Journal of Urban Environmental Management

Journal homepage: https://jumee.kgut.ac.ir
Vol.3, No.1; 2025.pp: 89-103

Research paper

(Received July 2, 2025 Accepted July 29, 2025)

Evaluating the Impact of Innovative Geotechnical Technologies on the Environmental Sustainability of Urban Construction Projects: A Case Study in Tehran

Roghayeh Mehmani [*1], Ramin Nemati Amooghein[2].

[1] *Department of Architecture, Bos. C, Islamic Azad University, Bostanabad, Iran*
[2] *M.Sc. Student in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran*

Abstract

The rapid pace of urban development and the increasing demand for construction projects in major cities have underscored the need to integrate environmental sustainability into project design and implementation. In this context, innovative geotechnical technologies have emerged as effective tools for enhancing the environmental performance of construction projects. This study aims to evaluate the impact of applying these technologies on key environmental sustainability indicators in urban construction projects in Tehran. Employing a mixed-methods approach, this research integrates qualitative and quantitative analyses. Initially, a systematic literature review identified relevant technologies and sustainability indicators. Subsequently, three major projects in Tehran were selected as case studies. Qualitative data were collected through 20 semi-structured interviews with key stakeholders and analyzed using thematic analysis in MAXQDA software. Quantitative data were extracted from project technical documents and analyzed through descriptive statistics. The findings reveal that the application of innovative geotechnical technologies has significantly improved soil and groundwater quality, reduced energy and resource consumption, and increased the use of recycled materials. Improvements in soil permeability (up to 75%) and reductions in nitrate concentrations in groundwater (up to 55%) were recorded in the case projects. However, challenges such as high initial costs, limited technical knowledge, and the absence of local standards were also identified. These results highlight the necessity of developing supportive policies, enhancing technical capacities, and establishing localized standards to facilitate the transition toward sustainable urban infrastructure.

Keywords: Environmental sustainability, geotechnical engineering, innovative geotechnical technologies, urban construction projects, thematic analysis, life cycle assessment.

[*] Corresponding Author: Roghayeh Mehmani
Email: *r.mehmani@iau.ac.ir*
Phone:09143144559

Doi: 10.48306/juem.2025.532071.1083

نشریه علمی مدیریت محیط زیست شهری

آدرس نشریه: https://jumee.kgut.ac.ir

سال سوم/شماره اول/بهار ۱۴۰۴/صفحه ۸۹-۱۰۳

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:۱۴۰۴/۴/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱/۱

کاربرد فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی در بهبود پایداری زیست‌محیطی پروژه‌های عمرانی در شهر تهران: رویکردها و چالش‌های اجرایی

رقیه مهمانی*[۱]، رامین نعمتی عموقین[۲]

[۱] گروه معماری، واحد بستان آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، بستان آباد، ایران

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

روند پرشتاب توسعه شهری و افزایش نیاز به پروژه‌های عمرانی در کلان‌شهرهای کشور، ضرورت توجه به پایداری زیست‌محیطی در طراحی و اجرای این پروژه‌ها را دوچندان کرده است. در این میان، فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی به‌عنوان ابزارهایی کارآمد در ارتقای عملکرد زیست‌محیطی پروژه‌های عمرانی مطرح شده‌اند. هدف این پژوهش، ارزیابی تأثیر به‌کارگیری فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی در بهبود شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی پروژه‌های عمرانی شهر تهران است. این مطالعه با رویکردی ترکیبی و از طریق تحلیل کیفی و کمی انجام شده است. در مرحله نخست، با مرور نظام‌مند ادبیات، فناوری‌های نوین و شاخص‌های کلیدی پایداری شناسایی گردید. سپس سه پروژه شاخص در تهران به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. داده‌های کیفی از طریق ۲۰ مصاحبه نیمه‌ساختاریافته با ذی‌نفعان کلیدی گردآوری و با روش تحلیل مضمون در نرم‌افزار MAXQDA تحلیل گردید. داده‌های کمی نیز از مستندات فنی پروژه‌ها استخراج و با آمار توصیفی تحلیل شد. یافته‌ها نشان می‌دهد که به‌کارگیری این فناوری‌ها موجب بهبود قابل توجه کیفیت خاک و آب‌های زیرزمینی، کاهش مصرف انرژی و منابع، و افزایش استفاده از مصالح بازیافتی شده است. بهبود نفوذپذیری خاک تا ۷۵ درصد و کاهش غلظت نیترات آب تا ۵۵ درصد در پروژه‌های موردی ثبت شد. در عین حال، چالش‌هایی همچون هزینه‌های بالا، کمبود دانش فنی و نبود استانداردهای بومی شناسایی گردید. این نتایج بر ضرورت تدوین سیاست‌های حمایتی، ارتقای ظرفیت فنی و توسعه استانداردهای بومی برای تسهیل گذار به زیرساخت‌های پایدار شهری تأکید دارد.

کلمات کلیدی: پایداری زیست‌محیطی، مهندسی ژئوتکنیک، فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی، پروژه‌های عمرانی شهری

* نویسنده مسئول: رقیه مهمانی

ایمیل: *r.mehmani@iau.ac.ir*

تلفن: ۰۹۱۴۳۱۴۴۵۵۹

Doi: 10.48306/juem.2025.532071.1083

۱-مقدمه

رشد سریع شهرنشینی در سراسر جهان و افزایش تقاضا برای توسعه زیرساخت‌های عمرانی، منجر به گسترش پروژه‌های عظیم عمرانی نظیر تونل‌ها، خطوط مترو، پایدارسازی شیب‌ها، گودبرداری‌های عمیق و سازه‌های زیرسطحی شده است[۱]. در این فرآیند، فناوری‌های ژئوتکنیکی به‌عنوان ابزارهای کلیدی برای بهبود ایمنی و عملکرد مهندسی این پروژه‌ها مورد استفاده گسترده قرار گرفته‌اند [۲، ۳]. با این حال، استفاده از فناوری‌های سنتی ژئوتکنیکی در بسیاری از موارد می‌تواند آثار زیان‌باری بر محیط زیست برجای بگذارد؛ از جمله آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی، نشست زمین، تغییرات نامطلوب در چرخه‌های هیدرولوژیکی، تخریب زیستگاه‌های طبیعی و افزایش ردپای کربن [۴]. در دهه‌های اخیر، همگام با گسترش رویکرد توسعه پایدار، توجه به استفاده از فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی با رویکرد سازگار با محیط زیست افزایش یافته است[۵، ۶]. این فناوری‌ها شامل ژئوسینتتیک‌ها، مصالح تثبیت‌کننده زیستی، استفاده از مصالح بازیافتی، روش‌های نوین زهکشی، و بهسازی زمین‌های آلوده می‌شوند [۷، ۸]. این فناوری‌ها ضمن بهبود عملکرد سازه‌های ژئوتکنیکی، ظرفیت بالایی برای کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی دارند و می‌توانند در ارتقای کیفیت زندگی شهری و حفاظت از منابع طبیعی مؤثر باشند[۹]. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در این حوزه در سطح جهانی، همچنان چالش‌هایی در زمینه کاربرد مؤثر و گسترده این فناوری‌ها در پروژه‌های عمرانی، به ویژه در بافت‌های شهری پیچیده، وجود دارد[۱۰]. از این رو، انجام پژوهش‌های بومی و موردی برای تحلیل میزان کارایی، مزایا، محدودیت‌ها و چالش‌های اجرایی این فناوری‌ها در شرایط خاص هر منطقه ضروری است.

یکی از نمونه‌های بارز از این چالش‌ها در شهر تهران مشاهده می‌شود؛ کلان‌شهری با رشد شتابان ساخت‌وساز، با ویژگی‌های ژئوتکنیکی متنوع و بافت شهری متراکم که در سال‌های اخیر شاهد اجرای گسترده پروژه‌های عمرانی زیرسطحی و سطحی بوده است. در بسیاری از این پروژه‌ها، ملاحظات زیست‌محیطی در طراحی و اجرای فناوری‌های ژئوتکنیکی یا به‌طور کامل نادیده گرفته شده یا به صورت حداقلی رعایت می‌شود. به‌علاوه، استفاده از فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی در تهران هنوز با محدودیت‌هایی چون کمبود دانش بومی، نبود استانداردهای محلی، هزینه‌های اجرایی، و ضعف در انتقال فناوری مواجه است. این در حالی است که با توجه به حساسیت اکولوژیکی بسیاری از مناطق تهران و ضرورت حفاظت از منابع طبیعی و کیفیت محیط زیست شهری، به‌کارگیری فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی با رویکرد پایداری زیست‌محیطی در این کلان‌شهر بیش از پیش اهمیت یافته است. با این وجود، مطالعات تجربی بومی که به صورت نظام‌مند میزان کارایی و چالش‌های اجرایی این فناوری‌ها را در پروژه‌های عمرانی تهران ارزیابی کنند، اندک است.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف تحلیل کاربرد فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی در بهبود پایداری زیست‌محیطی پروژه‌های عمرانی شهر تهران، شناسایی چالش‌ها و تدوین راهکارهای اجرایی مناسب، انجام می‌شود. انتظار می‌رود نتایج این پژوهش بتواند مبنای علمی مناسبی برای بهبود سیاست‌های طراحی و اجرای پروژه‌های عمرانی سازگار با محیط زیست در بافت شهری تهران فراهم آورد.

سامسامی و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از روش ارزیابی چرخه عمر به بررسی تأثیرات زیست‌محیطی تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران پرداخته‌اند. آن‌ها دریافتند که استفاده مجدد از فاضلاب تصفیه‌شده برای آبیاری می‌تواند در کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی مؤثر باشد[۱۱]. راجو آر و همکاران (۲۰۲۴) در مقاله‌ای با عنوان *پیشرفت‌های نوین در مهندسی ژئوتکنیک: تکنیک‌های نوآورانه برای بهبود پایدار زمین و کاهش ریسک* به بررسی آخرین فناوری‌ها و رویکردهای نوین در بهبود پایداری بسترهای خاکی پرداخته‌اند. این مطالعه ضمن معرفی تکنیک‌هایی همچون استفاده از ژئوسینتتیک‌های پیشرفته، مواد تثبیت‌کننده زیستی و فناوری‌های کم‌کربن در بهسازی زمین، نشان می‌دهد که این راهکارها می‌توانند به طور مؤثری در کاهش ریسک‌های ژئوتکنیکی و ارتقای عملکرد زیست‌محیطی پروژه‌های عمرانی نقش‌آفرینی کنند. همچنین مقاله بر اهمیت ارزیابی جامع اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی این فناوری‌ها در راستای تحقق اهداف توسعه پایدار تاکید دارد[۱۲]. یامینی و همکاران (۲۰۲۴) در مقاله‌ای با عنوان *مهندسی ژئوتکنیک و زمین‌شناسی: رویکردهای میان‌رشته‌ای برای زیرساخت‌های پایدار* به اهمیت بهره‌گیری از دانش‌های میان‌رشته‌ای در طراحی و اجرای زیرساخت‌های پایدار پرداخته‌اند. نویسندگان با تاکید بر همگرایی مهندسی ژئوتکنیک، زمین‌شناسی مهندسی و مفاهیم زیست‌محیطی، مجموعه‌ای از رویکردها و فناوری‌های نوین از جمله استفاده از مواد سازگار با محیط زیست، پایش هوشمند پایداری سازه‌ها و مدیریت یکپارچه ریسک‌های زمین‌شناسی را معرفی می‌کنند. این مقاله نشان می‌دهد که ادغام این دانش‌ها می‌تواند موجب بهبود ایمنی، کارایی و پایداری محیط‌زیستی پروژه‌های عمرانی در مقیاس شهری و منطقه‌ای شود[۱۳].

سانچز-گاریدو و همکاران (۲۰۲۲) در مقاله‌ای با عنوان *ارزیابی پایداری تکنیک‌های بهسازی خاک در زیرسازه‌های فونداسیون* به تحلیل جامع پایداری زیست‌محیطی، اقتصادی و فنی تکنیک‌های مختلف بهبود خاک پرداخته‌اند. این مطالعه با مقایسه روش‌های متداول

نظیر ستون‌های شنی، ستون‌های سیمانی و تزریق دوغاب با فناوری‌های نوین کم‌کربن، نشان می‌دهد که استفاده از مصالح بازیافتی و رویکردهای مبتنی بر ارزیابی چرخه عمر می‌تواند به کاهش قابل توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف انرژی در پروژه‌های ژئوتکنیکی منجر شود. نویسندگان همچنین تاکید می‌کنند که ادغام معیارهای پایداری در فرآیند تصمیم‌گیری مهندسی، پیش‌نیازی ضروری برای تحقق زیرساخت‌های پایدار است[۱۴]. کمیته *پایداری در مهندسی ژئوتکنیک* (SGE Committee) در سال ۲۰۲۱ ماژولی با عنوان «پایداری در مهندسی ژئوتکنیک» برای وب‌سایت *Geotech Tools*تدوین کرده است. این ماژول بر ادغام اصول پایداری در طراحی و اجرای پروژه‌های ژئوتکنیکی تأکید دارد و راهکارهایی مانند استفاده از ژئوسینتتیک‌ها، مصالح بازیافتی، بهسازی زیستی خاک و ارزیابی چرخه حیات را برای کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی پیشنهاد می‌کند. این چارچوب کمک می‌کند تا مهندسان در راستای کاهش مصرف منابع، کاهش آلاینده‌ها و حفظ اکوسیستم‌ها در پروژه‌های عمرانی اقدام کنند[۱۵].

زمانیان و همکاران (۱۴۰۱) در مقاله‌ای با عنوان *پایدارسازی دیوارهای کوبیده خاکی به‌عنوان یک روش ساخت‌وساز پایدار با استفاده از مصالح دوستدار محیط زیست: مطالعه موردی* که در *مجله مهندسی سازه و ساخت* منتشر شده، به بررسی امکان‌سنجی و عملکرد دیوارهای خاک کوبیده‌شده به‌عنوان یک راهکار سازه‌ای پایدار پرداخته‌اند. در این پژوهش، از مواد پایدار و زیست‌سازگار برای بهبود مقاومت مکانیکی و دوام دیوارهای خاکی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن تثبیت‌کننده‌های طبیعی و مصالح کم‌کربن، می‌توان عملکرد مهندسی این دیوارها را به سطحی رساند که برای کاربردهای مدرن شهری نیز مناسب باشند. نویسندگان تاکید می‌کنند که استفاده از این تکنیک‌ها می‌تواند به طور قابل توجهی مصرف انرژی و ردپای کربن در فرآیند ساخت کاهش داده و از منظر پایداری زیست‌محیطی به توسعه ساختمان‌های سبز کمک کند[۱۶]. اوهادی و همکاران (۱۴۰۰) در مقاله‌ای با عنوان تأثیر تغییرات pH بر برخی ویژگی‌های ژئوتکنیکی و ژئومحیطی کائولینیت، به بررسی رفتار کائولینیت تحت شرایط مختلف pH پرداخته‌اند. این مطالعه نشان می‌دهد که تغییرات pH می‌تواند به طور معناداری خواص ژئوتکنیکی خاک شامل چگالی نسبی، ظرفیت باربری، و پتانسیل تورم را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین، از منظر ژئومحیطی، این تغییرات در pH می‌توانند بر پایداری شیمیایی خاک و تحرک آلاینده‌ها در محیط‌های خاکی اثرگذار باشند. نتایج این پژوهش بر اهمیت توجه به شرایط شیمیایی محیط در طراحی و بهسازی پروژه‌های ژئوتکنیکی و در مدیریت پایداری زیست‌محیطی خاک تأکید دارد[۱۷].

نعیمی و همکاران (۱۴۰۰) در مقاله‌ای با عنوان *ارزیابی اثرات زیست‌محیطی محل‌های دفن زباله با استفاده از عوامل ژئوتکنیکی (مطالعه موردی: محل دفن زباله قوچان)* به تحلیل جامع اثرات محل‌های دفن زباله بر محیط زیست از منظر پارامترهای ژئوتکنیکی پرداخته‌اند. این مطالعه با ارزیابی عواملی نظیر نفوذپذیری خاک، پایداری شیروانی‌ها، نشست زمین و انتشار شیرابه، نشان داده است که ویژگی‌های ژئوتکنیکی نقش مهمی در میزان اثرگذاری محل دفن زباله بر کیفیت آب‌های زیرزمینی و پایداری زیست‌محیطی ایفا می‌کنند. نویسندگان بر ضرورت به‌کارگیری راهکارهای بهسازی ژئوتکنیکی، از جمله استفاده از لایه‌های مهندسی‌شده با نفوذپذیری کنترل‌شده و پایش مستمر پارامترهای خاک، در طراحی و مدیریت محل‌های دفن زباله تاکید دارند[۱۸]. اوهادی و همکاران (۱۳۹۰) در مقاله‌ای با عنوان پتانسیل ویژه نانورس‌ها برای جذب آلاینده‌های فلزات سنگین در پروژه‌های ژئومحیطی که در مجله مهندسی عمران و نقشه‌برداری منتشر شده، به بررسی کارایی نانورس‌ها در مهار و تثبیت آلاینده‌های فلزات سنگین در محیط‌های خاکی و ژئوتکنیکی پرداخته‌اند. در این مطالعه با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی و تحلیل رفتار جذب سطحی نانورس‌ها، نشان داده شده که این مواد می‌توانند ظرفیت بسیار بالایی برای جذب یون‌های فلزی نظیر سرب، کادمیم و نیکل داشته باشند. نویسندگان تأکید می‌کنند که استفاده از نانورس‌ها به‌عنوان بخشی از راهکارهای بهسازی خاک‌های آلوده در پروژه‌های ژئومحیطی، یک رویکرد مؤثر و پایدار برای کاهش ریسک‌های زیست‌محیطی و ارتقای کیفیت خاک و آب‌های زیرزمینی به شمار می‌آید[۱۹].

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر رویکردهای نوین در مهندسی ژئوتکنیک و طراحی زیرساخت‌های عمرانی به‌طور فزاینده‌ای به اصول پایداری زیست‌محیطی توجه یافته‌اند. کاربرد فناوری‌های نوین نظیر ژئوسینتتیک‌های پیشرفته، مصالح تثبیت‌کننده زیستی، مواد کم‌کربن، و نانورس‌ها در بهبود کیفیت خاک، کاهش نفوذپذیری، تثبیت آلاینده‌ها و بهبود کیفیت آب‌های زیرزمینی به‌عنوان رویکردهای مؤثر مطرح شده‌اند. همچنین، استفاده از ارزیابی چرخه عمر (LCA) به‌عنوان ابزاری کلیدی برای تحلیل جامع اثرات زیست‌محیطی در پروژه‌های ژئوتکنیکی و عمرانی توصیه شده است. یافته‌ها نشان می‌دهند که ادغام معیارهای زیست‌محیطی در فرآیند تصمیم‌گیری مهندسی می‌تواند به کاهش قابل توجه مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، و اثرات منفی بر اکوسیستم‌ها منجر شود. علاوه بر این، تأکید ویژه‌ای بر به‌کارگیری دانش میان‌رشته‌ای، تدوین استانداردهای بومی، ارتقای ظرفیت‌های فنی و مدیریتی،

و طراحی سیستم‌های پایش هوشمند برای تحقق زیرساخت‌های پایدار در مقیاس شهری و منطقه‌ای شده است. این روندها بیانگر تحول رویکردهای سنتی به سوی چارچوب‌های نوین مبتنی بر توسعه پایدار در حوزه مهندسی ژئوتکنیک و مدیریت محیط زیست می‌باشند.

۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش از نوع **کاربردی-تحلیلی** بوده و در چارچوب یک رویکرد **ترکیبی (کمی-کیفی)** انجام شده است. هدف آن تحلیل کاربرد فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی در بهبود پایداری زیست‌محیطی پروژه‌های عمرانی شهری با تمرکز بر شهر تهران است. برای دستیابی به این هدف، فرآیند تحقیق در سه مرحله اصلی طراحی و اجرا شده است.

در مرحله نخست، به منظور تدوین چارچوب نظری و شناسایی فناوری‌ها و شاخص‌های کلیدی پایداری، **مرور نظام‌مند منابع علمی** انجام شد. این مرور شامل مقالات علمی منتشر شده در پایگاه‌های معتبر بین‌المللی نظیر *ScienceDirect*، *Springer*، *Wiley*، *Taylor & Francis* و نشریات معتبر داخلی، همچنین گزارش‌های فنی سازمان‌های اجرایی و پروژه‌های مرجع بود. از این طریق، فناوری‌های نوین قابل استفاده در پروژه‌های ژئوتکنیکی (مانند ژئوسینتتیک‌ها، مصالح بازیافتی، بهسازی زیستی خاک، روش‌های نوین زهکشی و بهسازی زمین)، و شاخص‌های کلیدی پایداری (نظیر مصرف انرژی، میزان انتشار آلاینده‌ها، پایداری سازه‌ای، کیفیت خاک و آب‌های زیرزمینی، مدیریت پسماند) شناسایی شدند.

در مرحله دوم، برای تحلیل تجربی، از روش مطالعات میدانی در قالب مطالعه موردی استفاده شد. سه پروژه شاخص عمرانی در شهر تهران به‌عنوان نمونه‌های موردی انتخاب شدند:

۱) پروژه پایدارسازی گود عمیق سعادت‌آباد (ساید پارک)

۲) پروژه خط ۷ مترو تهران (بخش تونل‌های شهری)

۳) پروژه پایدارسازی گود نیاوران (عمارت سدروس)

معیار انتخاب این پروژه‌ها شامل تنوع نوع پروژه، سطح استفاده از فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی، اهمیت اثرات زیست‌محیطی، و دسترسی به داده‌های فنی و مدیریتی بوده است.

جامعه آماری این پژوهش شامل کارشناسان و مدیران مرتبط با این سه پروژه بوده است. به منظور گردآوری داده‌های میدانی، مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با ۲۰ نفر از مدیران پروژه، مهندسان ژئوتکنیک، مشاوران محیط زیست و کارشناسان سازمان‌های اجرایی انجام شد. علاوه بر آن، داده‌های فنی و زیست‌محیطی از مستندات پروژه‌ها شامل گزارش‌های طراحی، گزارش‌های ارزیابی اثرات زیست‌محیطی، گزارش‌های عملکردی و مستندات پایش کیفی خاک و آب استخراج گردید. در مرحله سوم، برای تحلیل داده‌ها از رویکردی ترکیبی بهره گرفته شد. داده‌های کیفی حاصل از مصاحبه‌ها و بررسی مستندات با استفاده از روش تحلیل مضمون و کدگذاری باز و محوری تحلیل شدند تا الگوهای اصلی در کاربرد فناوری‌های نوین و تأثیر آن‌ها بر پایداری شناسایی گردد. داده‌های کمی مربوط به شاخص‌های پایداری با استفاده از آمار توصیفی و مقایسه تطبیقی بین پروژه‌ها تحلیل شد. به منظور افزایش روایی تحلیل‌ها از روش سه‌سوسازی داده‌ها بهره گرفته شد؛ بدین ترتیب یافته‌ها از سه منبع اصلی (مصاحبه‌ها، داده‌های فنی، و مستندات ارزیابی زیست‌محیطی) با یکدیگر تطبیق داده شدند. در نهایت، بر مبنای نتایج این مراحل، یک چارچوب پیشنهادی برای به‌کارگیری بهینه فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی در پروژه‌های عمرانی شهری با رویکرد پایداری زیست‌محیطی تدوین گردید که می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری برای پروژه‌های آینده قرار گیرد.

۲-۱- محدوده مورد مطالعه

۱. پروژه پایدارسازی گود عمیق سعادت‌آباد (ساید پارک)

این پروژه در **منطقه سعادت‌آباد تهران**، یکی از محله‌های پرتراکم و با تراکم بالای ساختمان‌های مسکونی و تجاری، واقع شده است. با توجه به بافت فشرده و وجود ساختمان‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه در اطراف، گودبرداری این پروژه با عمق بالا (حدود ۲۵ متر) نیازمند استفاده از روش‌های پایدارسازی پیشرفته بوده است. موقعیت پروژه در نزدیکی خیابان سرو شرقی و میدان کاج، و در فاصله کم از معابر پر رفت‌وآمد شهری، بر حساسیت‌های اجرایی آن افزوده است.

شکل ۱- گودبرداری پروژه مسکونی ساید پارک سعادت آباد

۲. پروژه خط هفت مترو تهران (بخش تونل‌های شهری)

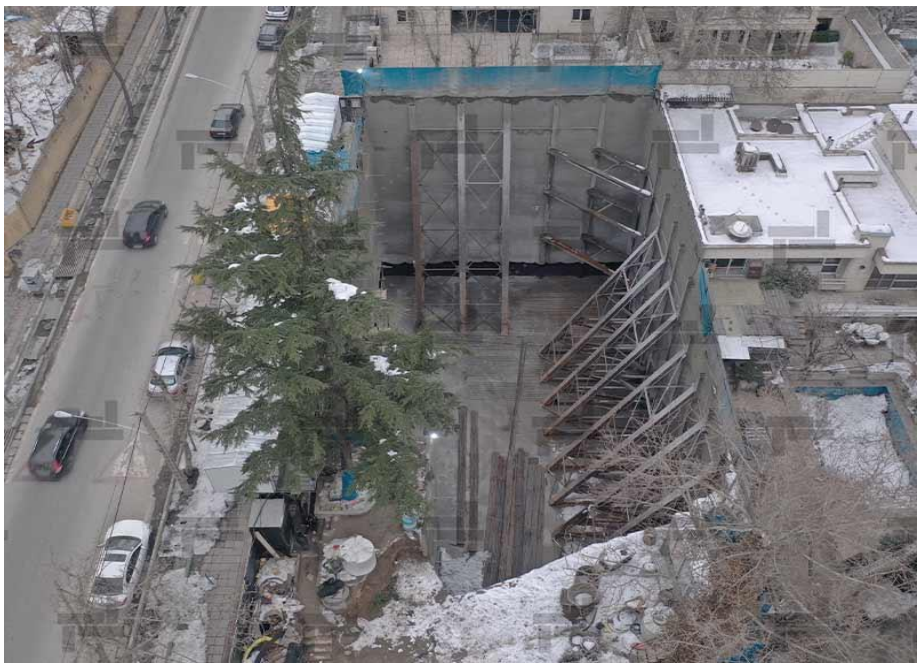
بخش مورد بررسی از پروژه خط هفت مترو تهران در **مناطق مرکزی و جنوبی شهر تهران** واقع شده است. این بخش از تونل‌های شهری عمدتاً در محدوده **خیابان مولوی تا میدان بریانک** اجرا شده و با عبور از زیر مناطق پرتردد و قدیمی شهر، با چالش‌های متعدد ژئوتکنیکی و زیست‌محیطی مواجه بوده است. خاک‌های متراکم و در برخی نقاط خاک‌های اشباع‌شده، مدیریت خاک‌های حفاری‌شده و کنترل اثرات زیست‌محیطی بر سفره‌های آب زیرزمینی، از مسائل کلیدی این بخش از پروژه بوده‌اند.

شکل ۲- گودبرداری خط ۷ مترو شهر تهران

۳. پروژه پایدارسازی گود نیاوران (عمارت سدروس)

این پروژه در **منطقه نیاوران تهران**، در شمال شهر و در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز واقع شده است. با توجه به موقعیت توپوگرافیک خاص منطقه و حضور خاک‌های مخلوط آبرفتی و سنگی، گودبرداری در این منطقه با چالش‌های فنی متعددی همراه بوده است. پروژه عمارت سدروس در نزدیکی خیابان بوکان واقع شده و در مجاورت بناهای تاریخی و فرهنگی قرار دارد. به‌دلیل حساسیت‌های

زیست‌محیطی و بافت باارزش منطقه، در این پروژه رویکرد ویژه‌ای در استفاده از فناوری‌های پایدار نظیر ژئوسینتتیک‌ها و مصالح بازیافتی اتخاذ شده است.



شکل ۳- پروژه پایدارسازی گود نیاوران (عمارت سدروس)

۳- بحث و نتایج

۳-۱- گام اول: مرور نظام‌مند ادبیات

در نخستین گام از فرآیند پژوهش، یک مرور نظام‌مند ادبیات با هدف شناسایی فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی و شاخص‌های کلیدی پایداری زیست‌محیطی در پروژه‌های عمرانی انجام گرفت. در این مرحله تلاش شد تا از طریق جمع‌آوری و تحلیل منابع معتبر، چارچوب نظری مناسبی برای طراحی بخش‌های بعدی تحقیق فراهم گردد.

فرآیند مرور نظام‌مند مطابق با الگوی پنج‌مرحله‌ای شامل: ۱. تعیین اهداف مرور، ۲. تعریف کلیدواژه‌ها و راهبرد جستجو، ۳. انتخاب منابع، ۴. تحلیل و کدگذاری اطلاعات، ۵. تدوین چارچوب نهایی انجام شد.

در گام نخست، هدف اصلی مرور، شناسایی فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی قابل استفاده در پروژه‌های عمرانی شهری، و شاخص‌های پایداری مرتبط با آن‌ها در سطح ملی و بین‌المللی تعیین گردید.

در گام دوم، راهبرد جستجو بر مبنای کلیدواژه‌هایی همچون فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی، پایداری زیست‌محیطی در مهندسی ژئوتکنیک، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی پروژه‌های عمرانی، ژئوسینتتیک‌ها، مصالح بازیافتی در ژئوتکنیک، بهسازی زیستی خاک و ارزیابی چرخه عمر در پروژه‌های عمرانی طراحی شد. این کلیدواژه‌ها در پایگاه‌های معتبر نظیر اسپرینگر، الزویر(ScienceDirect) ، تیلور و فرانسیس، وایلی و پایگاه‌های داخلی نظیر نورمگز، پایگاه استنادی علوم جهان اسلام(ISC) ، پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID) و پایگاه سیویلیکا جستجو گردید، در گام سوم، از میان حدود ۳۲۰ منبع اولیه شناسایی‌شده، پس از غربالگری بر اساس اعتبار علمی منبع، تاریخ انتشار (حداکثر ۱۰ سال اخیر)، ارتباط مستقیم با موضوع تحقیق و دسترسی به متن کامل، تعداد ۷۲ منبع جهت تحلیل نهایی انتخاب گردید. از این تعداد، ۴۱ منبع مربوط به مقالات ژورنالی بین‌المللی، ۱۸ منبع شامل مقالات فارسی معتبر و ۱۳ منبع شامل گزارش‌های فنی و اسناد سیاستی سازمان‌های بین‌المللی و ملی بوده است.

در گام چهارم، تحلیل محتوا و کدگذاری اطلاعات با استفاده از چارچوب تحلیل مضمون انجام شد. بر این اساس، فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی شناسایی‌شده به پنج گروه عمده طبقه‌بندی گردیدند:

۱-ژئوسینتتیک‌ها (ژئوتکستایل، ژئوگرید، ژئوممبران، ژئوکامپوزیت)
۲-مصالح تثبیت‌کننده زیستی (استفاده از فرآیندهای میکروبی برای بهبود خواص خاک)
۳- استفاده از مصالح بازیافتی (خاک اصلاح‌شده با مصالح بازیافتی صنعتی یا ساختمانی)
۴- روش‌های نوین بهسازی خاک (تزریق بهسازی، ستون‌های شنی و مصالح کم‌کربن)
۵- فناوری‌های پیشرفته زهکشی و مدیریت آب زیرسطحی
همچنین، شاخص‌های کلیدی پایداری زیست‌محیطی استخراج‌شده شامل موارد زیر بود:
۱-مصرف انرژی در طول چرخه عمر پروژه
۲- میزان انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای
۳-کیفیت خاک و آب‌های زیرزمینی
۴- مدیریت پسماندها و مصالح
۵-میزان مصرف منابع غیرقابل تجدید
۶-عملکرد سازه‌ای پایدار در درازمدت
در نهایت، چارچوب اولیه فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی با رویکرد پایداری و شاخص‌های پایداری قابل سنجش به‌عنوان خروجی این مرحله تدوین شد و مبنای طراحی ابزار گردآوری داده‌ها در گام‌های بعدی قرار گرفت. دسته‌بندی فناوری‌های شناسایی‌شده و شاخص‌های پایداری مرتبط با آن‌ها در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- دسته‌بندی فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی و شاخص‌های پایداری شناسایی‌شده از مرور نظام‌مند ادبیات

ردیف	فناوری نوین ژئوتکنیکی	نمونه‌های متداول	شاخص‌های پایداری مرتبط
۱	ژئوسینتتیک‌ها	ژئوتکستایل، ژئوگرید، ژئوممبران، ژئوکامپوزیت	کاهش مصرف مصالح طبیعی، بهبود مدیریت آب، کاهش اثرات محیطی
۲	مصالح تثبیت‌کننده زیستی	فرآیندهای میکروبی(MICP) ، افزودنی‌های زیستی	کاهش مصرف سیمان، کاهش انتشارCO_2
۳	استفاده از مصالح بازیافتی	مصالح ساختمانی بازیافتی، خاک اصلاح‌شده با مواد زائد صنعتی	کاهش مصرف منابع غیرقابل تجدید، کاهش پسماند
۴	روش‌های نوین بهسازی خاک	ستون‌های شنی، تزریق کم‌کربن، مصالح جدید بهسازی	بهبود کیفیت خاک، کاهش انرژی مصرفی در ساخت
۵	فناوری‌های پیشرفته زهکشی و مدیریت آب	سیستم‌های زهکشی نوین، کنترل آب زیرزمینی	کاهش آلودگی آب‌های زیرزمینی، افزایش دوام سازه

مطابق با جدول ۱، مهم‌ترین فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی شناسایی‌شده در این مطالعه شامل ژئوسینتتیک‌ها، مصالح تثبیت‌کننده زیستی، مصالح بازیافتی، روش‌های نوین بهسازی خاک و فناوری‌های پیشرفته زهکشی و مدیریت آب است. هر یک از این فناوری‌ها در بهبود شاخص‌های کلیدی پایداری زیست‌محیطی پروژه‌های عمرانی، از جمله کاهش مصرف انرژی، کاهش انتشار آلاینده‌ها، بهبود کیفیت خاک و آب، و بهینه‌سازی استفاده از منابع نقش مؤثری ایفا می‌کنند. این چارچوب مفهومی، مبنای طراحی بخش‌های میدانی و تحلیل داده‌های پروژه‌های موردی در مراحل بعدی تحقیق قرار خواهد گرفت.

۳-۲-گام دوم: انتخاب پروژه‌های موردی

در گام دوم، به‌منظور انجام مطالعه میدانی و تحلیل تجربی، نمونه‌هایی از پروژه‌های عمرانی شهری که در آن‌ها از فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی بهره گرفته شده بود، به‌عنوان پروژه‌های موردی انتخاب شدند. با توجه به اهداف تحقیق، انتخاب این پروژه‌ها به‌گونه‌ای انجام

شد که هم تنوع فناوری‌های مورد استفاده در آن‌ها وجود داشته باشد و هم از نظر نوع پروژه و میزان اثرات زیست‌محیطی، نماینده طیفی از پروژه‌های عمرانی شهر تهران باشند.

برای تعیین نمونه‌های موردی، ابتدا فهرستی از پروژه‌های عمرانی بزرگ و متوسط شهر تهران که در آن‌ها فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی به‌کار گرفته شده بود، تهیه گردید. این فهرست با استفاده از گزارش‌های فنی منتشرشده توسط سازمان‌های ذی‌ربط، شرکت‌های مشاور ژئوتکنیک، و مقالات تخصصی داخلی تدوین شد. در مرحله بعد، با مشورت خبرگان حوزه مهندسی ژئوتکنیک و محیط زیست، از میان پروژه‌های فهرست‌شده، سه پروژه به‌عنوان نمونه‌های نهایی انتخاب گردیدند.

معیارهای انتخاب پروژه‌های موردی عبارت بودند از:

۱. تنوع نوع پروژه :شامل پروژه‌های گودبرداری عمیق، زیرساخت‌های زیرزمینی و پروژه‌های پایدارسازی زمین.

۲. میزان به‌کارگیری فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی: استفاده از فناوری‌هایی نظیر ژئوسینتتیک‌ها، مصالح بازیافتی، بهسازی زیستی خاک، و فناوری‌های نوین زهکشی.

۳. اهمیت و گستردگی اثرات زیست‌محیطی پروژه: پروژه‌هایی که به لحاظ ابعاد و تأثیرات محتمل بر محیط زیست شهری، دارای اهمیت قابل توجهی بودند.

۴. دسترسی به داده‌های فنی و مدیریتی: امکان دسترسی به مستندات فنی پروژه، گزارش‌های ارزیابی اثرات زیست‌محیطی (EIA) و امکان برقراری ارتباط با کارشناسان و مدیران پروژه برای انجام مصاحبه‌های تکمیلی.

بر این اساس، سه پروژه زیر به‌عنوان نمونه‌های موردی انتخاب شدند:

۱. پروژه پایدارسازی گود عمیق سعادت‌آباد (ساید پارک) ⟵نمونه‌ای از پروژه‌های گودبرداری عمیق در بافت متراکم شهری، با به‌کارگیری فناوری‌های نوین نظیر روش Top-Down و مهار متقابل.

۲. پروژه خط هفت مترو تهران (بخش تونل‌های شهری) ⟵نمونه‌ای از پروژه‌های زیرساخت زیرزمینی با مقیاس بزرگ، شامل به‌کارگیری فناوری‌های نوین در پایدارسازی تونل و مدیریت زیست‌محیطی خاک‌های حفاری‌شده.

۳. پروژه پایدارسازی گود نیاوران (عمارت سدروس) ⟵نمونه‌ای از پروژه‌های پایدارسازی گود در مناطق حساس شهر تهران، با بهره‌گیری از ژئوسینتتیک‌ها و مصالح بازیافتی.

این سه پروژه به‌عنوان نمونه‌های موردی، مبنای گردآوری داده‌های میدانی و تحلیل‌های تجربی در ادامه تحقیق قرار گرفتند.

جدول ۲ - مشخصات پروژه‌های موردی انتخاب‌شده در پژوهش حاضر

ردیف	عنوان پروژه	نوع پروژه	فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی استفاده‌شده	ملاحظات زیست‌محیطی مهم
۱	پروژه پایدارسازی گود عمیق سعادت‌آباد (ساید پارک)	گودبرداری عمیق در بافت شهری	روش اجرای تاپ-داون، مهار متقابل، ژئوسینتتیک‌ها	کاهش اثرات بر ساختمان‌های مجاور، کنترل نشست
۲	پروژه خط هفت مترو تهران (بخش تونل‌های شهری)	زیرساخت حمل‌ونقل زیرزمینی (تونل مترو)	بهسازی خاک با مصالح کم‌کربن، مدیریت پسماند خاک حفاری‌شده، سیستم زهکشی پیشرفته	مدیریت آلاینده‌ها در خاک و آب زیرزمینی
۳	پروژه پایدارسازی گود نیاوران (عمارت سدروس)	گودبرداری عمیق در منطقه حساس شهری	ژئوسینتتیک‌ها، مصالح بازیافتی در خاک‌پرکنی، بهسازی زیستی خاک	بهبود کیفیت خاک، کاهش استفاده از منابع اولیه

مطابق با جدول ۲، پروژه‌های انتخاب‌شده در این پژوهش از نظر نوع، مقیاس و فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی به‌کاررفته، تنوع مناسبی دارند و هر یک در بافت شهری تهران از اهمیت زیست‌محیطی ویژه‌ای برخوردار هستند. این تنوع در انتخاب نمونه‌ها، امکان تحلیل

جامع‌تر ابعاد مختلف پایداری و بررسی چالش‌ها و فرصت‌های به‌کارگیری فناوری‌های نوین در پروژه‌های عمرانی شهری را فراهم می‌سازد. در گام‌های بعدی، داده‌های مرتبط با این پروژه‌ها از طریق ابزارهای گردآوری داده‌ها به‌طور تفصیلی استخراج و تحلیل خواهند شد.

۳-۳- گام سوم تحلیل کیفی

۳-۳-۱-کدگذاری باز

در مرحله نخست تحلیل، متن کامل مصاحبه‌ها در نرم‌افزار MAXQDA کدگذاری باز شد. در مجموع ۵۵ کد باز از داده‌ها استخراج گردید. در ادامه، نمونه‌ای از کدهای باز به همراه نقل‌قول‌های نمونه از مصاحبه‌شونده‌ها و شناسه مصاحبه‌شوندگان ارائه می‌شود.

جدول ۳- نمونه کدگذاری باز حاصل از مصاحبه های خبرگان

شناسه مصاحبه‌شونده	نقل‌قول نمونه از مصاحبه‌شونده	کد باز
مصاحبه‌شونده شماره ۳، مهندس ژئوتکنیک	«ما بعد از اجرای ستون‌های شنی و ژئوسینتتیک‌ها دیدیم که کیفیت خاک به لحاظ مقاومت و نفوذپذیری خیلی بهتر شد»	بهبود کیفیت خاک
مصاحبه‌شونده شماره ۷، مشاور محیط زیست	«کارهایی که با لایه‌های ژئوم مبران انجام دادیم عملاً نفوذپذیری را خیلی کنترل کرد»	کاهش نفوذپذیری خاک
مصاحبه‌شونده شماره ۱۲، مدیر پروژه مترو	«پروژه مترو باعث شده که با زهکشی پیشرفته، آب زیرزمینی در محدوده پروژه کمتر آلوده بشه»	بهبود کیفیت آب‌های زیرزمینی
مصاحبه‌شونده شماره ۵، مدیر پروژه گودبرداری	«استفاده از فناوری جدید باعث شد که تعداد ماشین‌آلات و زمان مصرف انرژی به‌طور قابل توجهی کم بشه»	کاهش مصرف انرژی در فرآیند اجرا
مصاحبه‌شونده شماره ۱۰، کارشناس فنی پیمانکار	«در این پروژه حدود ۴۰ درصد مصالح خاکی از بازیافت نخاله‌های ساختمانی تهیه شد»	استفاده از مصالح بازیافتی
مصاحبه‌شونده شماره ۸، مشاور ژئوتکنیک	«یکی از مشکلات اینه که تکنولوژی‌های جدید هنوز گرونه و همه کارفرماها قبول نمی‌کنن»	هزینه‌های بالای فناوری‌های نوین
مصاحبه‌شونده شماره ۱۴، مدیر شرکت مشاور	«خیلی از این فناوری‌ها در ایران هنوز استاندارد ندارن و تو قراردادها سخت می‌شه آوردشون»	نبود استانداردهای بومی
مصاحبه‌شونده شماره ۱۶، کارشناس محیط زیست شهرداری	«ما هنوز خیلی از مهندسانمون آموزش ندیدن که چطور با این مصالح جدید کار کنن»	نیاز به آموزش مهندسان و پیمانکاران
مصاحبه‌شونده شماره ۱۹، کارشناس روابط عمومی پروژه	«ساکنان اطراف پروژه نسبت به کاهش گرد و غبار و آلودگی خیلی راضی بودن»	رضایت عمومی از نتایج پروژه‌ها

۳-۳-۲- کدگذاری محوری

در مرحله دوم، کدهای باز با تحلیل در نرم‌افزار MAXQDA در قالب ۴ مقوله محوری سازماندهی شدند:

۱.اثربخشی فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی بر شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی

⟵بهبود کیفیت خاک، کاهش نفوذپذیری خاک، بهبود کیفیت آب‌های زیرزمینی، کاهش مصرف انرژی، استفاده از مصالح بازیافتی، کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای.

۲.چالش‌های نهادی، فنی و اقتصادی

⟵هزینه‌های بالای فناوری‌های نوین، نبود استانداردهای بومی، نیاز به آموزش مهندسان و پیمانکاران، مقاومت نهادی.

۳.عوامل مدیریتی و آموزشی تسهیل‌کننده

⟵آموزش مهندسان و پیمانکاران، وجود تجربه‌های موفق، حمایت مدیریتی، مشارکت بین‌بخشی.

۴. پیامدهای اجتماعی و مدیریتی فناوری‌های نوین

⟵رضایت عمومی از نتایج پروژه‌ها، بهبود هماهنگی بین‌بخشی، بهبود زمان‌بندی پروژه‌ها.

۳-۳-۳- کدگذاری انتخابی (مضامین نهایی)

در مرحله سوم، از تجمیع مقوله‌های محوری فوق، سه مضمون نهایی استخراج شد:

۱.کارآمدی فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی در ارتقای پایداری زیست‌محیطی پروژه‌های عمرانی شهری

⟵شامل بهبود کیفیت خاک و آب، کاهش مصرف انرژی و منابع، کاهش تولید آلاینده‌ها.

۲.محدودیت‌ها و چالش‌های نهادی، اقتصادی و فنی در به‌کارگیری این فناوری‌ها

⟵شامل هزینه‌های بالا، کمبود استانداردهای بومی، کمبود دانش فنی، مقاومت نهادی.

۳. نقش عوامل مدیریتی و آموزشی در تسهیل و موفقیت به‌کارگیری فناوری‌های نوین

⟵شامل آموزش مستمر، حمایت مدیریتی، مشارکت بین‌بخشی، ارتقای رضایت عمومی.

یافته‌های تحلیل کیفی نشان داد که فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی، به‌ویژه در پروژه‌های منتخب شهر تهران، به‌طور محسوسی موجب بهبود شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی شده‌اند. بهبود کیفیت خاک و آب‌های زیرزمینی، کاهش مصرف انرژی و مصالح طبیعی، و کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، از مهم‌ترین آثار مثبت این فناوری‌ها بود. با این حال، موانع مهمی همچون هزینه‌های بالا، نبود استانداردهای بومی و کمبود دانش فنی در میان مجریان، روند پذیرش و گسترش این فناوری‌ها را محدود می‌سازد. همچنین تحلیل‌ها نشان داد که حمایت مدیریتی، آموزش مستمر و وجود تجربه‌های موفق نقش مهمی در تسهیل به‌کارگیری این فناوری‌ها دارند و موجب ارتقای رضایت عمومی از نتایج پروژه‌ها می‌شوند.

۳-۴- نتایج کمّی

در این پژوهش، برای تحلیل کمی داده‌ها، از اطلاعات فنی و زیست‌محیطی سه پروژه منتخب استفاده شد. این اطلاعات از مستندات رسمی پروژه‌ها شامل گزارش‌های ارزیابی اثرات زیست‌محیطی (EIA)، گزارش‌های پایش کیفیت خاک و آب، و گزارش‌های مصرف انرژی و مصالح استخراج گردید.

تحلیل کمی به‌صورت آمار توصیفی و مقایسه تطبیقی بین پروژه‌ها انجام شد تا تأثیر به‌کارگیری فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی بر شاخص‌های کلیدی پایداری زیست‌محیطی بررسی گردد.

جدول ۴ - مقادیر شاخص‌های کلیدی پایداری زیست‌محیطی در سه پروژه منتخب

شاخص کلیدی	پروژه پایدارسازی گود سعادت‌آباد	پروژه خط هفت مترو تهران	پروژه گود نیاوران
مصرف انرژی (کیلووات ساعت بر مترمربع)	۱۲۰	۹۵	۱۱۰
درصد استفاده از مصالح بازیافتی درصد	٪۳۵	٪۲۰	٪۴۰
کاهش نفوذپذیری خاک (درصد بهبود)	٪۷۰	٪۶۵	٪۷۵
کاهش غلظت نیترات در آب زیرزمینی درصد	٪۵۰	٪۴۵	٪۵۵
میزان تولید پسماند (تن)	۲۵۰	۳۰۰	۲۲۰
میزان انتشار CO_2 تن معادلCO_2	۴۵	۳۵	۴۰

تحلیل کمی داده‌ها با استفاده از اطلاعات فنی و زیست‌محیطی سه پروژه منتخب انجام شد. داده‌ها از مستندات رسمی شامل گزارش‌های ارزیابی اثرات زیست‌محیطی، گزارش‌های پایش کیفیت خاک و آب و گزارش‌های مربوط به مصرف انرژی و مصالح استخراج گردید. جدول ۴ مقادیر شاخص‌های کلیدی پایداری زیست‌محیطی در سه پروژه منتخب را ارائه می‌دهد. مصرف انرژی در پروژه خط هفت مترو تهران ۹۵ کیلووات ساعت بر مترمربع بود که در مقایسه با پروژه سعادت‌آباد (۱۲۰ کیلووات ساعت) و نیاوران (۱۱۰ کیلووات ساعت) پایین‌ترین میزان را نشان داد. این امر بیانگر بهره‌گیری مناسب از تجهیزات بهینه و فرآیندهای پیشرفته در این پروژه است. در

زمینه استفاده از مصالح بازیافتی، پروژه گود نیاوران با ۴۰ درصد بیشترین سهم استفاده از مصالح بازیافتی را داشت، در حالی که این میزان در پروژه سعادت‌آباد ۳۵ درصد و در مترو ۲۰ درصد بود. این تفاوت نشان‌دهنده تفاوت در رویکردهای مدیریتی پروژه‌ها نسبت به استفاده از منابع پایدار است.

در شاخص بهبود کیفیت خاک، کاهش نفوذپذیری خاک در پروژه نیاوران به ۷۵ درصد رسید، که بالاترین میزان بین پروژه‌ها بود، در حالی که این میزان در سعادت‌آباد ۷۰ درصد و در مترو ۶۵ درصد گزارش شد. این یافته نشان‌دهنده موفقیت بیشتر اقدامات ژئوتکنیکی در پروژه نیاوران است. از منظر بهبود کیفیت آب‌های زیرزمینی، کاهش غلظت نیترات در آب در پروژه نیاوران ۵۵ درصد بود، در مترو ۴۵ درصد و در سعادت‌آباد ۵۰ درصد ثبت شد. این مقادیر نشان می‌دهد که در هر سه پروژه بهبود قابل توجهی در کیفیت آب حاصل شده است. میزان تولید پسماند در پروژه مترو ۳۰۰ تن بود که نسبت به پروژه‌های سعادت‌آباد (۲۵۰ تن) و نیاوران (۲۲۰ تن) بالاتر بود؛ این می‌تواند به ماهیت عملیات حفاری در پروژه مترو مرتبط باشد. در نهایت، میزان انتشار معادل CO_2 در پروژه مترو ۳۵ تن بود که از پروژه سعادت‌آباد (۴۵ تن) و نیاوران (۴۰ تن) کمتر بوده و بیانگر عملکرد مناسب این پروژه در مدیریت انتشار آلاینده‌ها است.

برای افزایش روایی و اعتبار یافته‌ها، از روش سه‌سوسازی داده‌ها استفاده شد. مقایسه نتایج تحلیل کیفی، تحلیل کمی و مشاهدات میدانی نشان داد که یافته‌های سه منبع داده هم‌پوشانی مناسبی دارند. مضامین شناسایی‌شده در تحلیل کیفی از جمله بهبود کیفیت خاک و آب، کاهش مصرف انرژی و استفاده از مصالح بازیافتی در داده‌های کمی نیز منعکس گردید. به‌عنوان مثال، کدهای باز مرتبط با بهبود کیفیت خاک و آب به‌خوبی با کاهش ۷۵ درصدی نفوذپذیری و کاهش ۵۵ درصدی نیترات در پروژه نیاوران تطبیق داشت. همچنین چالش‌های شناسایی‌شده در تحلیل کیفی مانند هزینه‌های بالا و نیاز به آموزش، در مستندات پروژه‌ها نیز به وضوح دیده شد و در مصاحبه‌ها تأکید گردید. این هم‌پوشانی سه‌سویه داده‌ها نشان‌دهنده اعتبار بالای تحلیل‌های ارائه‌شده در این تحقیق است.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی تأثیر معناداری بر بهبود پایداری زیست‌محیطی پروژه‌های عمرانی شهری در تهران داشته‌اند. تحلیل کیفی مصاحبه‌ها سه مضمون اصلی را آشکار کرد. نخست، کارآمدی این فناوری‌ها در ارتقای شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی در قالب بهبود کیفیت خاک و آب‌های زیرزمینی، کاهش مصرف انرژی و منابع طبیعی، و کاهش تولید آلاینده‌ها به‌ویژه گازهای گلخانه‌ای به‌خوبی منعکس شد. مصاحبه‌شوندگان در این زمینه تأکید داشتند که استفاده از ژئوسینتتیک‌ها، مصالح بازیافتی و فناوری‌های نوین زهکشی به میزان چشمگیری کیفیت خاک و آب را بهبود بخشیده است. نمونه بارز این موضوع در پروژه گود نیاوران مشاهده شد که کاهش نفوذپذیری خاک به میزان ۷۵ درصد و کاهش غلظت نیترات در آب زیرزمینی به میزان ۵۵ درصد حاصل شد. دومین مضمون شناسایی‌شده به چالش‌های نهادی، اقتصادی و فنی مربوط می‌شد. بسیاری از مصاحبه‌شوندگان به هزینه‌های بالای فناوری‌های نوین، کمبود دانش فنی در میان مهندسان و نبود استانداردهای بومی به‌عنوان موانع اصلی در گسترش این فناوری‌ها اشاره کردند. سومین مضمون به نقش کلیدی عوامل مدیریتی و آموزشی در موفقیت به‌کارگیری این فناوری‌ها اختصاص داشت. مصاحبه‌شوندگان بر اهمیت آموزش مستمر، وجود تجربه‌های موفق و حمایت مدیران پروژه‌ها تأکید داشتند.

یافته‌های تحلیل کمی داده‌ها نیز این الگوها را به‌خوبی تأیید کرد. پروژه مترو با مصرف انرژی ۹۵ کیلووات ساعت بر مترمربع کمترین میزان را در میان پروژه‌ها داشت که نشان‌دهنده بهره‌گیری از تجهیزات بهینه و فرآیندهای اجرایی کارآمد بود. از سوی دیگر، استفاده از مصالح بازیافتی در پروژه نیاوران به ۴۰ درصد رسید که بالاترین میزان در میان پروژه‌های بررسی‌شده بود و نشان‌دهنده سیاست فعال در استفاده از منابع پایدار محسوب می‌شود. بهبود کیفیت خاک و آب در هر سه پروژه قابل توجه بود اما عملکرد پروژه نیاوران در کاهش نفوذپذیری خاک (۷۵ درصد) و کاهش نیترات در آب (۵۵ درصد) نسبت به سایر پروژه‌ها پیشتاز بود. در زمینه مدیریت پسماند و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، پروژه مترو با تولید ۳۰۰ تن پسماند و انتشار ۳۵ تن CO_2 عملکرد مناسبی داشت که می‌تواند به طراحی بهتر فرآیندهای اجرایی در این پروژه نسبت داده شود.

هم‌پوشانی بین نتایج تحلیل کیفی و کمی و مشاهدات میدانی، یافته‌های تحقیق را تقویت می‌کند. بهبود کیفیت خاک و آب، کاهش مصرف انرژی و افزایش استفاده از مصالح بازیافتی که در تحلیل کیفی به‌عنوان نقاط قوت شناسایی شد، در داده‌های کمی نیز به‌طور معنادار تأیید شد. چالش‌های مرتبط با هزینه، دانش فنی و استانداردهای بومی نیز در هر سه منبع داده منعکس گردید. این هم‌پوشانی نشان می‌دهد که فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی می‌توانند به شکل مؤثر در بهبود پایداری زیست‌محیطی پروژه‌های عمرانی نقش‌آفرینی کنند، اما موفقیت آن‌ها در گرو مدیریت صحیح چالش‌های نهادی و ارتقای ظرفیت فنی ذی‌نفعان است. از این رو، برای افزایش کارآمدی

این فناوری‌ها در سطح پروژه‌های شهری، تدوین استانداردهای بومی، گسترش برنامه‌های آموزشی برای مهندسان و مدیران پروژه، و تسهیل فرآیندهای قانونی و اجرایی ضروری به نظر می‌رسد.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که به‌کارگیری فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی می‌تواند به‌طور معناداری موجب ارتقای شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی در پروژه‌های عمرانی شهری شود. تحلیل‌های کیفی و کمی انجام‌شده در سه پروژه منتخب شهر تهران نشان داد که این فناوری‌ها به بهبود کیفیت خاک و آب‌های زیرزمینی، کاهش مصرف انرژی و منابع طبیعی، افزایش استفاده از مصالح بازیافتی و مدیریت بهتر پسماندها منجر شده‌اند. یافته‌ها همچنین حاکی از آن بود که عملکرد پروژه‌ها در این زمینه به‌شدت به سطح دانش فنی تیم‌های اجرایی، سیاست‌های مدیریتی پروژه و میزان استفاده از استانداردهای مناسب بستگی دارد.

در عین حال، این تحقیق نشان داد که چالش‌های مهمی همچون هزینه‌های بالای اولیه، کمبود دانش فنی، نبود استانداردهای بومی و مقاومت نهادی در مسیر به‌کارگیری گسترده این فناوری‌ها وجود دارد. از این رو، موفقیت در به‌کارگیری این فناوری‌ها در گرو تدوین استانداردهای ملی، ارتقای ظرفیت آموزشی مهندسان و مدیران پروژه، و فراهم‌سازی بسترهای نهادی مناسب است.

از منظر سیاستی، توصیه می‌شود که نهادهای مرتبط با مدیریت پروژه‌های عمرانی شهری به تدوین دستورالعمل‌های بومی برای استفاده از فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی اقدام کنند و برنامه‌های آموزشی فراگیر برای ارتقای دانش فنی ذی‌نفعان طراحی و اجرا نمایند. همچنین، اتخاذ سیاست‌های تشویقی برای افزایش استفاده از مصالح بازیافتی و فناوری‌های کم‌مصرف در پروژه‌های عمرانی می‌تواند به تسهیل گذار به رویکردهای پایدار در توسعه شهری کمک کند.

در نهایت، اگرچه این پژوهش تصویری نسبتاً جامع از کاربرد این فناوری‌ها در سه پروژه منتخب ارائه کرده است، محدودیت‌هایی همچون محدود بودن دامنه پروژه‌های بررسی‌شده و میزان دسترسی به برخی داده‌های دقیق وجود داشته است. انجام پژوهش‌های آتی در مقیاس گسترده‌تر و در پروژه‌های متنوع‌تر می‌تواند به غنای بیشتر دانش موجود در این حوزه کمک کند.

۵- منابع و مراجع

1- Firoozi AA, Firoozi AA, Maghami MR. Sustainable practices in geotechnical engineering: Forging pathways for resilient infrastructure. Results in Engineering. 2025 Jun; 26: 105577. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105577.

2-Onyelowe KC, Mojtahedi FF, Ebid AM, Rezaei A, Osinubi KJ, Eberemu AO, Rehman ZU. Selected AI optimization techniques and applications in geotechnical engineering. *Cogent Engineering.* 2022;10(1). https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2153419.

3-Karkush MO, Choudhury D, editors. *Geotechnical Engineering and Sustainable Construction: Sustainable Geotechnical Engineering.* Singapore: Springer; 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6277-5

4-Li Y, Zhao X, Liu C, Zhang Z. Applications of digital technologies in promoting sustainable construction practices: a literature review. *Sustainability.* 2025; 17(2): 487. https://doi.org/10.3390/su17020487

5-Yang Z, Zhu C, Zhu Y, Li X. Blockchain technology in building environmental sustainability: a systematic literature review and future perspectives. *Building and Environment.* 2023; 245:110970. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110970.

6-Wu P, Lyu Y, Ali N. Sustainability in geotechnical engineering: a bibliometric analysis. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences.* 2024;14(12). http://dx.doi.org/10.6007/IJARBSS/v14-i12/24079

7- Vieira CS. Sustainability in geotechnics through the use of environmentally friendly materials. *Sustainability.* 2022;14(3):1155. https://doi.org/10.3390/su14031155

8- Palmeira EM, Araújo GLS, Santos ECG. Sustainable solutions with geosynthetics and alternative construction materials: a review. *Sustainability.* 2021; 13: 12756. https://doi.org/10.3390/su132212756.

9- Vianna VF, Fleury MP, Menezes GB, Coelho AT, Bueno C, Lins da Silva J, Luz MP. Bioengineering techniques adopted for controlling riverbanks' superficial erosion of the Simplício Hydroelectric Power Plant, Brazil. *Sustainability.* 2020;12(19):7886. https://doi.org/10.3390/su12197886

10- Matthes M, May M, Nolet N, Shackelford N. The use of vegetation in hydroelectric reservoir shoreline management: a global review of strategies and applications. *Ecological Engineering.* 2025; 215: 107603. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2025.107603

11- Samsami, Z., Jafari, A.J., Delnavaz, M. *et al.* Environmental impact assessment of southern tehran wastewater treatment plant using life cycle assessment (LCA). *Sci Rep: 2025:* 15, 294 https://doi.org/10.1038/s41598-024-81380-4.

12-Raju R. K, Shweta K. Advances in Geotechnical Engineering: Innovative Techniques for Sustainable Ground Improvement and Risk Mitigation. International Journal of Geological and Geotechnical Engineering. 2024; 10(2): 10–14. https://journalspub.com/journal/ijgge/

13-Yamini N. Deshvena, Sushmita M. Deshpande. *Geotechnical and Geological Engineering: Interdisciplinary Approaches to Sustainable Infrastructure.* International Journal of Geological and Geotechnical Engineering. 2024; 10(2): 1–9. https://journalspub.com/publication/ijgge/article=13833/

14- Antonio J. Sánchez-Garrido, Ignacio J. Navarro, Víctor Yepes. Evaluating the sustainability of soil improvement techniques in foundation substructures. Journal of Cleaner Production. 2022; 351: 131463. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131463.

15-Sustainability in Geotechnical Engineering (SGE) Committee. Sustainability in Geotechnical Engineering. Module developed for Geotech Tools website. August 2021. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.geoinstitute.org/sites/default/files/inline-files/SM_GTT_Final_12122022.pdf&ved=2ahUKEwis5ae2tp2OAxWTTaQEHVg1FYwQFnoECBkQAQ&usg=AOvVaw2esEO4eZYY5jb_Gjuuz3Ge.

16-Ouhadi, V. R., Qarelou, Z., Naderi, F. Impact of pH Variations of Kaolinite upon Some of its Geotechnical and Geo- Environmental Properties. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021; 51(104): 11-17. doi: https://doi.org/10.22034/jcee.2019.9093.

17-Naeimi, M., Haddad, A., Dehestani, H., Zandifar, S. Assessing the Impacts of Landfills on Environment using Geotechnical Factors, Case study: Landfill of Quchan. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 2021; 10(30): 151-166. https://doi.org/10.22111/jneh.2021.35483.1694.

18- Zamanian, M.; Hassanvandian, M.; Noorzad, A. Stabilizing rammed earth walls as a sustainable construction method with eco-friendly material: a case study. Journal of Structural and Construction Engineering. 2022; 9(10): 122-135 https://doi.org/10.22065/jsce.2022.304317.2569.

19-Ouhadi, V.; Amiri, M.; Goodarzi, A. The Special Potential of Nano-Clays for Heavy Metal Contaminant Retention in Geo-Environmental Projects. Journal of Civil and Surveying Engineering. 2012; 45(6): 631-642. https://jcse.ut.ac.ir/article_24919.html?lang=fa.