‌گیرند.

$$\frac{A_f}{l_{50}^2} = 803.76 \left(\frac{P}{\rho g} \right)^{2.3} \left(\frac{CD}{d_{50}} \right)^{1.56} \left(\frac{t}{T} \right)^{0.49} \quad (1)$$

$$\frac{h_f}{l_{50}} = 1004.1 \left(\frac{P}{\rho g} \right)^{1.93} \left(\frac{CD}{d_{50}} \right)^{1.02} \left(\frac{t}{T} \right)^{0.43} \quad (2)$$

که در آن A_f مساحت روان‌شدگی، h_f ارتفاع روان‌شدگی، d_{50} قطر متوسط ذرات خاک، P فشار بالادست روزنه، CD عمق پوشش لوله، t زمان گذشته از شروع نشت، و T زمان تعادل روان‌شدگی است.

مزیت نسبی معادلات Ghorbany et al. (2022)، معرفی پارامترهای بی‌بعد بود اما پارامتر $P/\rho g$ دارای بعد است که بهتر بود آن نیز بی‌بعد می‌شد. همچنین، احتمال اشتباهی در نوشتار ضریب رابطه‌ی (۲) توسط Ghorbany et al. (2022) وجود دارد؛ زیرا جای‌گذاری داده‌های ایشان تفاوت بسیاری را با رابطه (۲) نشان می‌دهد. بررسی بیشتر داده‌های استفاده شده توسط ایشان مشخص شد که به احتمال بسیار زیاد، ممیز ۱۴۰۰/۱ جابه‌جا نوشته شده است و صورت صحیح آن ۱۴۰۰۱ است زیرا آن وقت است که رابطه با داده‌های آزمایشگاهی همخوانی خوبی پیدا می‌کند. در صورت اصلاح معادله (۲) خطای نسبی میانگین از ۸۹ درصد به ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، تعداد داده‌های با خطای نسبی کمتر از ۲۰ درصد از صفر عدد به ۴۰ عدد (۴۵ درصد از کل داده‌ها) افزایش می‌یابد.

Latifi et al. (2022a) نیز با شبیه‌سازی آزمایشگاهی نشت از ترک طولی در لوله‌های UPVC، رابطه ویژگی‌های خاک با ابعاد نواحی روان‌شدگی و متحرک را بررسی کردند. نتایج نشان داد رابطه نشت- فشار با معادله FAVAD سازگاری دارد و با ریزتر شدن دانه‌بندی خاک، دبی نشت به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. ویژگی دانه‌بندی (به‌ویژه d_{50}) بیشترین اثر را بر ارتفاع و سطح مقطع نواحی داشت، به‌طوری که ذرات درشت‌تر منجر به کاهش این ابعاد شدند؛ این موضوع به وزن بالاتر ذرات و کاهش توانایی جت در جابه‌جایی آن‌ها نسبت داده شد. همچنین در خاک‌های درشت‌تر و نفوذپذیرتر، افت سریع‌تر فشار منفذی مشاهده شد، در حالی که تغییرات عرض ناحیه روان‌شدگی و متحرک الگوی مشخصی نداشت.

در مطالعات Lessan (2021)، Ghorbany et al. (2022) و Latif et al. (2022a) به‌صورت جداگانه روان‌شدگی خاک ناشی از نشت لوله آب بررسی شد. آن‌ها نشت از ترک طولی و سوراخ را در جهت‌های بالا و پایین و همچنین در عمق‌های متفاوت با دانه‌بندی‌های مختلف آزمایش کردند. تفاوت کار ایشان با مطالعات پیشین خود استفاده از روزنه بر روی سطح لوله بود تا بهتر به شبیه‌سازی نشت از لوله بپردازند در صورتی که مطالعات پیشین از روزنه‌های ایده آل استفاده می‌کردند.

پژوهش‌های Lessan (2021)، Ghorbany et al. (2022) و Latif et al. (2022a) داده‌های ارزشمندی را با استفاده از خاک که شبیه‌سازی بهتری نسبت به گوی شیشه‌ای بود، به‌دست آورد اما پژوهش‌های ایشان در محدوده‌ی خاک‌های یکنواخت بوده است در صورتی که درعمل، خاکریز لوله‌های آب شهری می‌تواند دارای غیریکنواختی باشد. یکنواختی خاک را می‌توان با ضریب یکنواختی $Cu = d_{60}/d_{10}$ به‌دست آورد. همچنین داده‌های جمع‌آوری شده توسط ایشان می‌تواند برای یک پژوهش جامع‌تر درکنار هم بررسی شده تا تفاوت‌های این پژوهش‌ها را مشخصاً مقایسه کند.

Jiang et al. (2023) فرایندهای فرسایش خاک ناشی از نشت خط لوله را با استفاده از خاک شفاف، سیال غیر از آب، و لیزر به‌صورت سه‌بعدی بررسی کرد. این مطالعه فرایندهای روان‌شدگی، تغییرات در مرزهای ناحیه سیال و تأثیر اندازه‌ی ذرات، فشار خاک و تخلخل بر روان‌شدگی را تجزیه و تحلیل کرد. ایشان رابطه‌ای را برای محاسبه‌ی مساحت آسیب خاک استخراج کرد. همچنین دریافت که اندازه‌ی ذرات بزرگ و تخلخل کمتر تحت یک سربار سنگین می‌تواند به‌طور مؤثر روان‌شدگی را مهار کند و خاک با قطر بزرگ و متراکم را به‌عنوان مصالح پوشش لوله مناسب کند. با این حال، ذکر این نکته ضروری است که در تحقیق ایشان، استفاده از خاک شفاف و سیال غیر از آب که چگالی و لزجت متفاوتی دارد ممکن است رفتار طبیعی خاک را به‌طور کامل نشان ندهد.

Sharafodin et al. (2024) به صورت آزمایشگاهی، روان‌شدگی ناشی از نشت آب از ترک طولی و سوراخ را در خاک‌های غیریکنواخت بررسی کردند. ایشان با استفاده دستگاه‌های آزمایشگاهی که Lessan (2021) استفاده کرده بود، به مطالعه‌ی تجربی اثر غیریکنواختی خاک برای دو نوع خاک با قطر متوسط ذرات یکسان اما، ضریب یکنواختی متفاوت پرداخت. همچنین جهت نشت ترک را به سمت پایین قرار داد. ایشان برای روان‌شدگی و نواحی بستر متحرک در ترک‌ها و سوراخ‌ها، روابطی تجربی برای ابعاد روان‌شدگی مطابق جدول (۱) ارائه کردند.

جدول ۱- روابط بین ارتفاع روان‌شدگی و متحرک با فشار برای خاک‌های مختلف در تحقیق Sharafodin et al. (2024)

Table 1. Relationships between fluidization and mobilized height with pressure for different soils in the study by Sharafodin et al. (2024)

Soil #1	Crack-14	$H_f = 3.1418P^{0.443}$	$R^2 = 0.933$
	Crack-17	$H_f = 2.162P^{1.341}$	$R^2 = 0.980$
	Crack-20	$H_f = 5.085P^{0.829}$	$R^2 = 0.869$
	Hole-3	$H_f = 9.202P^{0.427}$	$R^2 = 0.821$
Soil #2	Crack-14	$H_f = 3.292P^{0.514}$	$R^2 = 0.760$
	Crack-17	$H_f = 1.842P^{1.356}$	$R^2 = 0.990$
	Crack-20	$H_f = 2.289P^{1.384}$	$R^2 = 0.990$
	Hole-3	$H_f = 13.447P^{0.427}$	$R^2 = 0.993$

تحقیق Sharafodin et al. (2024) در خاک غیریکنواخت انجام شد در صورتی که پژوهش‌های پیشین ایشان در خاک یکنواخت بود. اما ایشان تأثیر غیریکنواختی را در معادلات خود بررسی نکرد. مطالعات (Ghorbany et al. (2022)، Latifi et al. (2022a) و Sharafodin et al. (2024) به معادلاتی جداگانه برای محاسبه ابعاد روان‌شدگی ختم شد، مزیت نسبی پژوهش Ghorbany et al. (2022) این بود که اثر قطر ذرات را در معادلات خود دید. هیچ یک از این معادلات ارائه شده توسط این سه پژوهش ابعاد روزنه به عنوان متغیری که اثر تغییر آن دیده شود را در معادلات خود استفاده نکردند و همچنین معادلات معرفی شده توسط ایشان دارای بعد است گرچه رابطه Ghorbany et al. (2022) تعدادی پارامتر بی‌بعد معرفی کرد اما برای بررسی ابعادی و مقایسه بهتر معادلات بایکدیگر نیاز است تماماً از مولفه‌های بی‌بعد استفاده شود. همچنین استفاده از متغیر فشار آب در لوله که در همگی معادلات ایشان بوده است نمی‌تواند به تنهایی معرف کاملی از نشت باشد، چرا که نشت خود تحت تأثیر چندین متغیر است و یکی از آن‌ها فشار است. نشت متغیر بهتری نسبت به فشار است زیرا عامل به حرکت درآوردن ذرات خاک و روان‌شدگی است. در صورت استفاده از فشار در معادلات بهتر است که تمام مولفه‌های تأثیرگذار در نشت مانند تغییر کشسان-مومسان روزنه در زمان، هندسه روزنه و خاک در رابطه آورده شود. آزمایش‌های بیشتری نیاز است تا اثر ابعاد لوله، تراکم خاک، چسبندگی خاک بر روان‌شدگی دیده شود.

لوله‌های استفاده شده در آزمایشگاه ایشان در محدوده‌ی ۱/۵ متر هستند ولی در عمل، طول لوله‌های آب‌رسانی بسیار بیشتر است که این عاملی می‌شود که توزیع تنش در لوله و محیط اطراف آن تغییر کند. مطالعات میدانی می‌تواند در بررسی اثر طول لوله بر نشت و روان‌شدگی دارای اهمیت باشد.

پژوهش‌های (Lessan (2021)، Ghorbany et al. (2022)، Latifi et al. (2022a) و Sharafodin et al. (2024) همگی بر روی مدل‌های دوبعدی بوده است در صورتی که مدل دوبعدی با استفاده از صفحه شیشه‌ای در فرآیند روان‌شدگی مداخله می‌کند و ممکن است ابعاد آن را نیز تغییر دهد. (Bailey & Zyl (2015)، Mena et al. (2018) و Jiang et al. (2023) روان‌شدگی را با روش‌های نوینی به صورت سه‌بعدی بررسی کردند اما هر کدام تغییراتی در محیط روان‌شدگی اعمال کردند تا فرآیند روان‌شدگی دیده شود، مانند استفاده از گوی شیشه‌ای، استفاده از سیالی غیر از آب که به دلیل تفاوت آن‌ها با شرایط خاک ممکن است باعث ایجاد خطاهایی شود.

Liu et al. (2024) مجموعه‌ای جامع از آزمایش‌های مدل فیزیکی برای بررسی تکامل فرسایش خاک و فروریزش زمین ناشی از نشت آب از لوله‌های آب کم‌عمق مدفون معیوب انجام داد و تأثیر شش پارامتر کلیدی شامل اندازه و محل بازشدگی، فشار لوله و عمق دفن، سطح آب زیرزمینی و شرایط نشت بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که روان‌شدگی خاک زمانی رخ می‌دهد که نسبت هد فشار آب داخل لوله به عمق دفن آن بیش از ۲ باشد. البته این نکته دارای نقصی در بیان است چرا که روان‌شدگی خاک تحت تأثیر عوامل دیگری چون ابعاد بازشدگی و مشخصات خاک نیز است و امکان دارد فقط در شرایط خاص آزمایش ایشان این نتیجه رخ داده باشد. (Liu et al. (2024) از یک روش کوپل شده شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی - روش المان مجزا (CFD-DEM) که اعتبارسنجی شده بود، برای بررسی سازوکار میکروسکوپی فرسایش حفره تحت جریان نشت استفاده کردند. نتایج نشان داد که تشکیل و گسترش حفره موقتی ناشی از فرسایش داخلی خاک بوده و شامل مهاجرت گسترده ذرات ریز و تجمع ذرات درشت در اطراف لوله معیوب است. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی عددی بیانگر آن بود که فرسایش حفره با افزایش سرعت جریان و نسبت اندازه ذرات، کاهش درصد ذرات ریز خاک، و تغییر محل بازشدگی از تاج لوله به کف آن تشدید می‌شود.

جدول (۲) جمع‌بندی جامعی از مبانی، عوامل مؤثر و یافته‌های کلیدی روان‌شدگی خاک ناشی از نشت لوله‌های آب در این مطالعه را نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

تراوش کنترل‌نشده از طریق ترک‌ها یا اتصالات ناقص در سازه‌های مهندسی مانند سدها، خاکریزها، پرده‌های آب‌بند، سپر یا لوله‌های زیرزمینی ترک‌خورده، یکی از نگرانی‌های جدی در مهندسی آب و خاک است. درصد بالایی از خرابی‌ها به دلیل نشت متمرکز از چنین سازه‌هایی رخ می‌دهد. خرابی ناشی از جریان تراوش، از جدی‌ترین انواع خرابی در مهندسی عمران محسوب می‌شود.

نشت باعث ایجاد روان‌شدگی در محیط اطراف خود می‌شود. جریان نشت، تحت تأثیر خاک و روزه رفتارهای متفاوتی را نشان می‌دهد. روان‌شدگی خاک موقعی به وقوع می‌پیوندد که این جریان بتوان نیروی پसार کافی برای جابه‌جایی ذرات را ایجاد کند. این جابه‌جایی خاک می‌تواند باعث فرسایش و ایجاد فروچاله شود. مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی اثر روان‌شدگی ناشی از نشت لوله‌های آب شهری بر ایجاد فروچاله‌ها، بررسی نشده است. اندرکنش آب و خاک‌های حل‌شونده بر تغییرات نشت و روان‌شدگی تأثیرگذار است و در ایجاد فروچاله می‌تواند مؤثر باشد. مطالعه‌ی عددی و آزمایشگاهی آن می‌تواند مفید باشد. مطالعات نشان داد که روان‌شدگی خاک ناشی از نشت لوله‌های آب تحت تأثیر هیدرولیک جریان از روزه و خاک و همچنین اندرکنش این دو است. جریان نشت در خاک می‌تواند آرام و آشفته باشد و یا تحت تأثیر شرایط خاک به صورت زیرشویی به جریان بیفتد. جریان نشت همچنین ناشی از شرایط روزه کنترل می‌شود. حفره‌زایی در روزه می‌تواند جریان نشت را کاهش دهد. جنس روزه و دما که ضریب کشسانی روزه را تعیین می‌کند تحت فشار درونی و بیرونی، هندسه روزه را تغییر داده و جریان نشت را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در کنار همه‌ی عوامل ذکرشده، ذرات خاک نیز در برابر جریان نشت مقاومت نشان داده و بخشی از روزه را مسدود می‌-

کنند. حضور همگی عوامل کنترل کننده در نشت باعث شده است مطالعات بسیاری برای شناخت روان‌شدگی خاک تحت تأثیر نشت انجام گیرد.

جدول ۲- جمع‌بندی جامع مبانی، عوامل مؤثر و یافته‌های کلیدی روان‌شدگی خاک ناشی از نشت لوله‌های آب

Table 2. Comprehensive summary of fundamentals, mechanisms, influencing factors, and key findings of soil fluidization caused by water pipe leakage

منبع	نتیجه اصلی	محدودیت‌ها
Sastry et al. 2003	مشاهده روان‌شدگی با مدل دوبعدی جریان هوا.	شرایط واقعی خاک و آب لحاظ نشده است.
Alsaydalani 2010	روان‌شدگی تابع دانه‌بندی، ارتفاع بستر، فشار و ابعاد روزنه است.	گام‌های زمانی ناکافی برای پایداری نشت.
Cui et al. 2012	چسبندگی ذرات خاک آستانه فشار آغاز روان‌شدگی را افزایش می‌دهد.	مدل عددی DEM-LBM؛ اعتبار میدانی ندارد.
Philippe & Badiane 2013	دو رژیم روان‌شدگی (موضعی/کامل) معرفی شد؛ ارتفاع نمونه در روان‌شدگی تأثیر دارد.	شرایط محدود آزمایشگاهی.
Alsaydalani & Clayton 2014	ندا جریان داری، سپس غیرداری شکل می‌گیرد؛ ابعاد حفره با دبی افزایش می‌یابد.	مدل دوبعدی؛ مقیاس آزمایشگاهی کوچک.
Bailey & Zyl 2015	سرعت درون حفره بسیار بیشتر از بیرون؛ افت سریع فشار منفذی.	استفاده از گوی شیشه‌ای؛ قابلیت تعمیم محدود.
Govender 2017	افزایش دبی جت ارتفاع روان‌شدگی را به‌طور تصاعدی افزایش می‌دهد.	محدود به مدل‌های آزمایشگاهی.
He Yongxin et al. 2017	چهار مرحله روان‌شدگی (بدون حفره تا کامل) شناسایی شد.	فقط با جت عمودی رو به بالا؛ مقیاس کوچک.
Mena et al. 2018	دو رژیم انبساط (منظم و فوق‌آهسته) شناسایی شد.	اثر پارامترهای لوله و نشت بررسی نشد.
Schulz et al. 2021	رابطه بی‌بعد بر اساس عدد فرود ارائه شد؛ در اعداد بالا حساسیت کم می‌شود.	ساده‌سازی در مقیاس آزمایشگاهی؛ مقیاس میدانی نیاز است.
Lessan 2021	ابعاد روان‌شدگی تابع قطر ذرات و فشار است؛ زمان تعادل طولانی.	خاک یکنواخت؛ مقیاس دوبعدی.
Monzer et al. 2022	نشت لوله باعث افزایش فشار منفذی و شروع روان‌شدگی می‌شود.	بررسی محدود به شرایط خاص آزمایشگاهی.
Ghorbany et al. 2022	روابطی برای مساحت و ارتفاع روان‌شدگی با فشار، اندازه ذرات و عمق پوشش ارائه شد.	پارامتر P/pg بی‌بعد نشده است.
Latifi et al. 2022a	خاک ریزدانه دبی نشت را کاهش می‌دهد؛ ذرات درشت ابعاد روان‌شدگی را کم می‌کنند.	محدود به خاک یکنواخت؛ مدل دوبعدی.
Monzer et al. 2023	سرعت آغاز روان‌شدگی تابع اندازه منفذ، تخلخل و ارتفاع بستر است.	تغییرات بافت خاک‌های طبیعی لحاظ نشده است.
Jiang et al. 2023	بررسی سه‌بعدی با خاک شفاف؛ ذرات درشت و تخلخل کم روان‌شدگی را مهار می‌کنند.	استفاده از سیال غیرآبی؛ نتایج به خاک واقعی تعمیم‌پذیر نیست.
Liu et al. 2024	روان‌شدگی زمانی رخ می‌دهد که هد فشار لوله به عمق دفن $2 >$ باشد.	اثر سایر پارامترها (ابعاد منفذ، نوع خاک) نادیده گرفته شده؛ نتیجه فقط برای شرایط خاص.
Sharafodin et al. 2024	اثر غیریکنواختی خاک در روان‌شدگی بررسی شد؛ روابط تجربی ارائه شد.	غیریکنواختی در معادلات لحاظ نشد؛ مدل دوبعدی.

شواهد تجربی موجود در سایر رشته‌های علمی نشان داده‌اند که ناحیه‌ای از روان‌شدگی می‌تواند در یک محیط دانه‌ای در اثر تزریق سیال شکل بگیرد. در اغلب این مطالعات، از جت گاز به عنوان سیال تزریق‌شونده استفاده شده است. اما در کاربردهای عمرانی بررسی سیال آب اهمیت بیشتری دارد چرا که این پدیده برای طراحی، ارزیابی و پایش سازه‌های نگهدارنده‌ای که در معرض جریان نشت هستند، اهمیت بالایی دارد.

نتایج مطالعات مختلف در زمینه روان‌شدگی خاک ناشی از نشت از لوله‌های مدفون، نشان می‌دهد که عوامل متعددی همچون فشار داخلی لوله، اندازه و یکنواختی ذرات خاک، عمق پوشش، و ویژگی‌های هندسی ترک یا سوراخ نقش مهمی در گسترش ناحیه روان‌شده دارند. بررسی‌های تجربی حاکی از آن است که دبی نشت و ابعاد روان‌شدگی با افزایش قطر متوسط ذرات افزایش می‌یابد و فشار بیشتر باعث گسترش عمودی و جانبی ناحیه روان‌شدگی می‌شود. در خاک‌های درشت‌دانه، به دلیل وزن بالاتر ذرات و کاهش فشار منفذی، میزان روان‌شدگی کاهش می‌یابد. همچنین در مطالعاتی با استفاده از خاک شفاف و لیزر، پدیده‌های سه‌بعدی روان‌شدگی مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که افزایش اندازه ذرات و کاهش تخلخل در حضور سربار سنگین می‌تواند روان‌شدگی را مهار کند، گرچه استفاده از سیالات غیرآبی ممکن است نتایج را از شرایط طبیعی منحرف کند. مطالعات بسیاری بر روی مدل‌های دوبعدی روان‌شدگی انجام شده است و پیشنهاد می‌شود تفاوت فرآیند روان‌شدگی با مدل‌های سه‌بعدی بررسی شود، همچنین به دلیل خطاهایی که روش‌های مطالعه سه‌بعدی روان‌شدگی در مقایسه با شرایط واقعی دارند پیشنهاد می‌شود روش‌هایی با مداخله کمتر شناسایی شود.

مطالعات در مورد اندرکنش دو جریان روان‌شدگی محدود است و انجام یک مطالعه‌ی جامع‌تر در مورد این موضوع، به‌ویژه تغییر فاصله‌ی بین دو روزنه، جالب خواهد بود. تأثیر تغییرات ابعاد لوله‌ی نشتی بر روان‌شدگی بررسی نشده است. مجموع این مطالعات نشان می‌دهد که برای پیش‌بینی دقیق و طراحی ایمن سازه‌های مدفون، شناخت جامع‌تری از رفتار خاک در برابر نشت‌های موضعی ضروری است و توسعه مدل‌های تجربی و عددی با در نظر گرفتن همه‌ی این عوامل، گامی مؤثر در این راستا خواهد بود.

سپاسگزاری

از پارک علم و فناوری مدرس بابت حمایت مالی از این تحقیق، تشکر می‌نمایم.

تضاد منافع نویسندگان

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

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

سید حمید علوی: نگارش، روش‌شناسی، تحقیق و گردآوری داده‌ها. مسعود قدسیان: نظارت، ویراستاری، روش‌شناسی و اعتبارسنجی.

منابع

- Alavi, S. H. (2023). Water loss from urban water supply networks and the factors affecting it. *Technical Strategies in Water Systems*, 1(1). <https://doi.org/10.30486/TSWS.2023.783134>. (In Persian)
- Alavi, S. H. (2024). Experimental study on the effect of leakage geometry of a polyethylene pipe on fluidization of non-uniform granular soil [Experimental]. Tarbiat Modares University. (In Persian)

- Alsaydalani, M. (2010). Internal fluidization of granular material. University of Southampton.
- Alsaydalani, M. O. A., & Clayton, C. R. I. (2014). Internal fluidization in granular soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(3), 04013024. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001039](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001039)
- Alsaydalani, M. O. (2023). Effect of orifice hydraulic and geometric characteristics on leakage in water distribution systems. *International Journal of GEOMATE*, 25(107). <https://doi.org/10.21660/2023.107.3737>
- Apte, V. B., Wall, T. F., & Truelove, J. S. (1990). Stress distribution in a packed bed above raceway cavities formed by an air jet. *AIChE Journal*, 36(3), 461–468. <https://doi.org/10.1002/aic.690360315>
- Bailey, N. D., & Zyl, J. E. V. (2015). Experimental investigation of internal fluidisation due to a vertical water leak jet in a uniform medium. *Procedia Engineering*, 119, 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.860>
- Brater, E. F., & King, H. W. (1976). Handbook of hydraulics for the solution of hydraulic engineering problems. McGraw-Hill.
- 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>
- Cui, X., Li, J., Chan, A., & Chapman, D. (2011). Numerical simulation of a pipe leakage problem with cohesive particles. In Wu C.Y. & Ge W. (Eds.), *Special Publications* (pp. 265–270). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781849735148-00265>
- Cui, X., Li, J., Chan, A., & Chapman, D. (2012). A 2D DEM–LBM study on soil behaviour due to locally injected fluid. *Advances in Characterization and Modeling of Particulate Processes*, 10(2), 242–252. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2011.10.002>
- Darcy, H. (1856). The public fountains of the city of Dijon. *Victor Dalmont, Paris, France*.
- Dastpak, P., Sousa, R. L., & Dias, D. (2023). Soil erosion due to defective pipes: A hidden hazard beneath our feet. *Sustainability*, 15(11), 8931. <https://doi.org/10.3390/su15118931>
- Douglas, J. F., Gasiorek, J. M., & Swaffield, J. A. (1979). Fluid Mechanics. Pitman Publishing Limited.
- Fluidization. (2020). In L. Fan, C. Zhue, & D. Wang, *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* (1st ed., pp. 1–42). Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471238961.0612210901220904.a01.pub3>
- Ghorbany, S., Hamed, V., & Ghodsian, M. (2022). Experimental investigations of soil fluidization by an upward water leak jet. *Urban Water Journal*, 1–10. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2022.2134805>
- Govender, K. (2017). A laboratory investigation of the effect of flow rate and bedding characteristics on the interaction of a vertical water jet with an idealised soil medium. University of Cape Town. OpenUCT. <http://hdl.handle.net/11427/24884>
- Güney, M. Ş., Okan, M., Dumlu, E., Bor, A., Tayfur, G., & Akhik, P. (2025). Experimental study of evolution of breach resulting from piping at upper part of earth-fill dam. *Turkish Journal of Civil Engineering*, 36(2), 97–119. <https://doi.org/10.18400/tjce.1459836>
- Guo, S., Shao, Y., Zhang, T., Zhu, D. Z., & Zhang, Y. (2013). Physical modeling on sand erosion around defective sewer pipes under the influence of groundwater. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(12), 1247–1257. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000785](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000785)
- Hartman, M., & Coughlin, R. W. (1993). On the incipient fluidized state of solid particles. *Collection of Czechoslovak Chemical Communications*, 58(6), 1213–1241. <https://doi.org/10.1135/cccc19931213>
- He, Y., Zhu, D. Z., Zhang, T., Shao, Y., & Yu, T. (2017). Experimental observations on the initiation of sand-bed erosion by an upward water jet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(7), 06017007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001302](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001302)
- Jiang, L., Zhang, B., Huang, S., & Shao, Y. (2023). Analysis of fluidized zone in transparent soil under jet induced by pipe leakage. *Water Science and Engineering*, 16(2), 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.01.002>
- Kunii, D., & Levenspiel, O. (1991). *Fluidization engineering*. Butterworth-Heinemann.
- 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., Mohammadbeigi, S., Moghadam, K. F., Naeeni, S. T. "Omid," & Kilanehei, F. (2022a). Experimental study of pressure and soil effects on fluidization and mobile bed zones around buried leaking pipes. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 13(4), 04022034. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000671](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000671)
- Latifi, M., Parvaneh, R., & Naeeni, S. T. (Omid). (2022b). 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>
- Lessan, S. (2021). Laboratory study of soil fluidization due to leakage of water from the crack and orifice under buried pipe. Tarbiat Modares University. (In Persian)
- Leva, M. (1959). Fluidization. McGraw-Hill. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282271672965248>
- Liu, J.C., Wang, Z.Y., Tan, Y., & Cao, Y.C. (2024). Failure evolution and mechanism of ground collapse due to exfiltration of shallowly buried water pipeline. *Engineering Failure Analysis*, 162, 108390. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108390>
- Massimilla, L., Volpicelli, G., & Zenz, F. (1963). Flow of fluid-particle suspensions from liquid-fluidized beds. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 2(3), 194–199.
- May, J. (1994). Pressure dependent leakage, world water and environmental engineering. *Water Environment Federation: Washington DC, USA*.
- Mena, S. E., Brunier-Coulin, F., Curtis, J. S., & Philippe, P. (2018). Experimental observation of two regimes of expansion in localized fluidization of a granular medium. *Phys. Rev. E*, 98(4), 042902. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.98.042902>
- Mohsin, R., & Majid, Z. (2014). Erosive failure of natural gas pipes. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 5(4), 04014005.
- Monzer, A., Faramarzi, A., Yerro, A., & Chapman, D. (2023). MPM Investigation of the Fluidization Initiation and Postfluidization Mechanism around a Pressurized Leaking Pipe. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 149(11), 04023096. <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-10985>
- Monzer, A., Murphy, J., Yerro, A., Faramarzi, A., & Chapman, D. (2022). Simulation of soil fluidization around a pressurized leaking pipe using the material point method. *Geo-Congress* 363–374. <https://doi.org/10.1061/9780784484050.038>
- Negonga, T. (2013). Investigation of the effects of soil material grade and flow rate on the scouring of PVC water distribution pipes due to soil fluidisation. University of Cape Town.
- Nielsen, K. D., & Weber, L. J. (2000). Submergence effects on discharge coefficients for rectangular orifices. *Building Partnerships*, 1–6. [https://doi.org/10.1061/40517\(2000\)85](https://doi.org/10.1061/40517(2000)85)
- Niven, R. K., & Khalili, N. (1998). In situ fluidisation by a single internal vertical jet. *Journal of Hydraulic Research*, 36(2), 199–228. <https://doi.org/10.1080/00221689809498633>
- Philippe, P., & Badiane, M. (2013). Localized fluidization in a granular medium. *Physical Review E*, 87(4), 042206. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.87.042206>
- Pike, S. M., Van Zyl, J. E., & Clayton, C. R. I. (2018). Scouring damage to buried pipes caused by leakage jets: Experimental study. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 9(4), 04018020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000328](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000328)
- 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>
- Sastry, G., Gupta, G., & Lahiri, A. (2003). Void formation and breaking in a packed bed. *Isij International - ISIJ INT*, 43, 153–160. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.153>
- Schulz, H. E., Zyl, J. E. V., Yu, T., Neto, I. E. L., Filho, F. A. S., Correa, N. A., Benites, I. M., & Wang, H. (2021). Hydraulics of fluidized cavities in porous matrices: Cavity heights and stability for upward water jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 147(10), 04021037. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001911](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001911)
- Sharafodin, S., Latifi, M., & Ghodsian, M. (2024). Experimental investigation of leakage flow rate and fluidisation beneath polyethylene pipes in non-uniform soils. *Water*, 16(8). <https://doi.org/10.3390/w16081156>
- Summit, G. W. L. (2008). Adapting the most effective strategies for water efficiency and leakage management?. *Proceedings of the 3rd Annual Leakage Summit for International Water Utilities*, London, UK.

- Van Zyl, J. E., Alsaydalani, M. O. A., Clayton, C. R. I., Bird, T., & Dennis, A. (2013). Soil fluidisation outside leaks in water distribution pipes – preliminary observations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 166(10), 546–555. <https://doi.org/10.1680/wama.11.00119>
- Van Zyl, J. E., & 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).
- Waltham, A. C. (1993). Crown hole development in the sandstone caves of Nottingham. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 26(4), 243–251. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEGH.1993.026.004.02>
- Wang, Z. (2024). Numerical three-dimensional modeling of earthen dam piping failure. *Water Science and Engineering*, 17(1), 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.09.008>
- Weisman, R. N., Lennon, G. P., & Roberts, E. W. (1988). Experiment on fluidization in unbounded domains. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(5), 502–515. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:5\(502\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:5(502))
- Xu, T., & Zhang, L. (2013). Simulation of piping in earth dams due to concentrated leak erosion. 1091–1099.
- Ziazi, R. M., & Liburdy, J. A. (2020). Transition to turbulence in randomly packed porous media; scale estimation of vortical structures (arXiv:2012.15031). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.15031>