Vol 16, No. 3, Autumn 2026

University of Tehran Press

Journal of Water and Irrigation Management Online ISSN: 2382-9931

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

Evaluation of the Effect of Leachate Infiltration on Soil Shear Strength and Its Implications for Landfill Stability and Groundwater Contamination

Rostam Ebrahimi[1] | Jaber Soltani[2]✉ | Mahdy Khari[3]

1. Department of Civil Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: ebrahimi_rs@yahoo.com
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: jsoltani@ut.ac.ir
3. Department of Civil Engineering, Tehran East Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: mehdikhari@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 28 May 2026
Received in revised form
7 July 2026
Accepted 16 July 2026
Published online 26 October 2026

Keywords:
Environment
landfill Site
effective waste management
soil shear strength test

ABSTRACT

Municipal solid waste (MSW) management is recognized as one of the most critical environmental challenges of the twenty-first century. Rapid population growth, increasing consumerism, excessive waste generation, inadequate recycling practices, and the disposal of waste in poorly designed landfills have significantly complicated sustainable waste management. Landfill leachate, in particular, poses a serious threat to soil and groundwater quality due to its complex composition and high contamination potential.In this study, previous research on landfill-related contamination was reviewed, and the effects of leachate generated from the Aradkouh landfill on the shear strength behavior of soil were experimentally investigated. In addition, the applicability of the Contamination Index Parameter (CIP) and the Leachate Pollution Index (LPI) was evaluated to assess the degree of contamination and the potential risk of groundwater pollution.To examine the influence of leachate, uncontaminated soil was used as the control specimen and compared with artificially contaminated samples containing 3%, 10%, and 15% leachate. Direct shear tests were performed on all specimens under different normal stress levels after a curing period of 72 hours.The results demonstrated that increasing the leachate content to 3%, 10%, and 15% reduced the soil shear strength by approximately 22%, 26%, and 28%, respectively. Moreover, leachate contamination adversely affected the soil's internal friction angle. These findings suggest that leachate infiltration weakens the mechanical properties of soil, reduces landfill stability, and increases the potential for environmental and groundwater contamination.

Cite this article: Ebrahimi, R., Soltani, J., & Khari, M. (2026). Evaluation of the Effect of Leachate Infiltration on Soil Shear Strength and Its Implications for Landfill Stability and Groundwater Contamination. *Journal of Water and Irrigation Management*, 16 (3), 659-680. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2026.415388.1307

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2026.415388.1307

دوره شانزدهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۵

انتشارات دانشگاه تهران

مدیریت آب و آبیاری

شاپا الکترونیکی: ۹۹۳۱-۲۳۸۲

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

ارزیابی اثر نفوذ شیرابه بر مقاومت برشی خاک و پیامدهای آن بر پایداری و آلودگی آب‌های زیرزمینی در محل‌های دفن زباله

رستم ابراهیمی[۱] | جابر سلطانی[۲]✉ | مهدی خواری[۳]

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: ebrahimi_rs@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی فناوری ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: jsoltani@ut.ac.ir

۳. گروه مهندسی عمران، ، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: mehdikhari@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۰۴

کلیدواژه‌ها:

محیط‌زیست

جایگاه دفن زباله

مدیریت مؤثر پسماند

آزمایش مقاومت برشی خاک

چکیده

مسئله پسماندهای شهری یکی از مهم‌ترین چالش‌های راهبردی محیط‌زیستی در قرن بیست‌ویکم به‌شمار می‌روند. مدیریت مؤثر پسماند جامد، به‌دلیل افزایش جمعیت، گسترش فرهنگ مصرف‌گرایی، تولید بیش‌ازحد زباله‌های شهری، نبود بازیافت مناسب و دفن غیراصولی پسماند در محل‌های دفن فاقد طراحی و الزامات مهندسی، با دشواری‌های فراوانی روبه‌رو شده است. در این پژوهش، ضمن مرور پیشینه مطالعات مرتبط با آلودگی‌های ناشی از محل‌های دفن زباله، اثر آلودگی شیرابه لندفیل مجتمع آرادکوه بر رفتار مقاومتی خاک بررسی شده است. هم‌چنین، کارایی دو شاخص CIP (ضریب آلودگی صنعتی) و LPI (شاخص آلودگی شیرابه) در ارزیابی میزان آلودگی و توان آلایندگی شیرابه برای آب‌های زیرزمینی موردتوجه قرار گرفته است. به‌منظور بررسی اثر شیرابه، خاک نمونه‌برداری‌شده به‌عنوان نمونه شاهد با نمونه‌های آلوده مصنوعی حاوی سه، ۱۰ و ۱۵ درصد شیرابه مقایسه شد. آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه شاهد و نمونه‌های آلوده تحت تنش‌های قائم مختلف انجام گرفت و مدت‌زمان عمل‌آوری ۷۲ ساعت برای نمونه‌ها در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان آلودگی به سه، ۱۰ و ۱۵ درصد، مقاومت برشی خاک به‌ترتیب حدود ۲۲، ۲۶ و ۲۸ درصد کاهش می‌یابد. هم‌چنین، شیرابه زباله شهری اثر نامطلوبی بر زاویه اصطکاک داخلی خاک دارد. این نتایج نشان می‌دهد که نفوذ شیرابه به ماتریس خاک می‌تواند با کاهش مقاومت برشی، پایداری لندفیل‌ها را تحت تأثیر قرار دهد و درنهایت موجب تشدید آلودگی‌های محیط‌زیستی شود.

استناد: ابراهیمی، رستم؛ سلطانی، جابر و خواری، مهدی (۱۴۰۵). ارزیابی اثر نفوذ شیرابه بر مقاومت برشی خاک و پیامدهای آن بر پایداری و آلودگی آب‌های زیرزمینی در محل‌های دفن زباله. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۶ (۳)، ۶۵۹-۶۸۰ DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2026.415388.1307

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

CC BY NC

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی و توسعه فعالیت‌های صنعتی، موجب افزایش قابل‌توجه تولید پسماندهای جامد شهری شده است. این روند، به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه، از جمله ایران، با شتاب بیش‌تری رخ داده و مدیریت پسماندهای شهری را به یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی تبدیل کرده است (Singh *et al*., 2011; Eskandari *et al*., 2015). مدیریت نامناسب پسماندهای جامد می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای همچون آلودگی خاک، آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی را به‌همراه داشته باشد و سلامت انسان و پایداری اکوسیستم‌های طبیعی را با تهدیدی جدی مواجه سازد (Artiningsih *et al*., 2019; Forti *et al*., 2019). در میان روش‌های مختلف دفع پسماند، دفن زباله همچنان یکی از رایج‌ترین و در دسترس‌ترین روش‌ها در بسیاری از کشورهای جهان محسوب می‌شود. این روش به‌دلیل هزینه کم‌تر، سهولت اجرا و نیاز محدودتر به فناوری‌های پیشرفته، کاربرد وسیعی یافته است (Boateng *et al*., 2019; Popego *et al*., 2019). با وجود این، درصورتی‌که محل‌های دفن زباله به‌درستی طراحی، بهره‌برداری و مدیریت نشوند، می‌توانند خود به یکی از مهم‌ترین کانون‌های آلودگی محیط‌زیست تبدیل شوند. از مهم‌ترین پیامدهای زیست‌محیطی این مراکز، تولید شیرابه و گازهای ناشی از تجزیه مواد آلی موجود در پسماندهاست. شیرابه محل دفن زباله، مایعی پیچیده و به‌شدت آلوده است که در اثر نفوذ نزولات جوی، رطوبت موجود در زباله‌ها و وقوع فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی در توده پسماند تشکیل می‌شود (Guidi Nissim *et al*., 2021; Raoofi *et al*., 2016). این مایع معمولاً دارای ترکیبات آلی، مواد محلول، فلزات سنگین و دیگر آلاینده‌های خطرناک است. در صورت نبود سامانه‌های مناسب جمع‌آوری، کنترل و تصفیه شیرابه، این مایع می‌تواند به لایه‌های خاک نفوذ کرده و در ادامه، از طریق سازوکارهای انتقال در محیط متخلخل، به منابع آب زیرزمینی راه یابد و کیفیت آن‌ها را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد (Abdoli & Ghassemi-zadeh, 2009). در میان ترکیبات موجود در شیرابه، فلزات سنگین از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. این عناصر، به‌دلیل پایداری بالا، قابلیت تجمع در محیط و تجزیه‌ناپذیری زیستی، از مهم‌ترین آلاینده‌های زیست‌محیطی به‌شمار می‌روند. فلزات سنگین می‌توانند از طریق خاک و آب وارد زنجیره غذایی شوند و سلامت انسان و سایر موجودات زنده را تهدید کنند (Wu *et al*., 2018; Jiang *et al*., 2019; Chen *et al*., 2021). اگرچه بخشی از این عناصر به‌طور طبیعی در خاک وجود دارد، اما فعالیت‌های انسانی نظیر صنایع فلزی، معدن‌کاری، استفاده از کودهای شیمیایی، دفع فاضلاب‌های صنعتی و دفن غیربهداشتی زباله‌ها می‌تواند غلظت آن‌ها را در محیط افزایش دهد (Saheed *et al*., 2020; Nezhad *et al*., 2015; Zaheri *et al*., 2019). ازاین‌رو، پایش و ارزیابی دقیق این عناصر به‌منظور تدوین راهبردهای مناسب برای کنترل، اصلاح و کاهش اثرات منفی آن‌ها امری ضروری است (Linnik *et al*., 2022; Yang *et al*., 2021).

از سوی دیگر، با توجه به اهمیت آب به‌عنوان منبعی کمیاب و راهبردی، حفاظت از کیفیت آن در برابر منابع آلاینده از اولویت‌های اصلی مدیریت محیط‌زیست است (Livia *et al*., 2020; Fiksel, 2021). حفاظت از منابع آب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک اهمیت دوچندانی دارد. در کشور ایران بخش قابل‌توجهی از تأمین آب موردنیاز از طریق منابع آب زیرزمینی انجام می‌شود و هرگونه آلودگی این منابع می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی و اقتصادی گسترده‌ای به‌دنبال داشته باشد. افزایش آلودگی‌ها در دهه‌های اخیر سبب شده است که مسئله کیفیت آب در بسیاری از مناطق حتی مهم‌تر از کمیت آب تلقی شود (Bazi *et al*., 2017; Tortajada, 2020). بنابراین، شناسایی و کنترل منابع بالقوه آلودگی، از جمله محل‌های دفن زباله، از اهمیت فراوانی برخوردار است. در خصوص تأثیر محل دفن زباله بر روی کیفیت آب زیرزمینی در ایران مطالعات محدودی انجام شده است، یافتن محل مناسب دفن زباله یکی از مهم‌ترین مراحل مطالعاتی به موازات طراحی محل دفن زباله می‌باشد سامانه اطلاعات جغرافیایی GIS[1] راه‌حل‌های پیشنهادی اهداف تصمیم‌گیری و حل

مسائل را به تصمیم‌گیران معرفی می‌کند تا با کمک آن‌ها بتوانند مسائل مربوط به محیط‌زیست، فعالیت‌های انسانی و مسائل مربوط به سطح زمین را حل نمایند (Yamani & Alizadeh, 2015).

علاوه بر پیامدهای زیست‌محیطی، نفوذ شیرابه در خاک می‌تواند بر ویژگی‌های مهندسی و ژئوتکنیکی آن نیز اثرگذار باشد. تغییر در ساختار خاک، کاهش چسبندگی و تغییر زاویه اصطکاک داخلی، از جمله اثراتی است که در نتیجه تماس خاک با شیرابه گزارش شده است. این تغییرات می‌تواند پایداری شیب‌ها و ایمنی سازه‌های خاکی در محل‌های دفن زباله را تحت تأثیر قرار دهد و در برخی موارد، احتمال ناپایداری و گسیختگی را افزایش دهد. از این‌رو، بررسی اثرات شیرابه بر پارامترهای مقاومتی خاک از دیدگاه ژئوتکنیکی، اهمیت به‌سزایی دارد.

در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی در زمینه ارزیابی آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی در اطراف محل‌های دفن زباله انجام شده است. برخی مطالعات به‌منظور ارزیابی غلظت فلزات سنگین در خاک، از شاخص‌های استاندارد LPI (شاخص آلودگی شیرابه) و CIP (شاخص آلودگی تجمعی) بهره گرفته‌اند، درحالی‌که برخی دیگر با استفاده از مدل‌های عددی، انتقال آلاینده‌های ناشی از شیرابه را در خاک و آب زیرزمینی شبیه‌سازی کرده‌اند. هم‌چنین تعدادی از پژوهش‌ها اثر تماس خاک با شیرابه را بر تغییر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک موردبررسی قرار داده‌اند. با وجود این مطالعات، بررسی هم‌زمان اثر نفوذ شیرابه بر پارامترهای مقاومتی خاک و پیامدهای زیست‌محیطی آن همچنان نیازمند مطالعات بیش‌تری است.

با توجه به اهمیت موضوع و خلأهای موجود در پژوهش‌های پیشین، در این پژوهش تلاش شده است اثر نفوذ شیرابه بر مقاومت برشی خاک و پیامدهای احتمالی آن بر پایداری خاک و آلودگی منابع آب زیرزمینی موردبررسی قرار گیرد. در این راستا، ابتدا مطالعات پیشین مرتبط با آلودگی ناشی از محل‌های دفن زباله موردبررسی قرار گرفته و سپس در بخش آزمایشگاهی، نمونه‌های خاک در تماس با شیرابه قرار داده شده و تغییرات پارامترهای مقاومتی آن‌ها ارزیابی شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند در درک بهتر اثرات ژئوتکنیکی و زیست‌محیطی شیرابه و هم‌چنین در مدیریت و کنترل مخاطرات ناشی از محل‌های دفن زباله مؤثر باشد.

۲. مروری بر ادبیات پژوهش

در مطالعات متعددی در سطح ملی و بین‌المللی به بررسی اثرات زیست‌محیطی محل‌های دفن پسماند شهری پرداخته‌اند. یکی از مهم‌ترین پیامدهای این مراکز، تولید شیرابه و نفوذ آن به خاک و منابع آب زیرزمینی است که می‌تواند موجب آلودگی گسترده محیط‌زیست و ایجاد مخاطرات بهداشتی برای انسان شود. پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه را می توان به‌طور کلی در چند محور اصلی شامل بررسی آلودگی آب‌های زیرزمینی، مدل‌سازی انتقال آلاینده‌ها، ارزیابی آلودگی خاک و مطالعه اثر شیرابه بر رفتار ژئوتکنیکی خاک طبقه‌بندی کرد.

۲. ۱. مطالعات مرتبط با آلودگی آب‌های زیرزمینی

بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه محل‌های دفن زباله به بررسی اثر نفوذ شیرابه بر کیفیت منابع آب زیرزمینی اختصاص یافته است. این مطالعات به‌طورعمده با نمونه‌برداری از چاه‌ها، چشمه‌ها و منابع آبی اطراف محل دفن و اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب انجام می‌شوند.

Khanlari (2015) در پژوهشی به بررسی اثر محل دفن زباله بر کیفیت منابع آب زیرزمینی در شهر همدان پرداخت. در این پژوهش به‌منظور ارزیابی میزان آلودگی ناشی از شیرابه، نمونه‌برداری از پنج حلقه چاه آب و دو چشمه در محدوده اطراف محل دفن زباله انجام شد. در نمونه‌های برداشت‌شده پارامترهای مختلف کیفی شامل EC، pH و غلظت عناصر

سنگین موردانداز‌ه‌گیری قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش و حضور برخی فلزات سنگین در نمونه‌های آب می‌تواند ناشی از نفوذ شیرابه به لایه‌های زیرسطحی باشد. این پژوهش هم‌چنین نشان داد که تولید روزانه حدود ۵۰۰ تن زباله در شهر همدان و دفن آن در محلی با وسعت تقریبی ۲۴۰ هکتار، در صورت نبود لایه‌های محافظ و سیستم جمع‌آوری شیرابه، می‌تواند خطر آلودگی منابع آب زیرزمینی منطقه را افزایش دهد و شرایط زمین‌شناختی و هیدرولوژیک محل دفن، نقش مهمی در گسترش آلودگی دارد.

در مطالعه‌ای دیگر، Jamshidi *et al.* (2013) تأثیر شیرابه محل دفن زباله دوپشته دشت‌روم در نزدیکی شهر یاسوج را بر کیفیت آب چاه‌های شرب منطقه تنگ‌کناره موردبررسی قرار دادند. در این مطالعه از آب شرب حلقه چاه شماره ۶ تنگ کناره نمونه‌برداری شد و در مجموع ۲۶ پارامتر کیفی آب به روش‌های استاندارد متد و استاندارد هک مورد آنالیز قرار گرفت. نمونه‌برداری در دو دوره زمانی شامل فصل خشک و فصل تر انجام شد تا تغییرات فصلی نیز در تحلیل نتایج لحاظ شود. نتایج بررسی‌ها نشان داد که در بیش‌تر نمونه‌ها پارامترهای کیفی در محدوده استاندارد قرار دارند، اما در برخی چاه‌ها غلظت سرب و سختی کل از مقادیر مجاز بالاتر بوده است. پژوهش‌گران دلیل این امر را عبور جریان آب زیرزمینی از لایه‌های زمین‌شناسی حاوی ترکیبات آهکی و عناصر فلزی عنوان کردند. هم‌چنین مشاهده شد که در فصل تر به‌دلیل افزایش نفوذپذیری و انتقال آلاینده‌ها، غلظت برخی پارامترهای شیمیایی افزایش می‌یابد. این نتایج بیانگر آن است که در بلندمدت احتمال آلودگی منابع آب پایین‌دست محل دفن وجود دارد و لازم است اقدامات مدیریتی و حفاظتی مناسب برای جلوگیری از گسترش آلودگی اتخاذ شود.

مطالعه انجام‌شده توسط Rotaru *et al.* (2008) درباره آلودگی آب‌های زیرزمینی ناشی از مراکز ذخیره و دفن پسماند نشان داد که در میان انواع مخاطرات زمین‌شناسی، خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین و پرریسک‌ترین مخاطرات محسوب می‌شود. نتایج این پژوهش بیانگر آن است که عواملی نظیر جنس خاک، عمق سطح ایستابی، ترکیب شیمیایی شیرابه و میزان بارندگی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در آسیب‌پذیری آبخوان‌ها در برابر آلودگی هستند.

۲. ۲. ارزیابی شاخص‌های آلودگی خاک

در کنار مطالعات مربوط به کیفیت آب، برخی پژوهش‌ها به بررسی میزان آلودگی خاک در اطراف محل‌های دفن پرداخته‌اند. در این مطالعات معمولاً از شاخص‌های کمی برای ارزیابی شدت آلودگی استفاده می‌شود.

Mohibi Najmabad *et al.* (2011) با هدف بررسی آلودگی خاک در محدوده تصفیه‌خانه و محل دفن زباله شهر نیشابور، ضریب آلودگی صنعتی CIP را محاسبه کردند. در این پژوهش غلظت شش عنصر سنگین شامل Pb، Cu، Cr، Zn، Ni و Co در نمونه‌های خاک سطحی از عمق ۵ تا ۳۰ سانتی‌متری و در ۱۱ ایستگاه نمونه‌برداری اندازه‌گیری شد. آنالیز نمونه‌ها با استفاده از روش جذب اتمی انجام گرفت. رابطه (۱) نحوه محاسبه ضریب آلودگی صنعتی در نمونه‌های خاک را نشان می‌دهد. این شاخص از تقسیم پارامتر C_i (mg/kg) میانگین غلظت فلزات منتخب در خاک نقاط نمونه‌برداری بر پارامتر C_{avg} (mg/kg) میانگین همان فلزات در خاک سطحی کل منطقه به‌دست می‌آید و می‌تواند برای تعیین میزان آلودگی خاک‌های سطحی به عناصر سمی مورداستفاده قرار گیرد.

$$CIP = C_i / C_{avg}$$ رابطه ۱)

نتایج این مطالعه نشان داد که در برخی نقاط محدوده موردمطالعه مقدار شاخص CIP بیش‌تر از یک بوده که بیانگر غنی‌شدگی عناصر سنگین و تأثیر فعالیت‌های انسانی بر ترکیب شیمیایی خاک منطقه است. موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری و توزیع شاخص آلودگی در محدوده لندفیل نیشابور در شکل (۱) ارائه شده است.



Figure 1. CIP industrial pollution index in soil sampels of Neishabur landfill area

در مطالعات انجام‌شده در مالزی (Hussein *et al*., 2019)، شاخص آلودگی شیرابه LPI در محل‌های دفن فعال و غیرفعال محاسبه شد و نتایج نشان داد که غلظت فلزات سنگین در بسیاری از نمونه‌ها فراتر از حدود مجاز تخلیه بوده است. این مطالعه بر ضرورت پایش پساب و مدیریت پس از بهره‌برداری محل دفن تأکید دارد.

۲. ۳. مدل‌سازی انتقال آلودگی ناشی از شیرابه

در کنار مطالعات پایشی، برخی پژوهش‌گران از مدل‌های عددی برای پیش‌بینی مسیر و بررسی سرعت حرکت آلاینده‌ها استفاده کرده‌اند.

Azizi *et al*. (2017) با بهره‌گیری از مدل‌های MODFLOW، MT3DMS و MODPATH، انتقال آلاینده‌های ناشی از شیرابه محل دفن شهر San Angelo آمریکا را شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که در شرایط موجود، آلاینده‌ها طی حدود ۲۱۵۸ روز به چاه آب شرب پایین‌دست می‌رسند. اعمال سناریوهای مدیریتی مختلف در مدل، تغییراتی در زمان و مسافت انتقال ایجاد کرد، اما در نهایت خطر رسیدن آلاینده به منبع آب پابرجا باقی ماند.

این‌گونه مطالعات نشان می‌دهد که مدل‌سازی عددی ابزار قدرتمندی برای پیش‌بینی بلندمدت مخاطرات زیست‌محیطی است و می‌تواند در طراحی سیستم‌های حفاظتی و تعیین حریم ایمنی محل‌های دفن نقش کلیدی ایفا کند. انتقال آلودگی ناشی از شیرابه در اطراف محل دفن زباله San Angelo در ایالات متحده پرداختند. در این پژوهش از مدل‌های عددی MODFLOW، MODPATH و MT3DMS برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و مسیر حرکت آلاینده‌ها استفاده شد. هدف اصلی این پژوهش پیش‌بینی نحوه گسترش آلودگی ناشی از شیرابه و ارزیابی احتمال رسیدن آن به چاه‌های آب شرب پایین‌دست بود. نتایج مدل‌سازی نشان داد که با توجه به شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه، آلاینده‌ها می‌توانند در طول زمان در مسیر جریان آب زیرزمینی حرکت کرده و در صورت نبود اقدامات کنترلی، منابع آب زیرزمینی را تحت تأثیر قرار دهند. این نوع مدل‌سازی‌ها با اعمال سه سناریو در شکل (۲) ارائه شده است که ابزار مهمی برای پیش‌بینی رفتار آلاینده‌ها و برنامه‌ریزی مدیریتی در محل‌های دفن پسماند محسوب می‌شوند.

۲. ۴. تأثیر شیرابه بر رفتار ژئوتکنیکی خاک

در سال‌های اخیر، توجه پژوهش‌گران از صرف ارزیابی آلودگی شیمیایی به بررسی اثرات مکانیکی شیرابه بر خاک نیز معطوف شده است.

Ebrahimi & Khari (2018) در پژوهشی آزمایشگاهی با بررسی خاک‌های آلوده به شیرابه مجتمع آرادکوه نشان دادند که آلودگی می‌تواند موجب تغییر در خصوصیات مکانیکی خاک شود و استفاده از نانوسیلیس آمورف که در شکل (۳) قابل مشاهده است. باعث بهبود مقاومت و کاهش نفوذپذیری گردد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی شیرابه قادر است ساختار ریزدانه‌ای خاک را تغییر داده و بر پارامترهای مقاومتی آن اثر بگذارد.

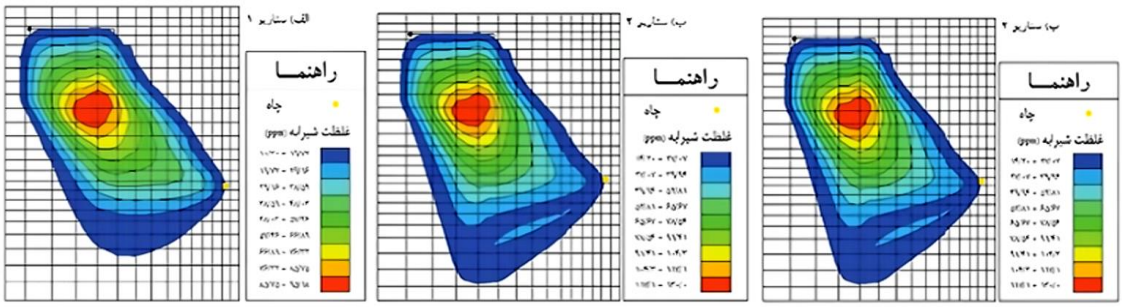


Figure 2. Migration of leachate pollutants from the San Angelo landfill: Scenarios 1, 2, and 3



Figure 3. Manual mixing of soil with amorphous nanosilica

۲. ۵. روش‌های ارزیابی پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی

در این پژوهش، از روش الکنو جدول (۱) برای ارزیابی پتانسیل آلودگی استفاده شده است. این روش سه عامل اصلی شامل میزان بارندگی سالانه، جنس خاک و فاصله سطح ایستابی از کف محل دفن را در نظر می‌گیرد که با استفاده از آن، درجه تناسب زمین انتخابی می‌تواند تعیین گردد. نمره‌گذاری آن به شرح جدول زیر می‌باشد.

Table 1. Evaluation of groundwater contamination using the Olekno method

Index	Soil Depth (m)	Index	Soil type	Index	Average annual rainfall (mm)
3	1.5-3	12	Silt and clay or sand and clay	21	<250
7	3-6	5	Silt and sand	7	255-760
8	6-9	4	Mud	6	760-1780
9	9>	0	Gravel or coarse sand		

۲. ۶. جمع‌بندی خلأ پژوهشی

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که:

– اغلب پژوهش‌ها بر پایش کیفی آب زیرزمینی متمرکز بوده‌اند؛

– مدل‌سازی عددی بیش‌تر با هدف پیش‌بینی انتقال آلاینده انجام شده است؛

– مطالعات ژئوتکنیکی مرتبط با تغییر پارامترهای مقاومت برشی خاک در اثر تماس با شیرابه محدود است؛

– رویکردی یکپارچه که هم‌زمان به جنبه‌های زیست‌محیطی و پایداری مکانیکی محل دفن بپردازد، کم‌تر ارائه شده است.

بر این اساس، پژوهش حاضر با ترکیب مطالعات مروری و آزمایش‌های ژئوتکنیکی، تلاش دارد ارتباط میان نفوذ شیرابه، تغییر پارامترهای مقاومت برشی خاک و پیامدهای آن بر پایداری محل دفن و آلودگی آب‌های زیرزمینی را به‌صورت جامع بررسی کند.

۳. روش‌شناسی پژوهش

۳. ۱. نقشه‌راه روش پژوهش و پژوهش موردمطالعه

به‌منظور دست‌یابی به اهداف پژوهش و برای درک بهتر فرایند رسیدن به پاسخ سوال‌های مطالعاتی که انجام شده است، نقشه‌راه و تصویرگرافیکی روش پژوهش و مراحل مختلف کار در شکل (۴) نمایش داده شده است. تشریح گام‌های مذکور در ادامه ارائه می‌گردد.

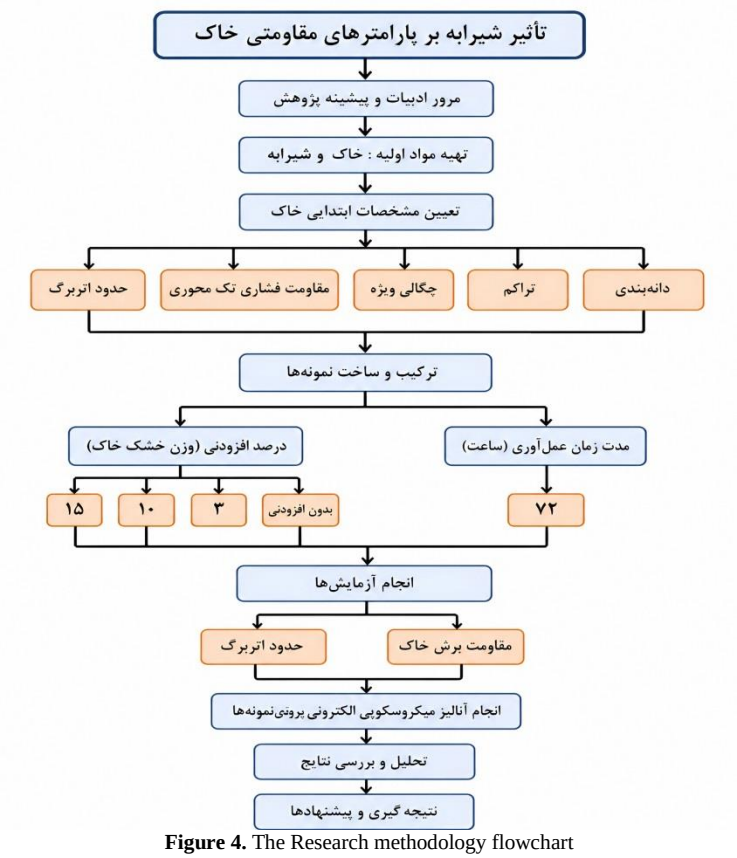


Figure 4. The Research methodology flowchart

۳. ۲. منطقه موردمطالعه

مجتمع پردازش و بازیافت زباله آرادکوه کهریزک شکل (۵) در کیلومتر ۲۳ جاده قدیم تهران–قم و در جنوب کهریزک واقع شده است. این مرکز روزانه به‌طور متوسط ۸۰۰۰ تن انواع پسماندهای مختلف از منابع مختلف تولید، همچون مناطق ۲۲ گانه، شهرک و شهرهای اطراف، مراکز بهداشتی و درمانی لجن و سرشاخه و غیره جهت امحا و دفن به این مرکز ارسال می‌شود. اطلاعات فوق همگی از گزارش‌های سازمان بازیافت و تبدیل مواد شهر تهران در سال ۱۳۸۵ جمع‌آوری شده است.

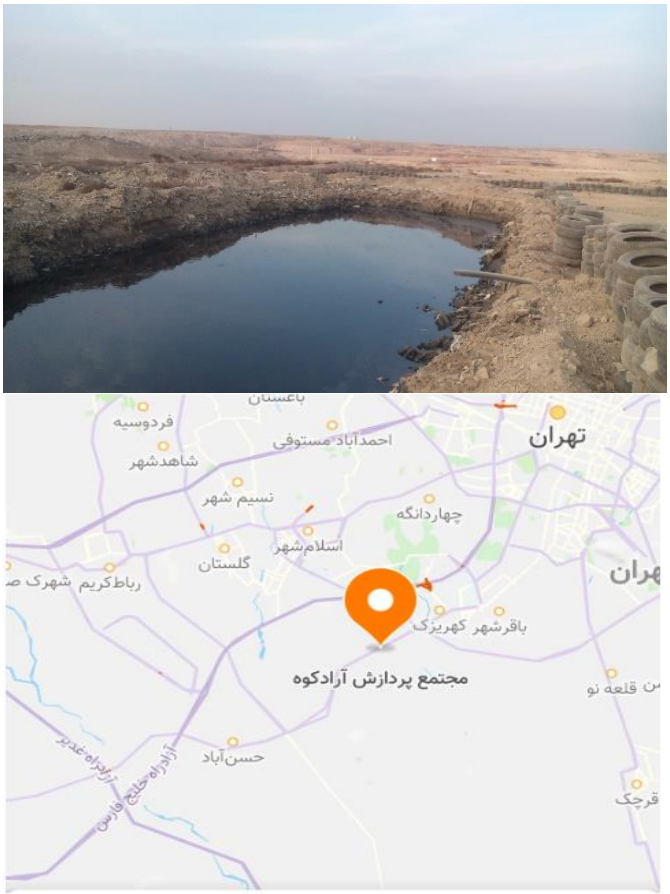


Figure 5. Location of the study area at the Aradkoh landfill

۳. ۳. مشخصات شیرابه مصرفی موردمطالعه

شیرابه این پژوهش از محل دفن زباله‌های جامد شهری مجنمع پردازش آرادکوه درجنوب کهریزک جمع‌آوری شده است. مشخصات شیرابه مذکور (Oveisi *et al.*, 2006) توسط آزمایش جذب اتمی شعله‌ای، آنالیز خطی و صفحه‌ای میکروسکوپ الکترونی تعیین و در جدول (۲) ارائه شده است. لازم به توضیح است که اگرچه مشخصات شیمیایی شیرابه مورداستفاده مربوط به بازه زمانی سال ۲۰۰۶ میلادی است و مسلماً ترکیب شیرابه در طول زمان تحت تأثیر سن محل دفن زباله، تغییر در الگوی مصرف شهروندان و نوع پسماندهای ورودی تغییر می‌کند، اما هدف بنیادین این پژوهش بررسی ماهیت رفتار آلاینده‌ها و اثرات کلی حضور آن‌ها بر خصوصیات مکانیکی خاک بوده است. لذا این داده‌ها به‌عنوان

یک نمونه نماینده (Representative Sample) جهت شبیه‌سازی شرایط بحرانی آلودگی و درک واکنش‌های پایه خاک مبنا قرار گرفته‌اند.

Table 2. Characteristics of leachate produced at the Aradkoh landfill

Parameter	Value	Parameter	Value
pH	5.011	Sulphate (mg / lit)	3500
COD (mg / lit)	55500	Chloride(mg / lit)	8000
BOD (mg / lit)	24855	Bicarbonate (ms / cm)	17600
Nitrate (mg / lit)	80	EC(mg / lit)	33,3
Phosphate (mg / lit)	275	TDS (g / lit)	17.04

نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد شیرابه زباله کهریزک که حاصل سال‌ها دفن غیربهداشتی زباله در این مکان می‌باشد جزو خطرناک‌ترین شیرابه زباله در جهان است. عدم وجود سیستم جمع‌آوری شیرابه به‌صورت مهندسی سبب می‌شود که شیرابه ناشی از متراکم‌شدن زباله‌ها به‌صورت طبیعی مسیر خود را پیدا کند و باتوجه به شیب منطقه تقریباً در قسمت شمالی محل دفن کهریزک، شکل (۵) دریاچه بزرگی از شیرابه تشکیل شود. خطر و تهدید اصلی شیرابه حاصل از مراکز دفن زباله، نفوذ این مایع آلوده به آب‌های زیرزمینی، خاک و چاه های اطراف می‌باشد. به‌طوری که یک لیوان شیرابه زباله می‌تواند حداقل ۲۰۰ لیتر آب زیرزمینی را آلوده کند. وجود COD بالاتر از ۵۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در این شیرابه و مقایسه آن با شیرابه تولیدشده در کشورهای صنعتی که به سختی COD آن به ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد، این نکته را یادآور می‌شود، که اقدامات اساسی برای کنترل و مهار این مایع خطرناک باید صورت گیرد. زیرا این میزان شیرابه با چنین بار آلودگی می تواند عامل خطرسازی برای محیط زیست و به‌ویژه آب‌های زیرزمینی باشد.

۳. ۴. روش ساخت نمونه و شبیه‌سازی آلودگی

برای شبیه‌سازی آلودگی، از روش اختلاط مستقیم خاک با درصدهای مشخص شیرابه سه، ۱۰ و ۱۵ درصد استفاده شده است. این روش امکان توزیع یکنواخت آلودگی در نمونه و بررسی اثرات آن را در مقیاس آزمایشگاهی فراهم کرده است. درصدهای اختلاط به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که شرایط آلودگی خفیف تا شدید را بازنمایی کنند و رفتار خاک را در برابر افزایش تدریجی شیرابه ارزیابی نمایند. این روش ضمن کنترل دقیق شرایط آزمایش و حذف اثر ناهمگنی فضایی، امکان مطالعه اثرات بلندمدت نفوذ شیرابه را در بازه زمانی کوتاه فراهم آورده است. بنابراین، اختلاط خاک و شیرابه در این پژوهش به‌عنوان یک مدل تسریع‌شده و کنترل‌شده برای بررسی اثرات بلندمدت نفوذ شیرابه در خاک در نظر گرفته شده است.

۳. ۵. تعیین درصد رطوبت خاک

گام نخست، تعیین درصد رطوبت خاک مطابق با استاندارد ASTM D2216-98 انجام شده است (ASTM, 2012). ابتدا وزن ظرف سنجش رطوبت (۴۲ گرم) تعیین گردیده است. سپس نمونه خاک مرطوب داخل ظرف قرار گرفته و وزن ظرف و خاک مرطوب (۲۷۰ گرم) اندازه‌گیری شده است. پس از کسر وزن ظرف، وزن خالص خاک مرطوب محاسبه گردیده است. سپس ظرف حاوی نمونه به‌مدت ۱۲ ساعت در گرمخانه الکتریکی با دمای ۱۰۵ تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته است تا رطوبت آن کاملاً تبخیر شود. پس از اتمام زمان یادشده، نمونه از گرمخانه خارج و وزن ظرف و خاک خشک توزین شده است. با کسر وزن ظرف، وزن ذرات جامد W_S (۲۴۵ گرم) و وزن آب تبخیرشده W_w (۲۵ گرم) به‌دست آمده است. در شکل (۶) قابل مشاهده است. در نهایت، درصد رطوبت نمونه برابر با ۱۰/۲ درصد محاسبه گردیده است.



Figure 6. Image related to the soil moisture content determination test

۳. ۶. مشخصات نمونه خاک موردمطالعه و دانه‌بندی

آزمایش دانه‌بندیبراساس براساس استاندارد ASTM D422-63 انجام شد. ابتدا مقدار مشخصی از خاک در گرمخانه الکتریکی با دمای ۱۰۵ تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۱۲ ساعت خشک گردید. سپس با استفاده از چکش لاستیکی، کلوخه‌ها خرد شدند تا ذرات به‌هم‌چسبیده جدا شوند. پس از وزن‌کردن خاک خشک، مجموعه‌ای از الک‌های استاندارد متناسب با دانه‌بندی خاک انتخاب شد و خاک در الک بالایی ریخته شد. برای کاهش خطای ناشی از چسبندگی ذرات ریز به ذرات درشت، از روش آبشویی، استفاده گردید (Ibn Jalal & Shafaei Bajestan, 2004). در نهایت، مجموعه الک‌ها به‌مدت ۵ تا ۱۰ دقیقه توسط شیکر الکتریکی تکان داده شد، وزن خاک باقی‌مانده در هر الک اندازه‌گیری گردید و منحنی دانه‌بندی مطابق شکل (۷) رسم شد.

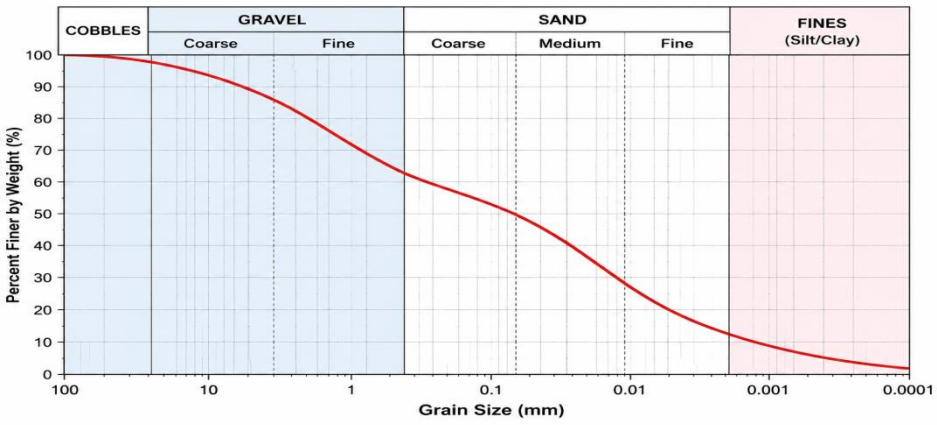


Figure 7. Soil grain size distribution curve

۳. ۷. روش ساخت نمونه برای آزمایش مستقیم

نمونه‌های خاک پس از خشک‌شدن کامل، با مقادیر سه، ۱۰ و ۱۵ درصد وزن خشک خاک، با شیرابه مخلوط شدند. برای کنترل دقیق رطوبت و اطمینان از افزودن عناصر شیرابه با نسبت‌های مشخص، نمونه‌ها در دمای محیط قرار گرفتند تا رطوبت اضافی ناشی از شیرابه کاهش یابد. با توجه به حجم قالب دستگاه، مقدار خاک لازمبراساس براساس وزن مخصوص مشخص شد. سپس خاک‌های آلوده به‌صورت استاتیکی در سه لایه درون قالب ریخته و متراکم شدند. جهت ایجاد درگیری بهتر بین لایه‌ها، سطح هر لایه پس از رسیدن به ارتفاع موردنظر شیار زده شد. تصویر مراحل تراکم و وضعیت نمونه پس از برش (شکست) در شکل (۸) نمایش داده شده است.



(A) (B)

Figure 8. The Direct Shear Test; (A) the sheared sample after loading and (B) compaction stages the sheared sample after

انجام آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D3080 (ASTM, 2012) و با استفاده از روش تراکم کاهش‌یافته Ladd (1978) برای دست‌یابی به چگالی یکنواخت انجام شد. پس از آماده‌سازی، دستگاه با سرعتی بین ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر بر دقیقه بارگذاری را آغاز کرد. در طول آزمایش، میزان جابه‌جایی نمونه متناظر با تغییرات نیرو از روی ساعت اندیکاتور ثبت شد. این فرایند با افزایش وزنه‌های اعمالی تکرار گردید و در نهایت، منحنی برش مستقیم برای نمونه شاهد مطابق با جدول (۳) و شکل (۹) ترسیم شده است.

Table 3. Specification regarding the data and calculation of the Direct shear test for the control sample

Test no.	Symbol	σ_n (kg/cm^2)	τ_{max} (kg/cm^2)	axm-hΔ (mm)	τ_{ult} (kg/cm^2)	ult-hΔ (mm)	Disp.rate (mm/min)
1		1.00	0.54	5.5	0.35	7.00	0.125
2		2.00	0.54	6.00	0.42	7.50	0.125
3		3.00	0.87	6.5	0.67	8.00	0.125
C=0.32 kg/cm^2 , φ =18,3°							

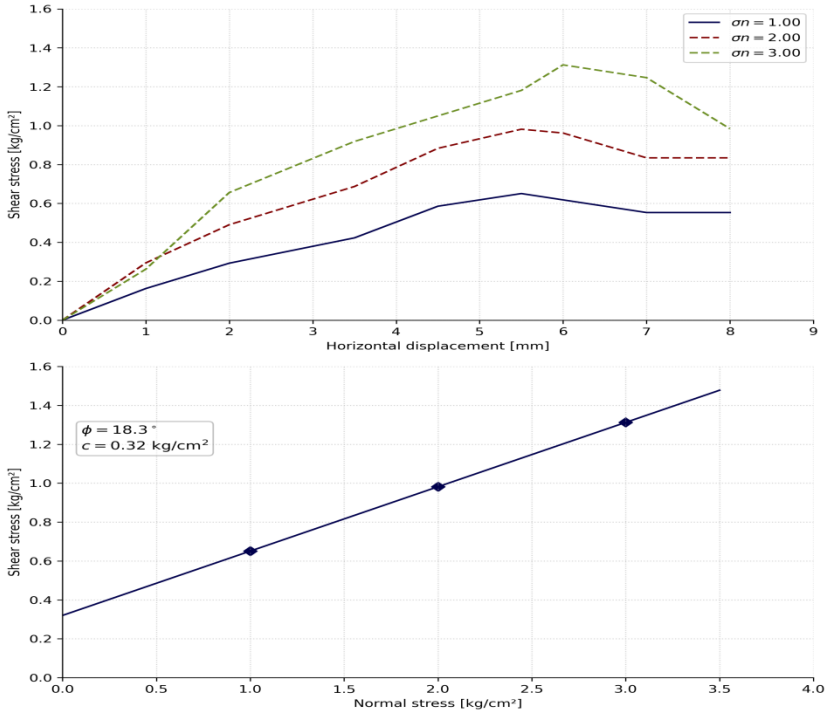


Figure 9. Chart of the results for the Direct Shear Test of the contorol soil sample

۴. یافته‌های پژوهش

۴. ۱. تفسیر نتایج آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ خاک

حدود اتربرگ از شاخص‌های مهم شناسایی و توصیف خاک به‌ویژه برای خاک‌های ریزدانه می‌باشد. آزمایش تعیین حدود اتربرگ و نمونه‌سازی براساس استاندارد ASTM D422-63 انجام پذیرفت که شامل تعیین حد روانی خاک مطابق جدول (۴) و نمودار شکل (۱۰) و حد خمیری می‌باشد انجام شده است.

Table 4. Specification regarding the data and calculation of the Atterberg limits test for the control sample

Sample Number	Blows Range	Number of Blows	Dry Sample Weight	Wet Sample Weight	Container Weight
A	35-25	30	30.63	38.29	4.29
B	30-20	28	32.63	38.57	4.57
C	25-15	22	34.63	38.85	4.85

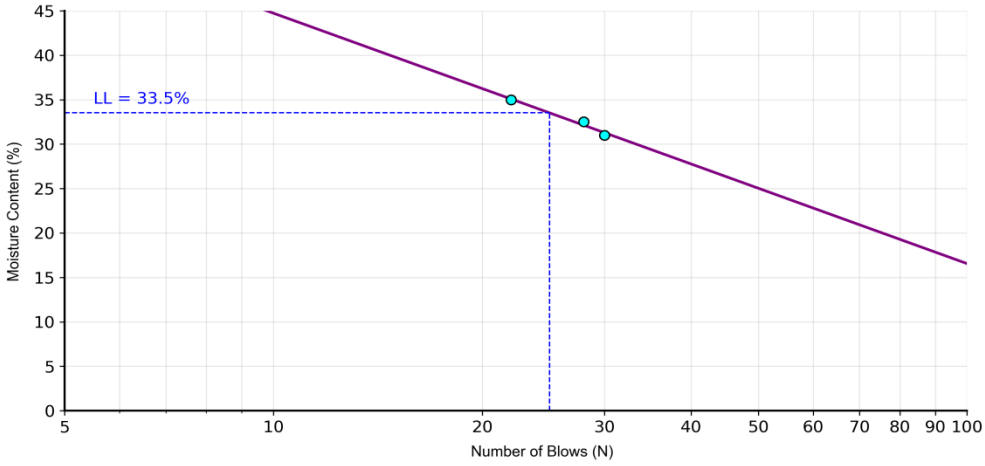


Figure 10. Chart of the results for the Liquid Limit of the contorol soil sample

آزمایش تعیین وزن مخصوص ظاهری ذرات جامد Gs نیز براساس استاندارد ASTM D854[۶] انجام پذیرفت که نتایج آن و آزمایش‌های حدود اتربرگ برای خاک با طبقه‌بندی CL در حضور درصدهای مختلف شیرابه در جدول (۵) ارائه شده است.

Table 5. Atterberg limits test results

GS	w	LL	PL	PI	Classification
2.65	10.2%	33.3	20	13.3	CL
Atterberg Limits	Sample with 3% leachate	30	20	10	CL
Atterberg Limits	Sample with 10% leachate	29	19	10	CL
Atterberg Limits	Sample with 15% leachate	27	19	8	CL

همان‌طورکه مشاهده می‌شود، واکنش خاک نسبت به حضور شیرابه بسته به خصوصیات شیمیایی آن به‌ویژه pH متفاوت است. با توجه به اینکه تاکنون اجماع کلی در مورد نحوه تغییرات حدود اتربرگ در اثر نفوذ شیرابه وجود ندارد، در این پژوهش رفتار خاک در برابر شیرابه اسیدی (pH=۵) بررسی شد تا با نتایج دستاورد سایر پژوهش‌گران از جمله Ouria & Farsijani (2019a) که بر روی شیرابه‌های قلیایی مطالعه کرده‌اند، مقایسه گردد.

براساس یافته‌های این پژوهش جدول (۵)، با افزایش درصد شیرابه اسیدی از صفر به ۱۵ درصد، مقدار حد روانی از ۳۳/۳ به ۲۷ کاهش یافته است. درحالی‌که حد خمیری تغییر محسوسی نداشته و تقریباً ثابت مانده است. در نتیجه، شاخص خمیری PI طبق نمودار شکل (۱۱) کاهش یافته است.

در مقابل، با بررسی نتایج پژوهش‌های گذشته در محیط‌های قلیایی (pH=۸/۷) مطابق با شکل (۱۱)، مشاهده می‌شود که با افزایش درصد شیرابه، حد روانی و در نتیجه آن، شاخص خمیری به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. این تفاوت رفتاری نشان می‌دهد که اسیدی‌بودن شیرابه با تأثیر بر ضخامت لایه دوگانه نفوذی Diffuse Double Layer (DDL) و ایجاد پدیده لخته‌شدن در برابر پراکنش ذرات رس (Flocculation vs. Dispersion)، منجر به کاهش خاصیت خمیری خاک می‌گردد. این پدیده باعث کاهش توانایی ذرات رس در جذب آب شده و در نهایت کاهش حد روانی را در پی دارد. درحالی‌که محیط‌های قلیایی اثر معکوسی بر پلاستیسیته خاک‌های ریزدانه دارند در محیط‌های قلیایی با ایجاد شرایط پراکنش (Dispersion) و افزایش ضخامت لایه دوگانه، منجر به افزایش پتانسیل تورم و بالارفتن حد روانی خاک می‌شوند.

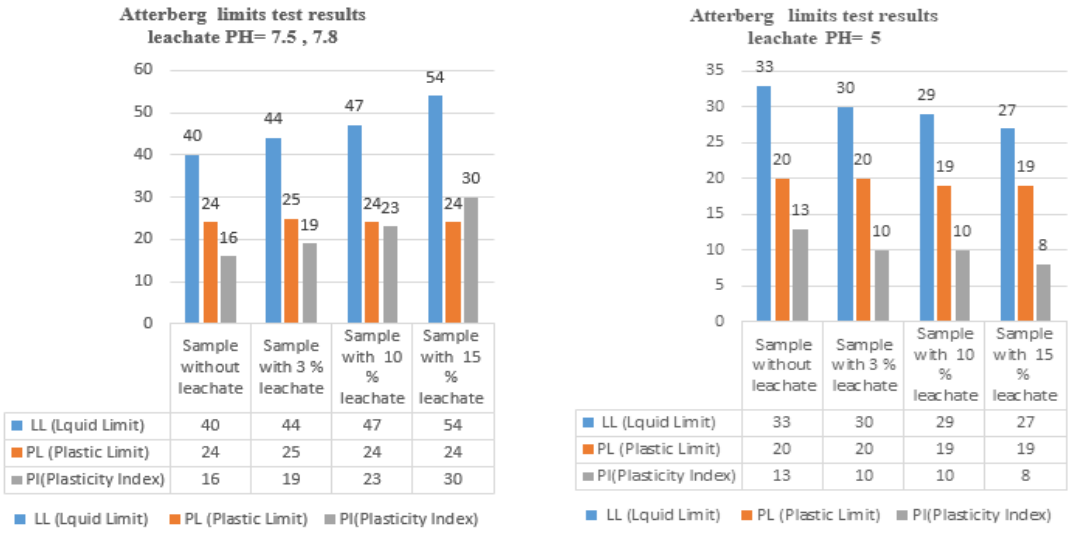


Figure 11. Chart of the Atterberg Limits test results for the leachate-contaminated soil with; (A) pH =7.8 and (B) pH =5

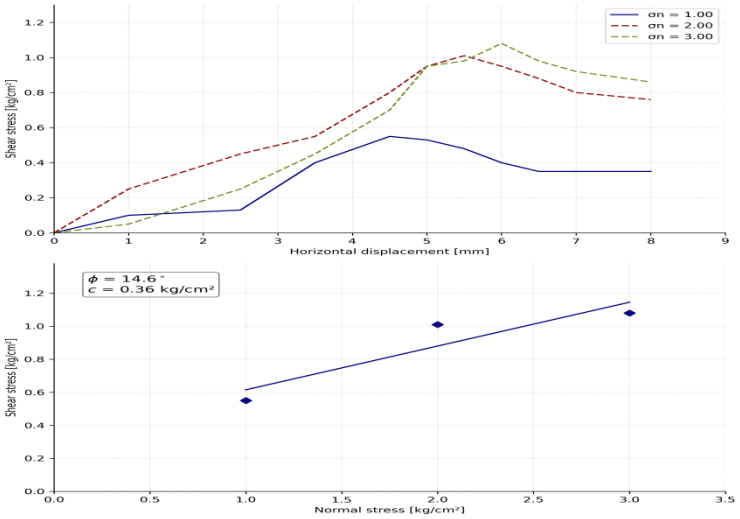
۴. ۲. تفسیر یافته‌های آزمایش‌های برش مستقیم

آزمایش برش مستقیم یکی از متداول‌ترین روش‌های ارزیابی مقاومت برشی خاک در مطالعات ژئوتکنیکی است و برای بررسی تغییرات پارامترهای مقاومتی در اثر آلودگی نیز کاربرد گسترده‌ای دارد. در این پژوهش، چهار گروه آزمایش شامل نمونه شاهد و نمونه‌های آلوده به شیرابه با درصدهای سه، ۱۰ و ۱۵ انجام شد. نتایج حاصل از نمودارهای شکل (۱۲) حاصل از برش مستقیم نشان می‌دهد، با افزایش میزان شیرابه از سه تا ۱۵ درصد، مقاومت برشی خاک به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد.

از دیدگاه مکانیسمی، این رفتار را می‌توان ناشی از چند عامل دانست. نخست آنکه ترکیبات آلی محلول، نمک‌ها و یون‌های موجود در شیرابه می‌توانند باعث تغییر در آرایش ذرات ریزدانه و کاهش نیروی جاذبه بین آن‌ها شوند. دوم آنکه نفوذ این ترکیبات در فضاهای بین‌ذره‌ای ممکن است موجب تغییر در ضخامت لایه مضاعف الکتریکی و در نتیجه تغییر در نحوه تماس و قفل و بست ذرات خاک گردد. هم‌چنین برخی ترکیبات موجود در شیرابه می‌توانند با تشکیل لایه‌ای بر سطح ذرات، میزان اصطکاک مؤثر را کاهش دهند. بنابراین، هرچند در این مطالعه سنجش مستقیم واکنش‌های شیمیایی انجام نشده است، اما اثرات آن‌ها در پاسخ مکانیکی خاک به‌وضوح مشاهده می‌شود.

Table 6. Specification regarding the data and calculation of the Direct shear test results with; (A) 3% leachate

Test no.	Symbol	σ_n (kg/cm^2)	τ_{max} (kg/cm^2)	axm-hΔ (mm)	τ_{ult} (kg/cm^2)	ult-hΔ (mm)	Disp.rate (mm/min)
1		1.00	0.55	5.00	0.41	6.1	0.125
2		2.00	1.01	6.00	0.76	7.20	0.125
3		3.00	1.08	7.00	0.86	7.90	0.125
C=0.36 kg/cm^2 , φ =14,6°							

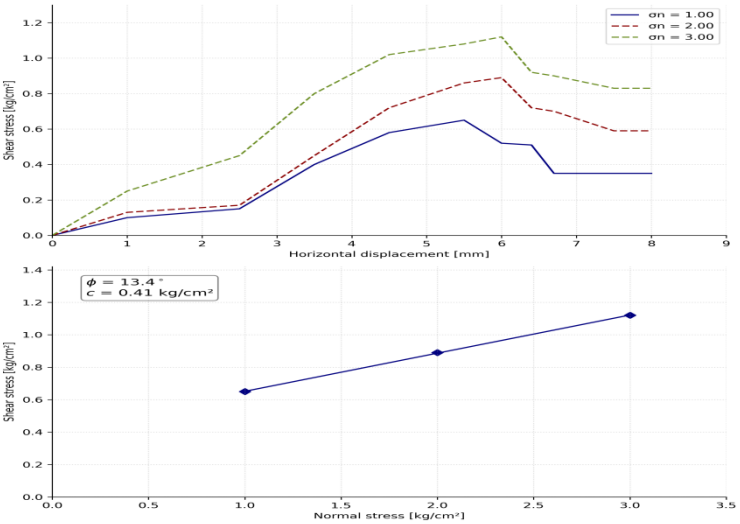


(A)

Figure 12. Chart of the Direct Shear Test results with; (A) 3%

Continued table 6. Specification regarding the data and calculation of the Direct shear test results with; (B) 10% leachate sample

Test no.	Symbol	σ_n (kg/cm^2)	τ_{max} (kg/cm^2)	h-maxΔ (mm)	τ_{ult} (kg/cm^2)	ult-hΔ (mm)	Disp.rate (mm/min)
1		1.00	0.65	5.5	0.35	6.7	0.125
2		2.00	0.89	6.00	0.59	7.30	0.125
3		3.00	1.12	6.5	0.83	7.87	0.125
C=0.41 kg/cm^2 , φ =13,4°							

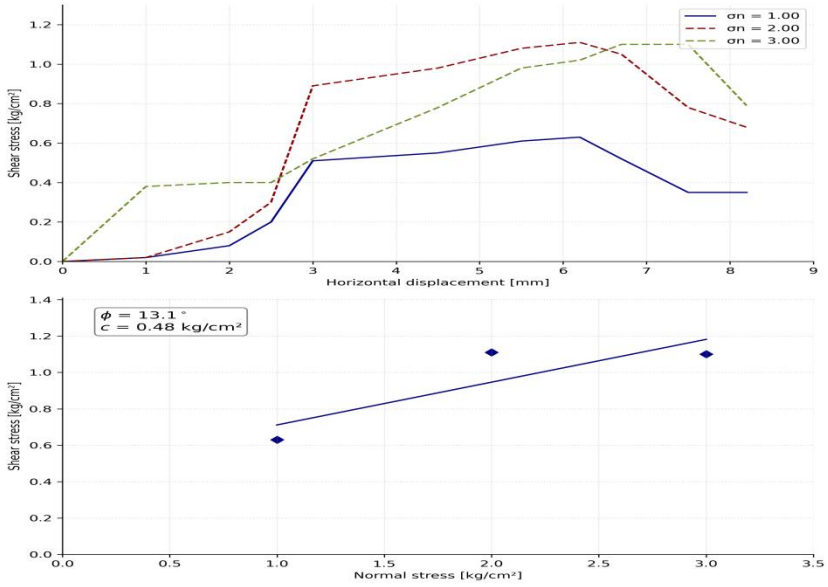


(B)

Continued figure 12. Chart of the Direct Shear Test results with; (B) 10%

Continued table 6. Specification regarding the data and calculation of the Direct shear test results with; (C) 15% leachate

Test no.	Symbol	σ_n (kg/cm^2)	τ_{max} (kg/cm^2)	Δh_{max} (mm)	τ_{ult} (kg/cm^2)	Δh_{ult} (mm)	Disp.rate (mm/min)
1		1.00	0.65	6.1	0.35	7.20	0.125
2		2.00	1.11	6.70	0.68	7.90	0.125
3		3.00	1.10	7.3	0.79	8.4	0.125
C=0.48 kg/cm^2 , φ =13,1°							



(C)

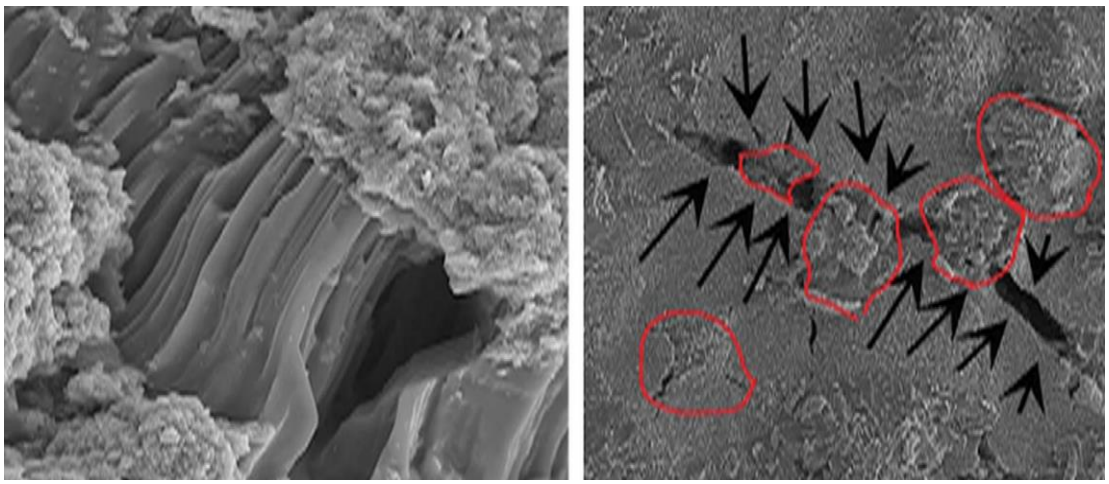
Continued figure 12. Chart of the Direct Shear Test results with; (C) 15% leachate-contaminated soil

مشاهدات حاکی از آن است که با افزایش درصد شیرابه، زاویه اصطکاک داخلی از ۱۴/۶ درجه به ۱۳/۱ درجه کاهش یافته است. اگرچه افزایش جزئی در چسبندگی C در نمونه‌های آلوده مشاهده می‌شود، اما روند کلی مقاومت برشی نشان‌دهنده کاهش است. برخی پژوهش‌گران نظیر Oztoprak & Pisirici (2011) معتقدند حضور شیرابه در کوتاه‌مدت می‌تواند به‌دلیل ماهیت چسبناک و ویسکوزِ آن، منجر به ایجاد پیوندهای سیمانته (Cementation) و افزایش اندک چسبندگی شود. با این‌حال، همان‌طورکه در پژوهش‌های Pming *et al.* (2016) و Goswami & Choudhury (2013) اشاره شده، این افزایش چسبندگی در بلندمدت پایدار نبوده و عامل مؤثری در ارتقای مقاومت برشی خاک محسوب نمی‌شود. در حقیقت، کاهش زاویه اصطکاک داخلی به‌دلیل، حضور آلاینده‌ها با ایجاد یک لایه لغزنده بر روی سطوح ذرات و تغییر در درگیری مکانیکی آن‌ها، باعث کاهش اصطکاک شده و این اثر منفی تخریب درگیری میان‌ذره‌ای، اثر مثبت افزایش ناچیز چسبندگی را خنثی کرده و منجر به کاهش مقاومت برشی نهایی گردیده است.

از منظر نقد و تحلیل نتایج باید توجه داشت که میزان کاهش مقاومت برشی در نمونه‌های آلوده، فقط یک نتیجه آزمایشگاهی ساده نیست، بلکه از دیدگاه مهندسی پیامد مهمی برای پایداری خاک‌های مجاور محل‌های دفن پسماند دارد. در چنین شرایطی، کاهش مقاومت برشی می‌تواند ظرفیت باربری خاک را کم کرده، احتمال نشست و تغییر شکل را افزایش دهد و در صورت تداوم آلودگی، پایداری لایه‌های خاک را در اطراف محل دفن با مخاطره مواجه سازد. بنابراین، حتی اگر تغییرات پارامترهای مقاومتی در ظاهر محدود به‌نظر برسد، از نظر عملکرد ژئوتکنیکی می‌تواند بسیار مهم و تعیین‌کننده باشد.

۴. ۳. تفسیر نتایج برش مستقیم‌براساس براساس مشاهدات SEM

به‌منظور تفسیر رفتار مقاومتی نمونه‌ها و برای تبیین علت کاهش زاویه اصطکاک از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای بررسی ریزساختار خاک استفاده شد. تصاویر به‌دست‌آمده در شکل (۱۳) نشان دادند که حضور شیرابه با ایجاد لایه‌ای در فضای بین‌ذره‌ای، علاوه بر کاهش اصطکاک سطحی ذرات، مانع از درگیری مکانیکی (Interlocking) مناسب میان توده‌های خاک شده است. این ساختار گسسته، باعث می‌شود که لغزش ذرات بر روی یکدیگر تحت بارگذاری برشی آسان‌تر شود و ذرات به‌راحتی روی یکدیگر لغزش کنند؛ که منجر به افت پارامتر اصطکاک داخلی می‌گردد. این پدیده عامل اصلی کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک است. ترکیب نتایج SEM با داده‌های مکانیکی نشان می‌دهد که تخریب ساختار خاک تحت اثر شیرابه، یک فرایند سیستماتیک از مقیاس میکرو به ماکرو است.



(A) (B)

Figure 13. Scaning Electron Microscope (SEM) image of the leachate contaminated soile sample;(A) 2500 x magnification and (B) 200 x magnification

تحلیل تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که خاک آلوده نسبت به نمونه شاهد، از ساختاری گسسته‌تر و پیوستگی ضعیف‌تری بین ذرات برخوردار است. این مشاهده با نتایج آزمایش برش مستقیم همخوانی دارد و بیانگر آن است که کاهش مقاومت برشی خاک، افزون بر داده‌های کمی، دارای منشأ ریزساختاری مشخصی نیز می‌باشد. به‌عبارت دیگر، نفوذ شیرابه با ایجاد تغییر در آرایش داخلی خاک و تشکیل شکاف‌ها و فواصل موضعی، موجب کاهش کارایی انتقال تنش بین ذرات شده و در نتیجه، زمینه را برای افزایش لغزش نسبی ذرات و کاهش مقاومت برشی فراهم کرده است.

همان‌گونه که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، حضور شیرابه موجب ایجاد فاصله بین ساختارهای توده‌ای خاک شده است. در پی این تغییر، میزان درگیری مکانیکی بین ذرات کاهش یافته و متعاقب آن، زاویه اصطکاک داخلی افت کرده است. این نتیجه با یافته‌های Ouria & Farsijani (2019b) نیز همخوانی دارد. نتایج گزارش‌شده توسط این پژوهش‌گران نشان داد که ترکیبات نیتروژنی و آمین‌های موجود در شیرابه می‌توانند با تأثیر بر ساختار خاک، سبب ایجاد نواحی سست‌تر و شکاف‌های ریزساختاری شوند. نواحی مشخص‌شده در شکل (۱۳) که بیانگر تجمع شیرابه هستند، نشان می‌دهند که شیرابه با برهم‌زدن پیوستگی ساختاری خاک، فضاهای شکاف‌دار را در مقیاس میکرو و در برخی موارد در

مقیاس ماکرو ایجاد می‌کند. گسترش این نواحی ضعیف و بسیج آن‌ها در راستای تنش برشی، می‌تواند در گذر زمان به کاهش بیش‌تر مقاومت برشی خاک منجر شود.

از منظر تحلیلی ترکیب نتایج آزمایش برش مستقیم با مشاهدات SEM را می‌توان از نقاط قوت این پژوهش دانست، زیرا این رویکرد امکان تفسیر هم‌زمان رفتار مقاومتی خاک در مقیاس کلان و تغییرات آن در مقیاس ریزساختاری را فراهم می‌سازد. بر این اساس، مشخص می‌شود که اثر شیرابه تنها به تغییرات ظاهری یا فیزیکی محدود نبوده، بلکه ساختار داخلی خاک را نیز دستخوش تغییر کرده است.

۵. نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدفی دوگانه، ابتدا به واکاوی اسنادی پیشینه مطالعات آلودگی در محل‌های دفن زباله و سپس به ارزیابی آزمایشگاهی اثرات شیرابه مجتمع آرادکوه بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک پرداخته است.براساس براساس یافته‌های حاصل از بررسی شاخص‌های آلودگی، مدل‌سازی‌های انتقال آلاینده و نتایج آزمون‌های مکانیکی و ریزساختاری، نتایج کلیدی زیر حاصل شده است.

۵. ۱. تحلیل شاخص‌های آلودگی و پتانسیل خطر

مرور ادبیات و بررسی شاخص‌هایی نظیر ضریب آلودگی صنعتی (CIP) و شاخص آلودگی شیرابه (LPI) نشان داد که محل‌های دفن سنتی و غیرمهندسی، کانون‌های بالقوه تجمع فلزات سنگین و مواد آلی سمی هستند. تحلیلبراساس براساس روش «الکنو» تأیید می‌کند که عواملی نظیر عمق سطح ایستابی و نفوذپذیری خاک، نقش تعیین‌کننده‌ای در سرعت رسیدن آلاینده‌ها به آبخوان‌های زیرزمینی دارند. این موضوع ضرورت پایش مستمر لندفیل‌هایی نظیر آرادکوه را که دارای بار آلودگی (COD) بسیار بالایی هستند، دوچندان می‌کند.

۵. ۲. تحلیل تغییرات پارامترهای مقاومت برشی

نتایج این پژوهش نشان داد که نفوذ شیرابه حاصل از محل دفن زباله، علاوه بر پیامدهای زیست‌محیطی، می‌تواند رفتار ژئوتکنیکی خاک را نیز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار دهد.براساس براساس نتایج آزمایش برش مستقیم، با افزایش درصد آلودگی شیرابه از صفر به سه، ۱۰ و ۱۵ درصد، مقاومت برشی خاک به‌ترتیب حدود ۲۲، ۲۶ و ۲۸ درصد کاهش یافت. هم‌چنین زاویه اصطکاک داخلی از ۱۸/۳ درجه در نمونه شاهد به حدود ۱۴/۶، ۱۳/۴ و ۱۳/۱ درجه در نمونه‌های آلوده کاهش پیدا کرد. هرچند در برخی نمونه‌ها افزایش جزئی در مقدار چسبندگی مشاهده شد، اما این افزایش نتوانست اثر کاهشی افت مؤلفه اصطکاکی را جبران کند. ازاین‌رو، روند کلی مقاومت برشی کاهشی ارزیابی شد. این نتایج نشان می‌دهد که حضور شیرابه می‌تواند پایداری خاک‌های مجاور محل دفن را تضعیف کرده و از دیدگاه مهندسی، خطر تغییرشکل، نشست و ناپایداری موضعی را افزایش دهد.

نتایج حدود اتربرگ نیز بیانگر آن بود که با افزایش درصد شیرابه اسیدی از صفر به ۱۵ درصد، مقدار حد روانی از ۳۳/۳ به ۲۷ و شاخص خمیری خاک کاهش می‌یابد، درحالی‌که حد خمیری تغییر محسوسی نشان نداد. این رفتار نشان می‌دهد که اثر شیرابه تنها محدود به حضور رطوبت اضافی یا تغییرات ظاهری نبوده، بلکه تغییرات در حدود اتربرگ به‌طور مستقیم ریشه در فعل و انفعالات شیمیایی بین شیرابه و کانی‌های خاک دارد. به‌ویژه، اسیدی‌بودن شیرابه و ترکیب یونی و مواد آلی آن می‌تواند با تأثیر بر ضخامت لایه دوگانه نفوذی (DDL)، نوع آرایش ذرات رس و سازوکارهای

لخته‌شدگی پراکنش، منجر به کاهش پلاستیسیته و تغییر در ویژگی‌های مکانیکی خاک شود. بنابراین، اگرچه ابزار اصلی این پژوهش، آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی بوده است، تفسیر نتایج بدون درنظرگرفتن اثرات شیمیایی شیرابه کامل نخواهد بود.

۵. ۳. تبیین مکانیسم‌های ریزساختاری

تحلیل تصاویر SEM نیز نشان داد که شیرابه موجب ایجاد تغییر در ریزساختار خاک، افزایش فاصله بین ذرات و کاهش درگیری آن‌ها می‌شود. این مشاهده، تبیین مناسبی برای افت مقاومت برشی و کاهش زاویه اصطکاک داخلی فراهم می‌کند. بنابراین می‌توان گفت که اثر شیرابه بر خاک تنها به آلودگی شیمیایی محدود نمی‌شود، بلکه این آلودگی در نهایت به تضعیف عملکرد ژئوتکنیکی خاک نیز می‌انجامد.

یافته‌های این پژوهش با نتایج برخی مطالعات پیشین نیز همخوانی دارد. در پژوهش Ouria & Farsijani (2019b) نیز گزارش شد که ترکیبات نیتروژنی و آمین‌های موجود در شیرابه می‌توانند با برهم‌زدن ساختار داخلی خاک، سبب ایجاد نواحی سست‌تر و شکاف‌های ریزساختاری شوند؛ موضوعی که در تصاویر SEM این پژوهش نیز مشاهده شد. هم‌چنین نتایج حاضر از این نظر با یافته‌های Goswami & Choudhury (2013) و Pming *et al.* (2016) سازگار است که افزایش جزیی چسبندگی در محیط‌های آلوده را پدیده‌ای موقتی دانسته و کاهش پارامتر اصطکاکی را عامل غالب در افت مقاومت برشی معرفی کرده‌اند. از سوی دیگر، مشاهده افزایش محدود در چسبندگی در برخی نمونه‌ها را می‌توان در چارچوب دیدگاه Oztoprak & Pisirici (2011) نیز تفسیر کرد که به نقش ماهیت چسبناک و ویسکوز شیرابه در ایجاد پیوندهای ظاهری یا سیمانته کوتاه‌مدت اشاره کرده‌اند. با این‌حال، نتایج این پژوهش نشان داد که چنین افزایشی پایدار نبوده و در نهایت، اثر منفی شیرابه بر اصطکاک و ساختار خاک غالب است.

۵. ۴. پیامدهای زیست‌محیطی و پایداری

از منظر زیست‌محیطی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شیرابه موردمطالعه، با توجه به مقادیر بسیار بالای COD، BOD، TDS، کلرید، سولفات و سایر ترکیبات محلول، نه‌تنها یک آلاینده بالقوه برای آب‌های زیرزمینی محسوب می‌شود، بلکه می‌تواند از طریق تغییر در رفتار ژئوتکنیکی خاک، عملکرد لایه‌های طبیعی حائل در اطراف محل دفن را نیز تضعیف کند. به‌عبارت دیگر، کاهش مقاومت برشی خاک در مجاورت شیرابه می‌تواند هم‌زمان دو پیامد مهم داشته باشد؛ نخست، کاهش پایداری مکانیکی توده خاک و دوم، تسهیل انتقال آلاینده‌ها در اثر تغییر ساختار و ایجاد مسیرهای ترجیحی جریان. این موضوع اهمیت کنترل و جمع‌آوری مهندسی شیرابه در محل‌های دفن را دوچندان می‌کند.

۵. ۵. پیشنهادهای مدیریتی و اجرایی

در این پژوهش پارامترهای مکانیکی از طریق آزمون‌های ژئوتکنیکی اندازه‌گیری شده‌اند، اما تحلیل نتایج بر پایه اثرات فیزیکی و شیمیایی شیرابه انجام شده است. مشخصات شیمیایی شیرابه شامل pH اسیدی، بار آلی بالا، ترکیبات نیتروژنی، آمین‌ها و غلظت زیاد یون‌های محلول، در تبیین تغییرات مشاهده‌شده در حدود اتربرگ، ساختار ریزدانه‌ای خاک و افت مقاومت برشی نقش اساسی داشته‌اند. با این‌حال، برای تکمیل این مسیر پژوهشی، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده اثرات شیمیایی به‌صورت مستقیم و کمّی نیز بررسی شوند؛ از جمله آزمایش‌های مکانیکی، بررسی‌های ژئوشیمیایی و آزمون‌های نفوذ تدریجی شیرابه در خاک دست‌نخورده اندازه‌گیری تغییرات CEC، pH نهایی خاک–شیرابه، EC،

کانی‌شناسی سطح ذرات، غلظت فلزات سنگین جذب‌شده، آزمون‌های XRD، XRF و FTIR و هم‌چنین بررسی اثر زمان عمل‌آوری در دوره‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت نیز انجام شود تا شبیه‌سازی کامل‌تری از شرایط طبیعی حاصل گردد.

۶. پی‌نوشت‌ها

1. Geographic Information Systems
2. Olekno
3. Shaker
4. American Society for Testing and Materials

۷. تشکر و قدردانی

کمال تشکر و قدردانی را از زحمات بی‌دریغ جناب آقای مهندس حمیدرضا محمدی و جناب آقای مهندس حسن وحیدی دارم که الحق در محضرشان آموختم، نه‌تنها علم، بلکه منش و بزرگی را و هرآنچه که نیکوترین بود، در حق این حقیر انجام دادند، دارم.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

Abdoli, M. A., & Ghassemi-zadeh, M. J. (2009). Investigating the efficiency of compacted clay liners in the natural removal of pollutants from leachate produced at municipal landfills (Case study: Kahrizak landfill). *Environmental Science and Technology*, 11(1), 62.

Artiningsih, A., Zubair, H., Imran, A., & Widodo, S. (2019). Contamination and characteristic of Ni and Cr metal on top soil from Antang landfill, Makassar City, South Sulawesi Province, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 175(1), 012021.

ASTM. (2012). Standard test methods for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. American Society for Testing and Materials.

Azizi, M., Khashaei Siooki, A., & Dastoorani, M. (2017). Investigating groundwater contamination from leachate leakage of waste disposal sites using numerical modeling. *Journal of Health and Environment Quarterly*, 3(3), 187–197.

Bazi, F., Rezaei, M. R., & Sayadi Anari, M. H. (2017). Assessing soil contamination by heavy metals using the pollution factor index at the Zahedan municipal landfill. *Environmental Engineering and Water Management*, 2(3), 170–171.

Boateng, T. K., Opoku, F., & Akoto, O. (2019). Heavy metal contamination assessment of groundwater quality: A case study of Oti landfill site, Kumasi. *Applied Water Science*, 9(2), 33.

Chen, G., Yang, Y., Liu, X., & Wang, M. (2021). Spatial distribution characteristics of heavy metals in surface soil of Xilinguole coal mining area based on semivariogram. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5), 290.

Ebrahimi, R., & Khari, M. (2018). Laboratory investigation of nanoparticle performance on soil mechanical properties (Unpublished master's thesis). Islamic Azad University, East Tehran Branch, Tehran, Iran.

Eskandari, M., Homaee, M., Mahmoodi, S., Pazira, E., & Van Genuchten, M. T. (2015). Optimizing landfill site selection by using land classification maps. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(10), 7754–7765.

Fiksel, J., Sanjay, P., & Raman, K. (2021). Steps toward a resilient circular economy in India. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23, 203–218.

Forti, J. C., Lima, P. G., Reis, A. R., dos Santos, F. A., & Braga, S. S. (2019). Analysis of heavy metals and aromatic compounds in soil layers of a sanitary landfill. *Environmental Quality Management*, 28(3), 123–130.

Goswami, D., & Choudhury, B. N. (2013). Chemical characteristics of leachate contaminated lateritic soil. International *Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2(4).

Guidi Nissim, W., Palm, E., Pandolfi, C., Mancuso, S., & Azzarello, E. (2021). Willow and poplar for the phytotreatment of landfill leachate in Mediterranean climate. *Journal of Environmental Management*, 277(1), 111454.

Hussein, M., Yoneda, K., Zaki, Z. M., & Amir, A. (2019). Leachate characterization and pollution indices of active and closed unlined landfills in Malaysia. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 12, 100232.

Ibn Jalal, R., & Shafaei Bajestan, M. (2004). Theoretical and scientific principles of soil mechanics (5th ed.). Shahid Chamran University Press.

Jamshidi, A., Tajamiri, A., & Mirbagheri, S. A. (2013). Impact of Yasuj city landfill leachate on the quality of the downstream water source (Well No. 6 Tang Konareh). *Armaghan Journal*, 4(19), 367–368.

Jiang, B., Adebayo, A., Jia, J., Xing, Y., Deng, S., Guo, L., *et al*. (2019). Impacts of heavy metals and soil properties at a Nigerian e-waste site on soil microbial community. *Journal of Hazardous Materials*, 362, 187–195.

Khanlari, G., Taleb Bidokhti, A., Momeni, A. A., & Ahmadi, H. R. (2015). Impact of leachate from Hamadan landfills on groundwater. *Journal of Iranian Society of Engineering Geology*, 4(5), 81–92.

Ladd, R. S. (1978). Preparing test specimens using undercompaction. *Journal of Geotechnical Testing*, 1(1), 16–23.

Linnik, V. G., Bauer, T. V., Minkina, T. M., Mandzhieva, S. S., & Mazarji, M. (2022). Spatial distribution of heavy metals in soils of the flood plain of the Seversky Donets River (Russia) based on geostatistical methods. *Environmental Geochemistry and Health*, 44(2), 319–333.

Livia, S., María, M. S., Marco, B., & Marco, R. (2020). Assessment of wastewater reuse potential for irrigation in rural semi-arid areas: The case study of Punitaqui, Chile. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22, 1325–1338.

Mohibi Najmabad, M., Mahmoudi Gharabaghi, M. H., Lashgaripour, G. H., & Nikdel, M. R. (2011). Determination of the industrial pollution coefficient (CIP) in soil samples from the wastewater treatment plant and landfill area of Neyshabur. In The 30th Earth Sciences Congress. Tehran, Iran.

Nezhad, M. T. K., Tabatabaii, S. M., & Gholami, A. (2015). Geochemical assessment of steel smelter-impacted urban soils, Ahvaz, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 152, 91–109.

Ouria, A., & Farsijani, A. (2019a). The effects of waste leachate on the strength parameters of clay with high and low plasticity. *Journal of Amirkabir Civil Engineering*, 50(6), 1029–1081.

Ouria, A., & Farsijani, A. (2019b). Investigating the consolidation and shearing behavior of clay contaminated with municipal solid waste leachate. *Journal of Amirkabir Civil Engineering*, 51(2), 351–365.

Oveisi, D., Saboor, M. R., & Hosseini, S. M. (2006). Efficiency of anaerobic reactors in treating leachate from Kahrizak landfill, Tehran. In The 9th National Congress on Environmental Health (pp. 4–5). University of Medical Sciences, Isfahan, Iran.

Oztoprak, S., & Pisirici, B. (2011). Effects of microstructure change on the macro behavior of Istanbul (Turkey) clays exposed to landfill leachate. *Engineering Geology*, 110–112.

Pming, M., Hussein, M., Nyodu, M., & Shivan, D. (2016). A study on the chemical properties of leachate and its effect on the geotechnical properties of soil. *International Journal of Engineering Technology Science and Research*, 3(7).

Popego, T., Dikinya, O., & Gaobotse, G. (2019). Assessment of the concentration of heavy metals associated with landfill leachate in Gamodubu soils in the Kweneng District, Botswana. *African Journal of Soil Science*, 7(1), 523–529.

Raoofi, S. P., Goharnejad, H., & Zakeri Neiri, M. (2016). *Evaluation of the impact of air pollution on Tehran's climate using remote sensing data* (Unpublished master’s thesis). Islamic Azad University, Tehran Center Branch, Tehran, Iran.

Rotaru, A., & Răileanu, P. (2008). Groundwater contamination from waste storage works. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ), 7*(6), 731.

Saheed, I., Azeez, S., Jimoh, A., Obaro, V., & Adepoju, S. (2020). Assessment of some heavy metals concentration in soil and groundwater around refuse dumpsite in Ibadan metropolis, Nigeria. *Nigerian Journal of Technology*, 39(1), 301–305.

Singh, R. P., Singh, P., Araujo, A. S. F., Ibrahim, M. H., & Sulaiman, O. (2011). Management of urban solid waste: Vermicomposting as a sustainable option. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(7), 719–729.

Tortajada, C. (2020). Contributions of recycled wastewater to clean water and sanitation sustainable development goals. *NPJ Clean Water*, 3(1), 1–6.

Wu, W., Wu, P., Yang, F., Sun, D. L., Zhang, D. X., & Zhou, Y. K. (2018). Assessment of heavy metal pollution and human health risks in urban soils around an electronics manufacturing facility. *Science of the Total Environment*, 630, 53–61.

Yamani, M., & Alizadeh, S. (2015). Optimal siting of solid waste landfills in Hashtgerd region using analytic hierarchy process and geographic information system. *Geographical Information Quarterly*, 24(16), 85–86.

Yang, H., Wang, F., Yu, J., Huang, K., Zhang, H., & Fu, Z. (2021). An improved weighted index for the assessment of heavy metal pollution in soils in Zhejiang, China. *Environmental Research*, 192, 110246.

Zaheri, N., Khosravi, Y., Mokhtari, M. A. A., & Zamani, A. (2019). Distribution pattern of heavy metals in stream sediments of the Baycheh-Bagh area, northwest of Zanjan. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 35(2), 135–150