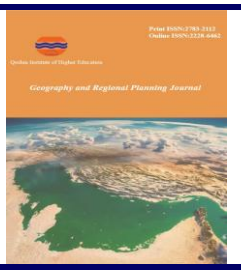
Iranian Association of Geopolitical

Geography and Regional Planning

ISSN (Print): 2783-2112 - ISSN (Online): 2228-6462

Homepage: https://www.jgeoqeshm.ir/



Comparative Evaluation of the Environmental Performance of Ceramic Tile Waste and Portland Cement in the Stabilization of Marl Soils with an Emphasis on Waste Reduction and Natural Environmental Pollution Mitigation (Case Study: Tabriz City)

Ramin Nemati Amooghein

1. Student of MSc Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabdiz, Iran. Email: nemati345@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article history:
Received February 17, 2026
Received in revised form April 13, 2026
Accepted April 28, 2026
Available online April 28, 2026

Keywords:
Marl soil
tile waste
soil stabilization
urban environment

Abstract

In urban areas of Iran, including Tabriz city and especially Nasr neighborhood, urban development has been challenged. On the other hand, the widespread use of cement as the most common soil stabilization material is associated with significant environmental consequences such as increased carbon dioxide emissions, energy consumption, and destruction of natural resources. In this study, the possibility of using Portland cement and waste tile powder as a construction waste simultaneously was investigated with the aim of improving the mechanical properties of marl soil and reducing environmental impacts. For this purpose, marl soil samples were prepared with different percentages of cement equal to 3, 5, and 7 percent and waste tile powder equal to 5, 7, 10, and 20 percent, and uniaxial compression and compressive strength tests were performed on them after 28 days of curing. The results showed that adding tile waste powder to an optimum amount of about 5% increases the dry specific gravity and compressive strength of the soil, while increasing it excessively reduces the strength due to dilution of the soil load-bearing skeleton. Also, increasing the percentage of cement significantly increased the compressive strength and soil hardness, but it was accompanied by an increase in the brittle behavior of the samples. In total, a mixture of 5% tile waste powder and 5 to 7% cement is recommended as the optimum mixture.

How to cite: Nemati, R. A. (2026). Comparative Evaluation of the Environmental Performance of Ceramic Tile Waste and Portland Cement in the Stabilization of Marl Soils with an Emphasis on Waste Reduction and Natural Environmental Pollution Mitigation (Case Study: Tabriz City). Geography and Regional Planning, 16(62).1-17. https://doi.org/10.22034/jgeoq.2026.576483.4420

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights
DOI: https://doi.org/10.22034/jgeoq.2026.576483.4420

Publisher: Qeshm Institute of Higher Education

Introduction

The rapid pace of urban development in Tabriz has intensified the need for soil stabilization, particularly for the region's moisture-sensitive marly deposits. While Portland cement is traditionally employed to meet geotechnical requirements, its substantial environmental footprint necessitates a transition toward more sustainable alternatives. This study investigates the potential of utilizing ceramic and tile waste as eco-friendly stabilizers, aligning with the principles of the circular economy. By conducting a comparative analysis of the environmental efficiency of waste-based versus cement-based stabilization, the research addresses a critical gap in sustainable urban planning, offering a scientific framework to balance technical performance with the preservation of natural ecosystems in construction practices

Methodology

This study adopts an applied and experimental-laboratory approach to comparatively evaluate the efficacy of waste tile powder and Type II Portland cement in stabilizing marly soils. The soil samples, classified as high-plasticity clay (CH), were extracted from a depth of 8 meters in the Nasr district of Tabriz. The additives included Type II Portland cement and waste tile powder, which was prepared by grinding and passing through a No. 4 sieve. The experimental design involved mixing soil with varying percentages of waste tile (0%, 5%, 7%, 10%, and 20%) and cement (0%, 3%, 5%, and 7%) by dry weight. Specimens were prepared at their optimum moisture content and cured for 28 days in a moist room environment according to ASTM D1632. To assess the geotechnical and mechanical behavior, a series of standardized tests were performed, including grain size analysis, Atterberg limits, Proctor compaction (ASTM D698), and Unconfined Compressive Strength (UCS) (ASTM D2166). To ensure reliability and data precision, each test was replicated three times, and the average results were reported after removing outliers.

Results and Discussion

The compaction test results indicate that the addition of waste tile powder and Portland cement significantly influences the compaction behavior of marly soil. Analysis of the Maximum Dry Density (MDD) reveals that increasing the tile powder content up to approximately 10% leads to a gradual enhancement in MDD. However, further increments up to 20% reverse this trend, resulting in a subsequent decrease in dry density. This behavior suggests an optimum threshold for tile powder utilization to improve the compactability of marly soil. At lower concentrations, the fine tile particles act as physical fillers, occupying the voids between marl particles, thereby reducing porosity and enhancing effective inter-particle contacts. This process optimizes grain arrangement during compaction. Conversely, beyond the optimum content, the excessive replacement of the marly phase with relatively lighter and non-cohesive tile particles weakens the soil skeleton's continuity and increases effective porosity, thus lowering the MDD. Furthermore, increasing the cement percentage consistently elevated the MDD across all mixtures, which is attributed to the formation of cementitious hydration products and the development of cohesive bonds between soil and tile particles. Notably, the reinforcing effect of cement is more pronounced at low to moderate tile powder levels; at higher concentrations, the "over-filling" effect tends to diminish the efficacy of cement in enhancing soil density.

Conclusion

The findings of this study demonstrate that stabilizing marly soils in Tabriz’s Nasr district using a combination of Portland cement and waste tile powder serves as a dual-purpose strategy, addressing both geotechnical requirements and environmental management challenges. By transitioning from "waste disposal" to "functional recycling," this approach repurposes non-biodegradable construction waste into a valuable resource, effectively reducing the environmental burden on urban landfills and promoting a circular economy. The results indicate that an optimum mixture of 5% waste tile powder and 7% cement achieves maximum compressive strength while significantly decreasing the carbon footprint associated with traditional cement-intensive stabilization. However, it is crucial to adhere

to these optimal proportions, as excessive waste content can weaken the soil skeleton and increase cement dependency. Despite these promising laboratory results, the study is limited by its controlled scale and the absence of long-term durability assessments, particularly regarding the wet-dry and freeze-thaw cycles prevalent in Tabriz's climate. Future research should focus on field-scale validation and life-cycle assessments (LCA) to quantify the long-term environmental benefits. Ultimately, this research provides a scientific foundation for sustainable urban engineering policies, balancing technical performance with the preservation of natural ecosystems.

Ethical considerations

Following the principles of research ethics

The authors have observed the principles of ethics in conducting and publishing this scientific research, and this is confirmed by all of them.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

First author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article.

Ethical Considerations

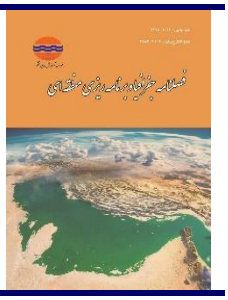
The authors affirm that they have adhered to ethical research practices, avoiding plagiarism, misconduct, data fabrication or falsification, and have provided their consent for this article's publication.

Funding

This research was conducted without any financial support from Payam Noor University.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest



فصلنامه جغرافیا و برنامه ریزی منطقه ای

شاپا چاپی: ۶۴۶۲- ۲۲۲۸ شاپا الکترونیکی: ۲۱۱۲ -۲۷۸۳

Homepage: https://www.jgeoqeshm.ir/

انجمن ژئوپلیتیک ایران

مقایسه تطبیقی کارایی زیست‌محیطی ضایعات کاشی و سیمان پرتلند در تثبیت خاک‌های مارنی با رویکرد کاهش پسماند و آلودگی محیط‌زیست طبیعی (مطالعه موردی: شهر تبریز)

رامین نعمتی عموقین [۱] ✉

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: nemati345@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۰۸

کلیدواژه ها:

خاک مارن،

ضایعات کاشی،

تثبیت خاک،

محیط زیست شهری.

چکیده

در مناطق شهری ایران، از جمله شهر تبریز و به‌ویژه محله نصر، توسعه شهری را با چالش مواجه ساخته‌اند. از سوی دیگر، مصرف گسترده سیمان به‌عنوان متداول‌ترین ماده تثبیت‌کننده خاک، با پیامدهای زیست‌محیطی قابل توجهی نظیر افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن، مصرف انرژی و تخریب منابع طبیعی همراه است. در این پژوهش، امکان استفاده همزمان از سیمان پرتلند و پودر ضایعات کاشی به‌عنوان یک پسماند ساختمانی، با هدف بهبود خواص مکانیکی خاک مارن و کاهش اثرات زیست‌محیطی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، نمونه‌های خاک مارن با درصدهای مختلف سیمان برابر با ۳، ۵ و ۷ درصد و پودر ضایعات کاشی برابر با ۵، ۷، ۱۰ و ۲۰ درصد تهیه شد و آزمایش‌های تراکم و مقاومت فشاری تک‌محوری پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه بر روی آن‌ها انجام گرفت. نتایج نشان داد که افزودن پودر ضایعات کاشی تا مقدار بهینه حدود ۵ درصد، موجب افزایش وزن مخصوص خشک و مقاومت فشاری خاک می‌شود، در حالی‌که افزایش بیش‌ازحد آن باعث کاهش مقاومت به‌دلیل رقیق‌سازی اسکلت باربر خاک می‌گردد. همچنین افزایش درصد سیمان سبب افزایش قابل توجه مقاومت فشاری و سختی خاک شد، اما همراه با افزایش رفتار ترد نمونه‌ها بود. در مجموع، ترکیب شامل ۵ درصد پودر ضایعات کاشی و ۵ تا ۷ درصد سیمان به عنوان ترکیب بهینه پیشنهاد می‌شود.

استناد: نعمتی عموقین، رامین . (۱۴۰۵). **مقایسه تطبیقی کارایی زیست محیطی ضایعات کاشی و سیمان پرتلند در تثبیت خاک‌های مارنی با رویکرد کاهش پسماند و آلودگی محیط‌زیست طبیعی (مطالعه موردی: شهر تبریز).** جغرافیا و برنامه ریزی منطقه‌ای، ۱۶(۶۲).۱-۱۷. DOI: 10.22034/jgeoq.2026.576483.4420

CC BY

© نویسندگان.

ناشر: موسسه آموزش عالی قشم

مقدمه

رشد فزاینده فعالیت‌های عمرانی و توسعه زیرساخت‌ها در دهه‌های اخیر، به یکی از مهم‌ترین عوامل فشار بر محیط‌زیست طبیعی در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و جهانی تبدیل شده است(Ghanizadeh et al, 2021). این فشار نه‌تنها از طریق تغییر کاربری اراضی، تخریب زیست‌بوم‌ها و کاهش ظرفیت‌های اکولوژیک بروز می‌یابد، بلکه از مسیر مصرف گسترده منابع غیرقابل تجدید، افزایش تولید پسماندهای ساختمانی و تشدید آلودگی محیط‌های خاکی نیز نمود پیدا می‌کند (Mohammadzadeh et al, 2021). گزارش‌های بین‌المللی نشان می‌دهد که بخش ساخت‌وساز سهم قابل‌توجهی در مصرف مواد خام، انرژی و تولید پسماند دارد و در صورت تداوم الگوهای متداول عمرانی، پیامدهای زیست‌محیطی آن در دهه‌های آینده تشدید خواهد شد (Akintayo et al, 2024). از این‌رو، در ادبیات محیط‌زیست طبیعی، تأکید فزاینده‌ای بر ضرورت بازنگری در شیوه‌های توسعه عمرانی و حرکت به‌سوی رویکردهای مبتنی بر توسعه پایدار و اقتصاد چرخشی مشاهده می‌شود.(Ghisellini et al., 2016)

در این چارچوب، انتخاب مصالح و روش‌های اجرایی در پروژه‌های عمرانی، صرفاً یک تصمیم فنی یا اقتصادی تلقی نمی‌شود، بلکه تصمیمی با پیامدهای مستقیم و غیرمستقیم زیست‌محیطی است (Nesari Ardakani et al, 2021). مطالعات مرتبط با چرخه عمر مصالح ساختمانی نشان داده‌اند که بخش قابل‌توجهی از انرژی نهفته، انتشار آلاینده‌ها و فشار بر منابع طبیعی، به مرحله تولید و مصرف مصالح اختصاص دارد (Carvalho IdC et al, 2025). از میان فرآیندهای مختلف عمرانی، تثبیت خاک به‌عنوان یکی از اقدامات پرکاربرد در آماده‌سازی بستر ساخت‌وساز، نقش مهمی در این چرخه ایفا می‌کند و از این منظر، نیازمند توجه ویژه از دیدگاه محیط‌زیست طبیعی است(Golshan et al, 2024). تثبیت خاک به‌طور گسترده برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک‌های مسئله‌دار، کاهش نشست، افزایش ظرفیت باربری و کاهش مخاطرات ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، در اغلب پروژه‌ها، انتخاب مواد تثبیت‌کننده عمدتاً بر پایه معیارهای فنی و اجرایی انجام می‌شود و ارزیابی پیامدهای زیست‌محیطی این انتخاب‌ها در حاشیه قرار می‌گیرد (Karimi et al, 2024). این در حالی است که تثبیت خاک، به‌واسطه مصرف حجم قابل‌توجهی از مصالح و انرژی، می‌تواند آثار مستقیم و غیرمستقیمی بر کیفیت خاک، منابع طبیعی و حتی آلودگی‌های ثانویه داشته باشد .(Muntohar & Rahman, 2021) بنابراین، نگاه محیط‌زیستی به فرآیند تثبیت خاک، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر در چارچوب مدیریت پایدار محیط‌زیست طبیعی محسوب می‌شود(Ghiasi& Tavagho Hamedani, 2025). سیمان پرتلند به‌عنوان متداول‌ترین ماده مورد استفاده در تثبیت خاک، در مطالعات متعدد به‌عنوان عاملی مؤثر در افزایش مقاومت و پایداری خاک معرفی شده است. با وجود این، از منظر محیط‌زیست طبیعی، سیمان یکی از مصالح پرچالش به‌شمار می‌رود (Mousavi et al, 2022). فرآیند تولید سیمان مستلزم استخراج گسترده مواد اولیه معدنی، مصرف بالای انرژی و انتشار گازهای آلاینده است که پیامدهای آن در مقیاس محلی، منطقه‌ای و جهانی گزارش شده است (Pacheco-Torgal & Labrincha, 2019). افزون بر این، افزایش مصرف سیمان در پروژه‌های عمرانی به تشدید چرخه استخراج و مصرف منابع غیرقابل تجدید منجر می‌شود؛ چرخه‌ای که با اصول حفاظت از محیط‌زیست طبیعی و توسعه پایدار در تعارض قرار دارد (Amiri et al, 2020). از این رو، در ادبیات اخیر، کاهش وابستگی به سیمان و شناسایی گزینه‌های جایگزین کم‌اثرتر از نظر زیست‌محیطی، به‌عنوان یکی از راهبردهای کلیدی مطرح شده است (Zhang et al., 2022 Zhang et al., 2021).

در سوی دیگر، پسماندهای ساختمانی و تخریبی، به‌ویژه ضایعات کاشی و سرامیک، بخش قابل‌توجهی از جریان پسماندهای جامد را تشکیل می‌دهند. دفن یا رهاسازی غیراصولی این ضایعات، علاوه بر اشغال اراضی، می‌تواند منجر به آلودگی خاک، تخریب منظر طبیعی و افزایش فشار بر محیط‌زیست شود .(Ajayi et al., 2017; Tam et al., 2018) مطالعات انجام‌شده در حوزه مدیریت پسماند ساختمانی نشان می‌دهد که استفاده مجدد و بازیافت این ضایعات، علاوه بر کاهش حجم پسماند، نقش مهمی در حفظ منابع طبیعی و کاهش مصرف مصالح اولیه دارد (Vegas et al., 2020; Rahman et al., 2023). به همین دلیل، سیاست‌های محیط‌زیستی در سطوح ملی و بین‌المللی، به‌طور فزاینده‌ای بر توسعه اقتصاد چرخشی و استفاده از پسماندها به‌عنوان منابع ثانویه تأکید دارند (AghaeiAraei et al, 2024).

در سال‌های اخیر، توجه پژوهشگران به امکان استفاده از پسماندهای ساختمانی در فرآیندهای بهسازی و تثبیت خاک افزایش یافته است. نتایج مطالعات تجربی نشان می‌دهد که ضایعات کاشی و سرامیک، به دلیل ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های فیزیکی

خاص، قابلیت استفاده در بهبود برخی ویژگی‌های مکانیکی خاک را دارند و می‌توانند در افزایش مقاومت و پایداری خاک مؤثر باشند (Saber Iravanian, 2022; Isa et al., 2023). همچنین مرورهای نظام‌مند نشان می‌دهد که استفاده از مواد تثبیت‌کننده مبتنی بر پسماند، در صورت ارزیابی صحیح، می‌تواند به‌عنوان راهکاری پایدار در تثبیت خاک مطرح شود (Zhang et al., 2022). با این حال، بخش عمده این مطالعات تمرکز خود را بر جنبه‌های فنی قرار داده و پیامدهای زیست‌محیطی این رویکردها را به‌صورت تطبیقی با روش‌های متداول مبتنی بر سیمان کمتر مورد بررسی قرار داده‌اند. اهمیت این مسئله در شهرهایی که هم‌زمان با توسعه سریع عمرانی و محدودیت‌های محیط‌زیستی مواجه‌اند، دوچندان می‌شود. شهر تبریز به‌عنوان یکی از کلان‌شهرهای شمال‌غرب ایران، طی دهه‌های اخیر شاهد گسترش قابل‌توجه ساخت‌وسازها و پروژه‌های عمرانی شهری و پیرامونی بوده است. این توسعه با مداخلات گسترده در بسترهای خاکی همراه بوده و در بسیاری از موارد، نیاز به تثبیت و بهسازی خاک را افزایش داده است. بخش قابل‌توجهی از بسترهای خاکی در محدوده و پیرامون تبریز را خاک‌های مارنی تشکیل می‌دهند که به دلیل رفتار خاص فیزیکی، حساسیت به رطوبت و ناپایداری نسبی، نیازمند اقدامات تثبیتی هستند. در چنین شرایطی، انتخاب ماده تثبیت‌کننده در تبریز صرفاً یک تصمیم فنی نیست، بلکه تصمیمی محیط‌زیستی با پیامدهای مستقیم برای خاک، منابع طبیعی و مدیریت پسماند شهری محسوب می‌شود.

در تبریز، استفاده از سیمان پرتلند همچنان گزینه غالب در تثبیت خاک‌های مسئله‌دار است. این در حالی است که توسعه ساخت‌وساز در این شهر منجر به تولید حجم قابل‌توجهی از پسماندهای ساختمانی، به‌ویژه ضایعات کاشی و سرامیک، شده است. در صورت عدم استفاده هدفمند، این ضایعات می‌توانند به منبعی برای آلودگی خاک و اشغال اراضی تبدیل شوند و فشار مضاعفی بر محیط‌زیست طبیعی وارد کنند. با وجود این واقعیت‌ها، بررسی‌های تطبیقی اندکی در بستر شهر تبریز انجام شده است که به‌صورت هم‌زمان کارایی زیست‌محیطی استفاده از ضایعات کاشی و سیمان پرتلند را در تثبیت خاک‌های مارنی ارزیابی کرده باشند. این خلأ پژوهشی موجب شده است که تصمیم‌گیری‌های عمرانی شهری عمدتاً بر رویه‌های متداول استوار باشد و ظرفیت‌های بالقوه مدیریت پسماند ساختمانی در کاهش آلودگی و حفاظت از محیط‌زیست طبیعی نادیده گرفته شود. چارچوب نظری پژوهش حاضر بر رویکرد توسعه پایدار و اقتصاد چرخشی استوار است و بر این اصل تأکید دارد که گزینه مطلوب در تثبیت خاک، گزینه‌ای است که ضمن تأمین الزامات فنی، کمترین پسماند، کمترین آلودگی و کمترین فشار بر منابع طبیعی را ایجاد کند در این چارچوب، کارایی فنی شرط لازم برای پذیرش یک ماده تثبیت‌کننده محسوب می‌شود، اما شرط کافی نیست و ارزیابی پیامدهای زیست‌محیطی باید به‌عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از فرآیند تصمیم‌گیری مدنظر قرار گیرد. بر این اساس، نوآوری پژوهش حاضر در مقایسه تطبیقی ضایعات کاشی و سیمان پرتلند با تمرکز بر کارایی زیست‌محیطی در بستر شهر تبریز نهفته است. این پژوهش تلاش می‌کند پیوندی روشن میان تثبیت خاک، مدیریت پسماند ساختمانی و حفاظت از محیط‌زیست طبیعی برقرار کند و مبنایی برای تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر در پروژه‌های عمرانی شهری فراهم آورد. سؤال اصلی پژوهش آن است که در تثبیت خاک‌های مارنی شهر تبریز، کدام یک از دو گزینه ضایعات کاشی یا سیمان پرتلند، سازگاری بیشتری با ملاحظات محیط‌زیست طبیعی دارد.

روش

این پژوهش از نظر هدف کاربردی و از نظر ماهیت، آزمایشگاهی–تجربی با رویکرد مقایسه‌ای است. هدف، ارزیابی و مقایسه اثر ضایعات کاشی و سیمان پرتلند بر بهبود رفتار مکانیکی خاک‌های مارنی و بررسی امکان کاهش مصرف سیمان از طریق استفاده از پسماندهای ساختمانی است. داده‌های پژوهش از نوع کمی و حاصل آزمون‌های استاندارد ژئوتکنیکی می‌باشد. نمونه خاک مارن از منطقه نصر تبریز و از عمق ۸ متری برداشت شد. پس از انتقال به آزمایشگاه، ویژگی‌های اولیه خاک شامل دانه‌بندی، حدود اتربرگ و مشخصات فیزیکی تعیین گردید و خاک در گروه CH طبقه‌بندی شد. به‌عنوان افزودنی، از سیمان پرتلند تیپ ۲ و پودر ضایعات کاشی استفاده شد که ضایعات پس از آسیاب و عبور از الک شماره ۴ آماده‌سازی گردید. طرح اختلاط بر اساس وزن خشک خاک تنظیم شد. درصدهای ضایعات کاشی شامل ۰، ۵، ۷، ۱۰ و ۲۰ درصد و درصدهای سیمان شامل ۰، ۳، ۵ و ۷

درصد در نظر گرفته شد. افزودنی‌ها ابتدا به‌صورت خشک با خاک مخلوط و سپس آب با مقدار رطوبت بهینه افزوده شد. نمونه‌ها ساخته شده و مطابق استاندارد ASTM D1632 به مدت ۲۸ روز در شرایط اتاق مرطوب عمل‌آوری شدند. برای ارزیابی رفتار خاک تثبیت‌شده، آزمون‌های دانه‌بندی، حدود اتربرگ، تراکم پروکتور (ASTM D698) و مقاومت فشاری تک‌محوره (ASTM D2166) انجام شد. هر آزمایش برای هر ترکیب حداقل سه بار تکرار و میانگین نتایج گزارش گردید. داده‌های پرت پس از بررسی فنی حذف شد و ملاحظات ایمنی، به‌ویژه در مواجهه با گردوغبار حاوی سیلیس، رعایت گردید.

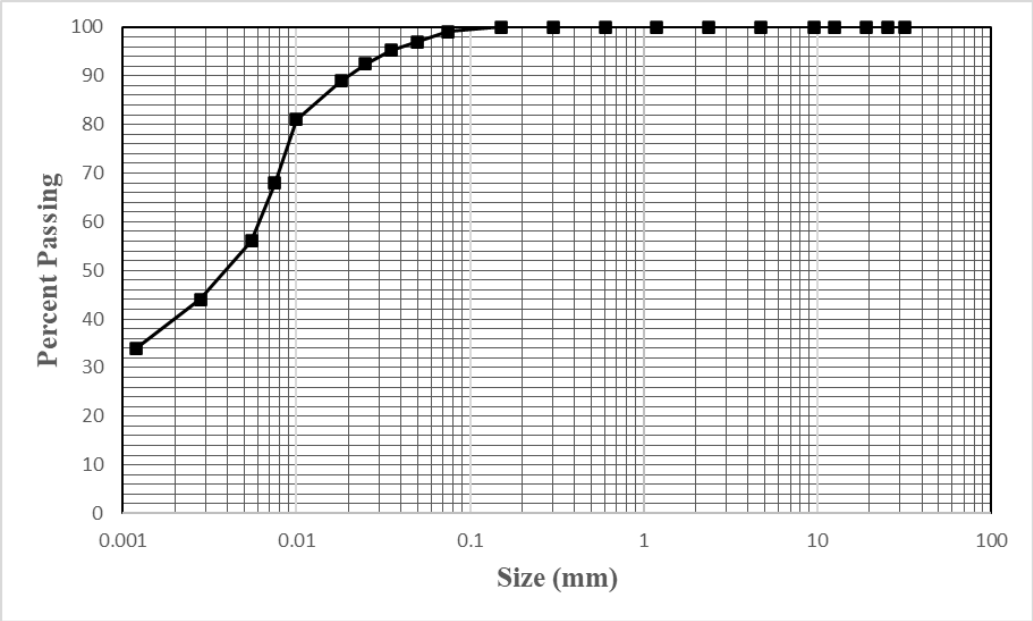
الف بندی به روش هیدرومتری‌لوازم آزمایش دانه ب لوازم و تجهیزات آزمایش تراکم به روش استاندارد ج دستگاه مقاومت فشاری تک‌محوری به همراه نمونه خاک

شکل ۱. تجهیزات و لوازم مورد استفاده در انجام آزمایش‌های ژئوتکنیکی پژوهش حاضر:
الف) وسایل آزمایش دانه‌بندی خاک به روش هیدرومتری،
ب) قالب‌ها و تجهیزات آزمایش تراکم استاندارد،
ج) دستگاه مقاومت فشاری تک‌محوری به همراه نمونه خاک مارن تثبیت‌شده

همانطور که از عنوان پژوهش پیداست، در این پژوهش از خاک مارن بدست آمده از منطقه نصر تبریز که در شمال شرقی این شهر واقع شده استفاده کردیم. این خاک از عمق ۸ متری بدست آمده و در کیسه‌های دربسته به آزمایشگاه منتقل شدند. همچنین رنگ این خاک رسی کربناته یا همان مارن، زیتونی است که غالب مارن این منطقه به این رنگ می‌باشد. خاک مارن زیتونی مورد استفاده در این پژوهش در رده CH قرار گرفته است. یعنی خاک مورد آزمایش، رس با پلاستیسیته بالا است. مارن معمولاً بافتی نرم و چسبنده دارد که به راحتی می‌توان آن را شکل داد[۶۹]. رنگ مارن می‌تواند از خاکستری تا زرد مایل به قهوه‌ای متغیر باشد که بستگی به میزان کربنات کلسیم و مواد آلی موجود در آن دارد. ترکیب شیمیایی مارن معمولاً شامل ۳۵ تا ۶۵ درصد کربنات کلسیم ($CaCO_3$) است. بقیه ترکیبات شامل رس، سیلیس و مواد آلی هستند[۷۰].

شکل ۲. تصویر هوایی منطقه خاک مارن تحت آزمایش

این خاک مارن از الک شماره ۴ عبور داده شد و در آزمایشگاه مورد جهت دانه‌بندی مورد بررسی قرار گرفت. به علت ریزدانه بودن خاک، از روش هیدرومتری برای دانه‌بندی استفاده شد و منحنی دانه‌بندی نیز در شکل ۳ آمده است.



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی خاک

جدول ۱. مشخصات خاک مارن مورد استفاده در پروژه

رنگ ظاهری	توضیحات رده طبقه بندی	رده طبقه بندی	P.I. (%)	L.L. (%)	میزان ریزدانه (درصد)	میزان ماسه (درصد)	میزان سنگ و ریگ (درصد)	عمق نمونه برداری (متر)
سبز	Fat Clay	CH	۳۵	۶۱	۹۹/۱	۰/۹	۰/۰	۸

زیتونی								

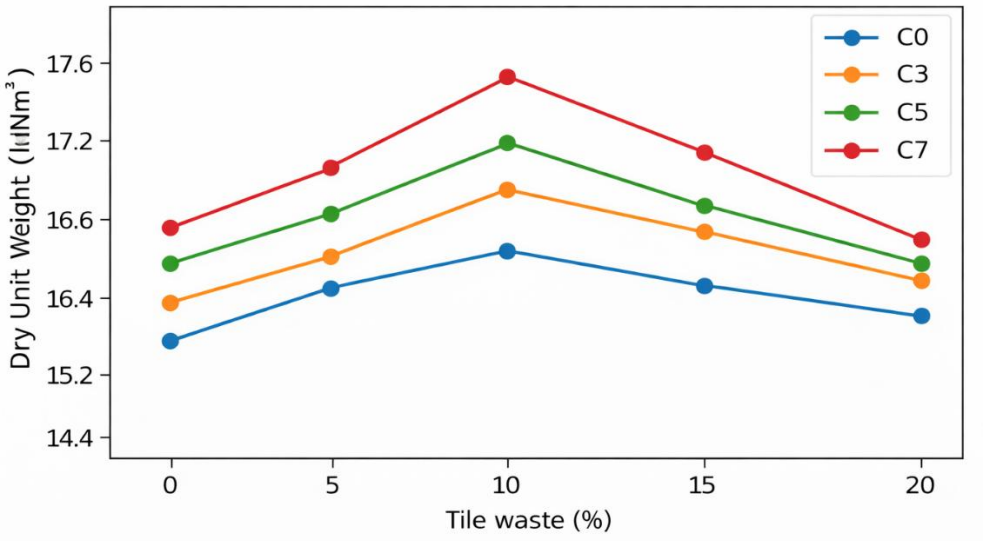
یافته ها

تأثیر مواد افزودنی بر ویژگی‌های تراکمی خاک مارن

نتایج آزمایش‌های تراکم نشان می‌دهد که افزودن پودر ضایعات کاشی و سیمان پرتلند تأثیر معناداری بر رفتار تراکمی خاک مارن دارد. بررسی تغییرات وزن مخصوص خشک نشان می‌دهد که با افزایش درصد پودر کاشی تا حدود ۱۰ درصد، وزن مخصوص خشک خاک به‌صورت تدریجی افزایش می‌یابد، اما با افزایش بیشتر مقدار کاشی تا ۲۰ درصد، این روند معکوس شده و کاهش وزن مخصوص خشک مشاهده می‌شود. این رفتار بیانگر وجود یک مقدار بهینه برای استفاده از پودر کاشی در بهبود تراکم‌پذیری خاک مارن است.

در مقادیر پایین پودر کاشی، ذرات ریز کاشی به‌عنوان پرکننده فیزیکی عمل کرده و با پر کردن فضاهای خالی بین ذرات مارن، موجب کاهش تخلخل و افزایش تماس‌های مؤثر بین‌ذره‌ای می‌شوند. این فرآیند باعث بهبود آرایش دانه‌ها در حین تراکم و افزایش وزن مخصوص خشک می‌گردد. در مقابل، در درصدهای بالاتر از مقدار بهینه، جایگزینی بیش‌ازحد فاز مارنی با ذرات نسبتاً سبک و غیرچسبنده کاشی، پیوستگی اسکلت خاک را تضعیف کرده و منجر به افزایش تخلخل مؤثر و کاهش وزن مخصوص خشک می‌شود.

افزایش درصد سیمان در تمامی ترکیب‌ها باعث افزایش وزن مخصوص خشک شده است. این موضوع به تشکیل محصولات هیدراسیون سیمان و ایجاد پیوندهای چسبنده بین ذرات خاک و کاشی نسبت داده می‌شود که فشردگی توده خاک را در حین تراکم افزایش می‌دهد. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که اثر مثبت سیمان در مقادیر پایین تا متوسط پودر کاشی برجسته‌تر است و در درصدهای بالای کاشی، اثر پرکنندگی بیش‌ازحد موجب کاهش کارایی سیمان در افزایش تراکم می‌شود.



شکل ٤. تأثیر درصد پودر ضایعات کاشی بر وزن مخصوص خشک خاک مارن در سطوح مختلف سیمان

بررسی شکل ۴ نشان می‌دهد که تنش گسیختگی تک‌محوری خاک مارن به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر درصد پودر ضایعات کاشی و میزان سیمان پرتلند قرار دارد. در تمامی سطوح سیمان، افزایش درصد پودر کاشی از صفر تا حدود ۵ درصد منجر به افزایش محسوس مقاومت فشاری شده است، در حالی‌که با افزایش بیشتر مقدار کاشی تا ۱۰ و ۲۰ درصد، روند مقاومت به‌صورت تدریجی کاهشی می‌شود. این رفتار بیانگر وجود یک مقدار بهینه برای استفاده از پودر ضایعات کاشی در تثبیت خاک مارن است. در مقادیر کم، ذرات ریز کاشی با ایفای نقش پرکننده فیزیکی، فضاهای خالی بین ذرات مارن را پر کرده و باعث افزایش تماس‌های مؤثر بین‌دانه‌ای و در نتیجه افزایش q_u می‌شوند. اما در مقادیر بالاتر، افزایش فاز غیرواکنش‌زای کاشی موجب رقیق‌سازی اسکلت باربر خاک و کاهش پیوستگی ساختاری شده و مقاومت فشاری کاهش می‌یابد.

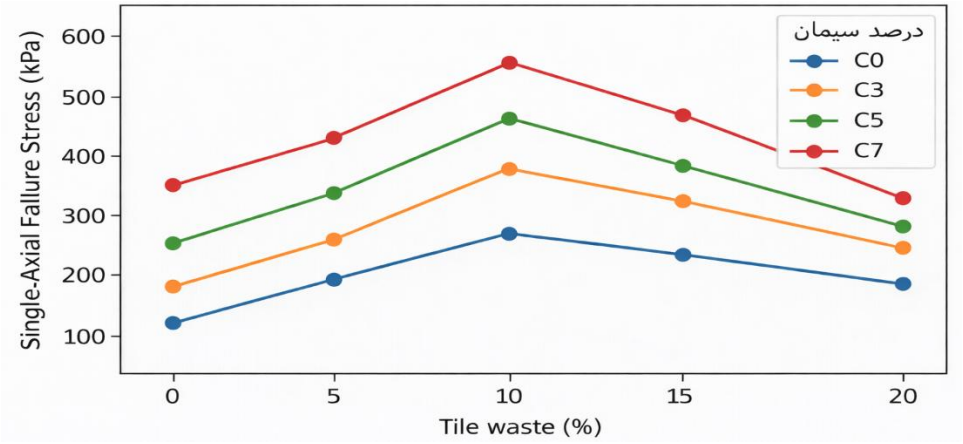
از سوی دیگر، افزایش درصد سیمان باعث افزایش سطح کلی مقاومت فشاری در تمام ترکیب‌ها شده است، اما این افزایش مقاومت با ملاحظات زیست‌محیطی همراه است؛ زیرا تولید سیمان یکی از منابع اصلی انتشار دی‌اکسیدکربن و مصرف انرژی در بخش ساخت‌وساز محسوب می‌شود. نتایج این شکل نشان می‌دهد که ترکیب بهینه شامل حدود ۵ درصد پودر ضایعات کاشی و ۷ درصد سیمان، بالاترین مقدار تنش گسیختگی را ایجاد کرده و در عین حال امکان کاهش مصرف سیمان از طریق استفاده هدفمند از یک پسماند ساختمانی را فراهم می‌سازد. از منظر محیط‌زیستی، این رویکرد می‌تواند به کاهش دفن ضایعات کاشی، کاهش فشار بر منابع طبیعی و محدودسازی آثار آلایندگی ناشی از مصرف بی‌رویه سیمان کمک کند. این موضوع به‌ویژه در منطقه نصر شهر تبریز، که خاک‌های مارنی گسترده و هم‌زمان حجم قابل توجهی از پسماندهای ساختمانی وجود دارد، می‌تواند به‌عنوان راهکاری عملی در مدیریت پایدار خاک و محیط زیست شهری مورد توجه قرار گیرد.

نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری نشان می‌دهد که افزودن پودر کاشی و سیمان موجب تغییر اساسی در رفتار مکانیکی خاک مارن می‌شود. خاک مارن خالص دارای مقاومت فشاری پایین و رفتار نرم با کرنش‌های نسبتاً بزرگ در لحظه گسیختگی است. با افزودن مقادیر کم پودر کاشی، مقاومت فشاری افزایش یافته و شیب اولیه منحنی تنش–کرنش بیشتر می‌شود که بیانگر افزایش سختی اولیه خاک است.

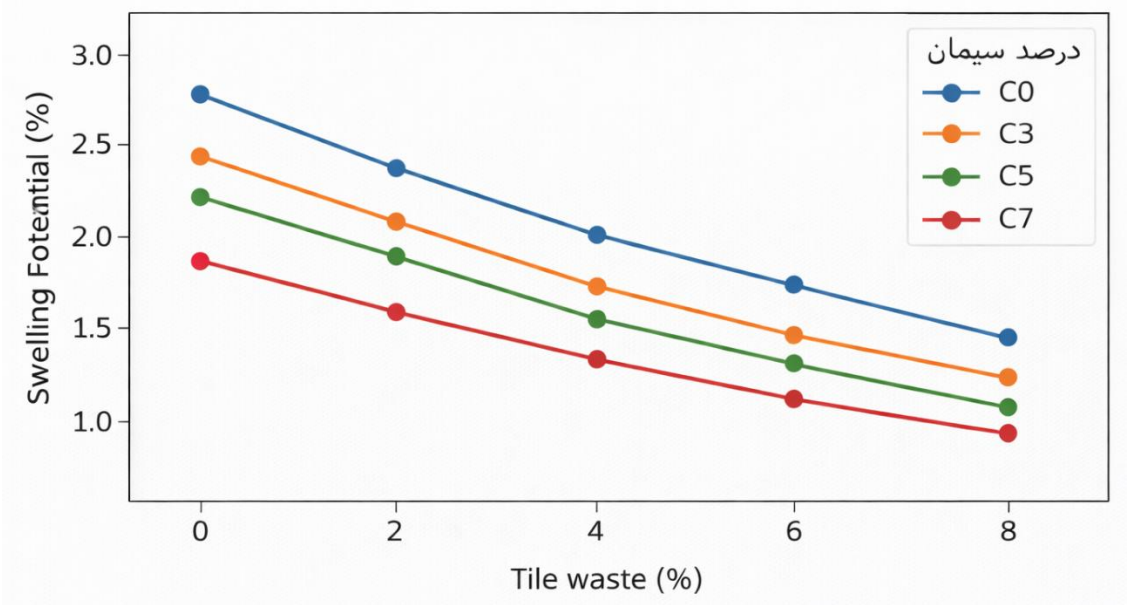
در تمامی سطوح سیمان، بیشترین مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری مربوط به ترکیب دارای حدود ۵ درصد پودر کاشی است. افزایش مقدار پودر کاشی بیش از این مقدار باعث کاهش تدریجی مقاومت فشاری شده و کمترین مقاومت در نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد کاشی مشاهده می‌شود. این روند نشان می‌دهد که پودر کاشی در مقادیر کم می‌تواند با بهبود تماس‌های فیزیکی بین ذرات، مقاومت خاک را افزایش دهد، اما در مقادیر بالا به‌عنوان یک فاز غیرفعال عمل کرده و موجب رقیق‌شدن اسکلت باربر خاک می‌شود.

افزودن سیمان باعث افزایش قابل‌توجه مقاومت فشاری در تمامی ترکیب‌ها شده است. با افزایش درصد سیمان، مقدار تنش گسیختگی افزایش یافته و کرنش متناظر با گسیختگی کاهش پیدا کرده است که نشان‌دهنده تغییر رفتار خاک از حالت نرم و شکل‌پذیر به سمت رفتار سخت‌تر و تردتر است. با این حال، حتی در حضور درصدهای بالای سیمان، افزایش بیش‌ازحد پودر کاشی همچنان اثر منفی خود را بر مقاومت فشاری حفظ می‌کند.



شکل ۵. تغییرات تنش گسیختگی تک‌محوری (q_u) خاک مارن بر حسب درصد پودر ضایعات کاشی در سطوح مختلف سیمان (عمل‌آوری ۲۸ روزه)

شکل ۵ روند تغییرات تنش گسیختگی تک‌محوری (q_u) خاک مارن را در ترکیب‌های مختلف پودر ضایعات کاشی و سیمان پرتلند پس از ۲۸ روز عمل‌آوری نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که در تمامی سطوح سیمان، افزایش درصد پودر کاشی تا حدود ۵ درصد موجب افزایش مقاومت فشاری خاک شده، اما با افزایش بیشتر مقدار کاشی، مقدار q_u به‌صورت تدریجی کاهش می‌یابد. این رفتار نشان‌دهنده وجود مقدار بهینه پودر ضایعات کاشی در تثبیت خاک مارن است. همچنین مشاهده می‌شود که افزایش درصد سیمان، سطح کلی مقاومت فشاری را افزایش داده، ولی الگوی کاهشی مقاومت در درصدهای بالای کاشی در همه سطوح سیمان حفظ شده است.

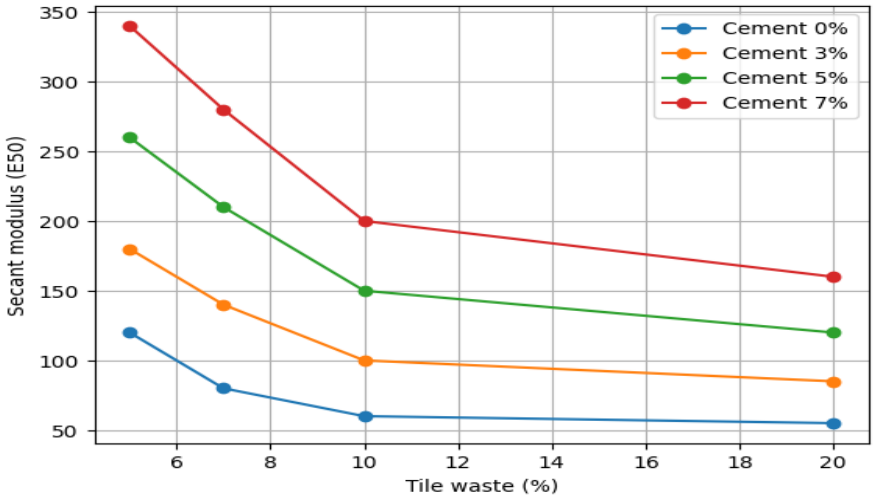


شکل۶ تغییرات پتانسیل تورم خاک مارن را در اثر افزودن درصدهای مختلف پودر ضایعات کاشی در ترکیب با سطوح متفاوت سیمان پرتلند نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که با افزایش درصد پودر کاشی، پتانسیل تورم خاک به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد که این کاهش در نمونه‌های دارای سیمان محسوس‌تر است. این رفتار نشان‌دهنده نقش پرکنندگی ذرات ریز پودر کاشی و کاهش فضای خالی و قابلیت جذب آب در ساختار خاک می‌باشد. همچنین افزایش درصد سیمان با ایجاد پیوندهای چسبنده و محصولات هیدراسیون، موجب مهار بیشتر تورم خاک شده است. کاهش پتانسیل تورم از دیدگاه ژئوتکنیکی و محیطزیستی حائز اهمیت بوده و می‌تواند به افزایش پایداری حجمی خاک مارن در پروژه‌های عمرانی، به‌ویژه در مناطق شهری مانند محله نصر تبریز، کمک نماید.

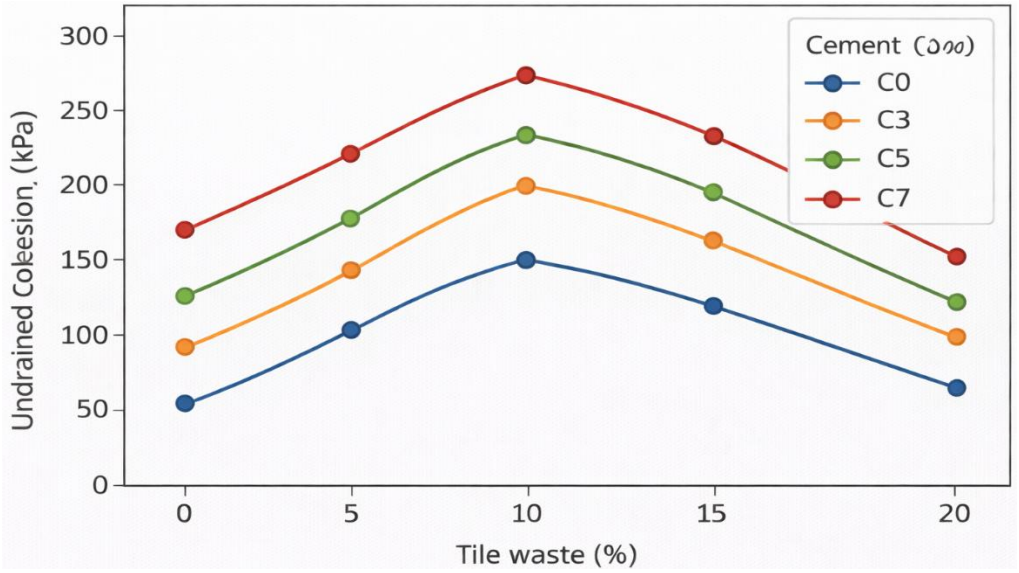
تحلیل پارامترهای مقاومتی و سختی q_u ، C_uوE_{50}

تحلیل هم‌زمان پارامترهای تنش گسیختگی(q_u) ، چسبندگی زهکشی‌نشده (C_u) و مدول سکانت (E_{50}) نشان می‌دهد که این سه پارامتر رفتار هم‌سویی دارند. ترکیب‌هایی که دارای q_u بالاتر هستند، عموماً مقادیر بیشتری از C_u و E_{50} را نیز نشان می‌دهند. افزایش این پارامترها به کاهش تخلخل، افزایش پیوستگی بین‌ذره‌ای و تشکیل شبکه‌ای پایدارتر در ساختار خاک نسبت داده می‌شود.

پودر کاشی در مقدار بهینه حدود ۵ درصد موجب افزایش E_{50} شده و سختی مؤثر خاک در ناحیه بارگذاری اولیه را افزایش می‌دهد. با افزایش مقدار کاشی به ۱۰ و ۲۰ درصد، مقدار E_{50} کاهش یافته که بیانگر تسلیم سریع‌تر خاک و کاهش سختی اولیه است. در مقابل، افزایش درصد سیمان موجب افزایش چشمگیر E_{50} شده است؛ هرچند در درصدهای بالای سیمان، رفتار ترد و کاهش شکل‌پذیری نیز مشاهده می‌شود که از نظر طراحی ژئوتکنیکی باید مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۷. تغییرات مدول سکانت (E_{50}) خاک مارن تثبیت‌شده بر حسب درصد پودر ضایعات کاشی در سطوح مختلف سیمان



شکل ۸. تغییرات چسبندگی زهکشی‌نشده (C_u) خاک مارن تثبیت‌شده بر حسب درصد پودر ضایعات کاشی در سطوح مختلف سیمان (عمل‌آوری ۲۸ روزه)

شکل ۸ نشان می‌دهد که افزایش درصد سیمان موجب افزایش معنی‌دار چسبندگی زهکشی‌نشده خاک مارن شده، در حالی‌که افزایش بیش‌ازحد پودر ضایعات کاشی باعث کاهش C_u می‌گردد. بیشترین مقدار چسبندگی مربوط به ترکیب‌های دارای حدود ۵ درصد پودر کاشی و درصدهای متوسط تا بالای سیمان است.

تحلیل نتایج با تأکید بر پیامدهای محیط‌زیستی و مدیریت پسماند

پارامتر تنش گسیختگی تک‌محوری (q_u) علاوه بر بیان مقاومت فشاری نهایی، شاخصی کلیدی برای ارزیابی کارایی روش‌های بهسازی خاک از منظر فنی و محیط‌زیستی محسوب می‌شود. در این پژوهش، پودر ضایعات کاشی به‌عنوان یک پسماند ساختمانی غیرقابل‌تجزیه و سیمان پرتلند به‌عنوان یک ماده پرمصرف و آلاینده‌محیطی به‌صورت توأمان مورد استفاده قرار گرفتند تا امکان مقایسه هم‌زمان عملکرد مکانیکی و پیامدهای زیست‌محیطی فراهم شود.

نتایج نشان می‌دهد که استفاده کنترل‌شده از پودر ضایعات کاشی در مقادیر بهینه می‌تواند بخشی از نیاز به سیمان را جبران کرده و ضمن حفظ یا افزایش مقاومت فشاری، موجب کاهش مصرف سیمان شود. از آنجا که تولید سیمان یکی از منابع اصلی انتشار

دی‌اکسیدکربن و مصرف انرژی فسیلی است، کاهش مصرف آن نقش مؤثری در کاهش آلودگی محیط زیست طبیعی دارد. همچنین استفاده از پودر کاشی به‌عنوان مصالح جایگزین، باعث کاهش حجم پسماندهای ساختمانی دفنی و کاهش فشار بر محیط زیست می‌شود.

تحلیل توأمان نتایج نشان می‌دهد که ترکیب شامل حدود ۵ درصد پودر ضایعات کاشی و ۵ تا ۷ درصد سیمان پرتلند به‌عنوان ترکیب بهینه پیشنهاد می‌شود. این ترکیب ضمن دستیابی به بیشترین مقاومت فشاری و سختی مناسب، از افت مقاومت ناشی از رقیق‌سازی اسکلت خاک و از تردی بیش‌ازحد ناشی از مصرف زیاد سیمان جلوگیری می‌کند. از دیدگاه توسعه پایدار، این نتایج نشان می‌دهد که بهسازی خاک مارن با استفاده هدفمند از پسماندهای ساختمانی می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مؤثر در کاهش آلودگی محیط زیست، مدیریت پسماند و بهبود عملکرد ژئوتکنیکی پروژه‌های عمرانی مورد توجه قرار گیرد.

جدول ۲ .خلاصه نتایج مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های مختلف خاک مارن تثبیت‌شده با پودر کاشی و سیمان

کد نمونه	درصد سیمان	درصد پودر کاشی	شرایط عمل آوری	میزان مقاومت فشاری تک محوری
C0K0	–	–	۲۸ روزه	۵/۲۸
C0K5	–	۵	۲۸ روزه	۵/۶۳
C3K5	۳	۵	۲۸ روزه	۳۲/۹
C5K5	۵	۵	۲۸ روزه	۴۴/۵
C7K5	۷	۵	۲۸ روزه	۵۵/۸
C0K7	–	۷	۲۸ روزه	۴/۵
C3K7	۳	۷	۲۸ روزه	۲۸/۵
C5K7	۵	۷	۲۸ روزه	۳۷/۴۹
C7K7	۷	۷	۲۸ روزه	۴۶/۶
C0K10	–	۱۰	۲۸ روزه	۴
C3K10	۳	۱۰	۲۸ روزه	۱۹/۶
C5K10	۵	۱۰	۲۸ روزه	۲۸/۱
C7K10	۷	۱۰	۲۸ روزه	۳۲/۹
C0K20	–	۲۰	۲۸ روزه	۳/۸۲
C3K20	۳	۲۰	۲۸ روزه	۱۵/۲
C5K20	۵	۲۰	۲۸ روزه	۲۱/۹
C7K20	۷	۲۰	۲۸ روزه	۲۵/۵

بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۱، مقاومت فشاری تک‌محوری خاک مارن به‌شدت تحت تأثیر مقدار سیمان و پودر ضایعات کاشی قرار دارد. بیشترین مقدار مقاومت فشاری مربوط به نمونه حاوی ۷ درصد سیمان و ۵ درصد پودر کاشی است که نشان‌دهنده وجود یک ترکیب بهینه میان افزودنی سیمانی و پسماند بازیافتی می‌باشد. در تمامی سطوح سیمان، افزایش درصد پودر کاشی بیش از ۵ درصد منجر به کاهش تدریجی مقاومت فشاری شده است که بیانگر رقیق‌سازی اسکلت باربر خاک در اثر افزایش فاز غیرواکنش‌زای کاشی است. از سوی دیگر، افزایش درصد سیمان موجب افزایش سطح کلی مقاومت شده، اما این افزایش با ملاحظات زیست‌محیطی ناشی از مصرف سیمان همراه است. نتایج جدول نشان می‌دهد که استفاده هدفمند از پودر ضایعات کاشی در مقدار بهینه می‌تواند ضمن بهبود عملکرد مکانیکی خاک، به کاهش مصرف سیمان و مدیریت پسماندهای ساختمانی کمک کند.

یافته‌های این پژوهش در بستر محیط‌زیستی شهر تبریز، به‌ویژه محله نصر، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شهر تبریز به دلیل موقعیت زمین‌شناسی، اقلیم نیمه‌خشک و گسترش سریع ساخت‌وساز شهری، در بسیاری از مناطق با خاک‌های ریزدانه مارنی با رفتار نامناسب ژئوتکنیکی مواجه است. این خاک‌ها علاوه بر حساسیت بالا به تغییرات رطوبتی، در برابر بارگذاری‌های عمرانی نیز مقاومت محدودی داشته و بهسازی آن‌ها به یکی از چالش‌های مهم توسعه شهری در تبریز تبدیل شده است.

محله نصر به‌عنوان یکی از پهنه‌های در حال توسعه شهری تبریز، نمونه‌ای شاخص از این شرایط محسوب می‌شود؛ جایی که اجرای پروژه‌های ساختمانی، راه‌سازی و توسعه زیرساخت‌ها مستلزم بهسازی خاک بستر است. در چنین مناطقی، استفاده گسترده از سیمان به‌عنوان تنها گزینه تثبیت خاک، هرچند از نظر فنی مؤثر است، اما از منظر محیط‌زیستی با پیامدهایی نظیر افزایش مصرف انرژی، انتشار دی‌اکسیدکربن و تشدید آلودگی‌های زیست‌محیطی همراه خواهد بود.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده هدفمند از پودر ضایعات کاشی، که یکی از پسماندهای رایج ناشی از فعالیت‌های ساختمانی در شهر تبریز است، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مکمل و پایدار در بهسازی خاک مارن محله نصر مطرح شود. بهره‌گیری از این پسماند ساختمانی در مقادیر بهینه، ضمن بهبود رفتار مکانیکی خاک، امکان کاهش نسبی مصرف سیمان را فراهم می‌کند. این موضوع از یک‌سو به کاهش حجم پسماندهای دفنی و فشار بر محیط زیست شهری کمک کرده و از سوی دیگر، شدت آلایندگی ناشی از مصرف سیمان را کاهش می‌دهد. از منظر مدیریت محیط زیست شهری، نتایج به‌دست‌آمده بیانگر آن است که بهسازی خاک در محله نصر می‌تواند از یک رویکرد صرفاً فنی به یک رویکرد تلفیقی فنی–محیط‌زیستی ارتقا یابد. ترکیب بهینه پودر ضایعات کاشی و سیمان، علاوه بر تأمین الزامات مقاومتی، با اصول مدیریت پسماند، استفاده مجدد از مواد و توسعه پایدار شهری هم‌راستا است. چنین رویکردی می‌تواند به‌عنوان الگویی قابل تعمیم برای سایر محلات تبریز با شرایط زمین‌شناسی مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

در مجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت هوشمند مصالح تثبیت خاک در محله نصر تبریز، با تکیه بر استفاده کنترل‌شده از پسماندهای ساختمانی، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش اثرات زیست‌محیطی پروژه‌های عمرانی، بهینه‌سازی مصرف منابع و ارتقای پایداری محیط زیست شهری ایفا کند؛ موضوعی که در برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری توسعه شهری تبریز باید مورد توجه جدی قرار گیرد.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بهسازی خاک مارن منطقه نصر تبریز با استفاده هم‌زمان از سیمان پرتلند و پودر ضایعات کاشی، صرفاً یک راهکار ژئوتکنیکی برای افزایش مقاومت خاک نیست، بلکه می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد محیط‌زیستی و مدیریتی در مواجهه با پسماندهای ساختمانی شهری نیز مورد توجه قرار گیرد. شهر تبریز، به‌ویژه در پهنه‌های در حال توسعه‌ای مانند محله نصر، هم‌زمان با گسترش ساخت‌وساز، با دو چالش عمده مواجه است: از یک‌سو وجود خاک‌های مارنی با رفتار نامطلوب مکانیکی، و از سوی دیگر تولید حجم قابل توجهی از ضایعات کاشی و سرامیک ناشی از فعالیت‌های ساختمانی و صنعتی. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده کنترل‌شده از پودر ضایعات کاشی در کنار سیمان، ضمن بهبود مقاومت فشاری و ویژگی‌های تراکمی خاک، امکان بازیافت مؤثر یک پسماند غیرقابل‌تجزیه را فراهم می‌کند. ضایعات کاشی که در شرایط متعارف به‌عنوان زباله ساختمانی دفن می‌شوند و آثار منفی متعددی بر خاک، منظر و کیفیت محیط‌زیست شهری دارند، در این پژوهش به‌عنوان یک ماده مفید در فرآیند تثبیت خاک به کار گرفته شدند. این تغییر رویکرد از «دفع پسماند» به «بازیافت عملکردی»، یکی از مهم‌ترین دستاوردهای محیط‌زیستی تحقیق محسوب می‌شود.

از منظر پایداری محیط‌زیست، کاهش مصرف سیمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ چرا که تولید سیمان یکی از منابع اصلی انتشار دی‌اکسیدکربن، مصرف انرژی فسیلی و تخریب منابع طبیعی به شمار می‌رود. نتایج نشان داد که ترکیب بهینه شامل ۵ درصد پودر ضایعات کاشی و ۷ درصد سیمان، ضمن دستیابی به بیشترین مقاومت فشاری، امکان کاهش وابستگی کامل به سیمان را فراهم می‌سازد. این امر به‌طور غیرمستقیم موجب کاهش ردپای کربن پروژه‌های عمرانی و هم‌راستایی بیشتر آن‌ها با اهداف توسعه پایدار شهری می‌شود. در بافت‌هایی مانند محله نصر تبریز، که هم‌زمان با توسعه کالبدی، فشار بر منابع طبیعی و

محیط‌زیست افزایش می‌یابد، استفاده از چنین رویکردهایی می‌تواند نقش مهمی در مدیریت یکپارچه خاک، پسماند و منابع ساختمانی ایفا کند. تثبیت خاک با استفاده از ضایعات کاشی، علاوه بر کاهش نیاز به استخراج مصالح جدید، از گسترش محل‌های دفن پسماند ساختمانی جلوگیری کرده و به بهبود کیفیت محیط‌زیست شهری کمک می‌کند. به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تثبیت خاک مارن با بهره‌گیری از ضایعات کاشی، در صورت رعایت مقادیر بهینه، می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد دوگانه ژئوتکنیکی–محیط‌زیستی مورد استفاده قرار گیرد؛ راهبردی که هم پاسخگوی نیازهای فنی پروژه‌های عمرانی در تبریز است و هم در کاهش آلودگی محیط‌زیست، مدیریت پسماندهای ساختمانی و حرکت به‌سوی ساخت‌وساز پایدار نقش مؤثری ایفا می‌کند. این رویکرد می‌تواند مبنایی برای سیاست‌گذاری‌های آینده در حوزه استفاده مجدد از پسماندهای ساختمانی در پروژه‌های عمرانی شهری و منطقه‌ای باشد.

این تحقیق، با وجود ارائه نتایج کاربردی در زمینه بهسازی خاک مارن با استفاده از پودر ضایعات کاشی و سیمان، دارای محدودیت‌هایی است. نتایج پژوهش بر پایه آزمایش‌های آزمایشگاهی و در شرایط کنترل‌شده به‌دست آمده و تعمیم آن به مقیاس اجرایی نیازمند بررسی‌های میدانی است. همچنین رفتار بلندمدت خاک تثبیت شده و تأثیر چرخه‌های محیطی نظیر خیس و خشک و یخ و ذوب، که در اقلیم تبریز اهمیت بالایی دارند، در این مطالعه بررسی نشده است. علاوه بر این، پیامدهای زیست‌محیطی استفاده از ضایعات کاشی و کاهش مصرف سیمان به‌صورت کمی و در قالب ارزیابی چرخه عمر مورد سنجش قرار نگرفته است.

با توجه به نتایج این پژوهش، استفاده کنترل شده از پودر ضایعات کاشی در کنار سیمان پرتلند می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهسازی خاک مارن در مناطق شهری تبریز، به‌ویژه محله نصر، مورد توجه قرار گیرد. دستیابی به بیشترین مقاومت فشاری در ترکیب شامل حدود ۵ درصد پودر کاشی و ۷ درصد سیمان نشان می‌دهد که امکان کاهش مصرف سیمان از طریق به‌کارگیری پسماندهای ساختمانی وجود دارد؛ امری که هم از منظر فنی و هم از دیدگاه محیط‌زیستی حائز اهمیت است. نتایج بیانگر آن است که استفاده بیش‌ازحد از ضایعات کاشی، علی‌رغم ماهیت بازیافتی آن، می‌تواند موجب تضعیف اسکلت باربر خاک و افزایش نیاز به مصرف سیمان شود و در نتیجه بار زیست‌محیطی پروژه را افزایش دهد؛ ازاین‌رو، تعیین و رعایت مقدار بهینه افزودنی‌ها ضروری است. به‌کارگیری این ترکیب در پروژه‌های راه‌سازی و فونداسیون‌های سطحی می‌تواند ضمن بهبود رفتار مکانیکی خاک، به کاهش حجم پسماندهای سرامیکی دفنی، صرفه‌جویی در منابع طبیعی و کاهش انتشار آلاینده‌های ناشی از تولید سیمان کمک کند. با توجه به شرایط اقلیمی و ویژگی‌های زمین‌شناسی تبریز، بررسی دوام بلندمدت این روش و ارزیابی پیامدهای زیست‌محیطی آن در مقیاس چرخه عمر، می‌تواند زمینه‌ساز توسعه رویکردی پایدار در مدیریت خاک‌های مسئله‌دار شهری باشد.

References

Akintayo, B. D., Babatunde, O. M., & Olanrewaju, O. A. (2024). Comparative Analysis of Cement Production Methods Using a Life Cycle Assessment and a Multicriteria Decision-Making Approach. *Sustainability*, *16*(2), 484. https://doi.org/10.3390/su16020484.

Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. Journal of Cleaner Production, 114, 11–32. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007

Carvalho IdC, Zhang Z, Kirchheim AP, et al. Waste clay brick utilization in alkali-activated materials: A review on fresh and hardened state properties. *Materials Reports: Solidwaste and Ecomaterials*, 2025, 1: 9520005. https://doi.org/10.26599/MRSE.2025.9520005.

Isa, M. H. M., Zainol, N. A., Hashim, K. S., et al. (2023). Structural characteristics and microstructure analysis of ceramic tile waste as soil stabiliser. Materials, 16(15), 5120. https://doi.org/10.3390/ma16155120

Muntohar, A. S., & Rahman, M. E. (2021). Environmental impact assessment of soil stabilization using industrial by-products. Environmental Earth Sciences, 80, 278. https://doi.org/10.1007/s12665-021-09432-7

Pacheco-Torgal, F., & Labrincha, J. A. (2019). The future of construction materials research and the seventh UN sustainable development goal. Construction and Building Materials, 201, 810–819. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.180

Rahman, M. M., Islam, M. S., & Rahman, M. A. (2023). Performance of waste-based binders for sustainable soil stabilization. Resources, Conservation and Recycling, 188, 106625. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106625

Saber, S. A., & Iravanian, A. (2022). Using waste ceramic dust in stabilization of clay soils. International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology, 13(1), 72–83. https://doi.org/10.30880/ijscet.2022.13.01.007

Tam, V. W. Y., Soomro, M., & Evangelista, A. C. J. (2018). A review of recycled aggregate in concrete applications. Journal of Cleaner Production, 172, 272–290. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.240

Vegas, I., Ibañez, J. A., Lisbona, A., Sáez de Cortazar, A., & Frías, M. (2020). Use of recycled construction and demolition waste in soil stabilization. Waste Management, 102, 276–286. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.044

Zhang, X., Wang, F., & Li, H. (2021). Environmental impacts of cement production and mitigation strategies. Journal of Environmental Management, 286, 112199. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112199

Zhang, Y., Li, H., & Zhao, Y. (2022). Sustainable soil stabilization: A review of waste-based binders and environmental impacts. Journal of Environmental Management, 318, 115493. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115493

Ghiasi, V. and Tavagho Hamedani, H. (2025). A Review of Soil Improvement with Waste and Recycled Materials and Its Impact on Soil Parameters. *Road*, *33*(123), 461-482. doi: 10.22034/road.2022.324228.2019.

Nesari Ardakani, M, Morovati, M, Arsalan, M, & Siyahati Ardakani, G. (2021). Environmental Risk Assessment of Non-Metallic Industries Using Combined PHA-William Fine Technique (Case Study: Eram Ardakan Tile & Ceramic IND Co.). JOURNAL OF ENVIRONMENTAL HEALTH ENGINERING, 8(2), 196-211. https://sid.ir/paper/412715/en

AghaeiAraei, A., Asvar, F. and Barkhordari, K. (2024). Evaluation of Durability and Dynamic Properties of Treated Silty-sand Soil as the Road and Runways Base Material. *Road*, *32*(118), 1-26. doi: 10.22034/road.2023.425627.2222

Amiri, M., Asakereh, A., & Atashpoush, H. (2020). *Barrasi-ye moghavemat va sakhtar-e khak-haye marni tasbit-shode ba siman va nano-silica* [Investigation of strength and structure of cement- and nanosilica-stabilized marly soils]. *Journal of Engineering Geology*, 14(1), 29–52. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22286837.1399.14.1.7.5.

Mousavi, E, morshed, R. and eslami, A. (2022). Investigating the effect of ceramic waste powder as a substitute of cement on the properties of structural concrete. *Concrete Research*, *15*(1), 71-83. doi: 10.22124/jcr.2022.20712.1518.

Karimi, M., Khodaparast, M., Bayesteh, H., & Mohammadzadei, H. H. (2021). *Ta'sir-e mota'abel-e siman va sarbareh-ye mes bar beh-e khavas-e mekaniki-ye khak-e marn-e shahr-e Qom* [Interactive effect of cement and copper slag on improving the mechanical properties of marly soil in Qom City]. *Journal of Engineering Geology*, 15(4), 79–98. http://jeg.khu.ac.ir/article-1-3012-fa.html.

Golshan, M. R, Avaznejad,F. and bazaee,A. (2024). Investigating the Composition of Zeolite and Ceramic Waste on the Resistance and Durability of SCC Concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering*, *11*(2), 104-124. doi: 10.22065/jsce.2023.396699.3112

Mohammadzadeh, F. Amiri, M. J. Nabi Bidhendi, G. R. and Hoveidi, H. (2021). Environmental Planning for Industrial Waste Management with Industrial Ecology Approach Case Study: Ahvaz Industrial estate No. 2. *Journal of Environmental Studies*, *47*(2), 161-180. doi: 10.22059/jes.2021.326589.1008194

Ghanizadeh, A. R., Rahrovan, M. and Heydarabadi, N. (2021). Modeling of Unconfined Compressive Strength (UCS) of Full-Depth Reclaimed Base Materials Stabilized with Portland Cement Using Evolutionary Polynomial Regression. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, *51*(105), 171-184. doi: 10.22034/jcee.2020.11023.