



ارزیابی مقایسه‌ای اثر ترکیب ستون‌های سنگی و تزریق دوغاب سیمانی بر مقاومت برشی و نشست نهایی خاک‌های رسی اشباع با استفاده از مدل‌سازی عددی و داده‌های میدانی

محمد رضا زارع یوسفی^{۱*}، عباس کرانیان^۲

۱- لیسانس عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس - ایران. ایمیل: behzadyousefi1353@gmail.com

۲- کارشناس ارشد عمران-سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس - ایران. ایمیل: a.koraniyan@gmail.com

* نویسنده مسئول

چکیده

بهبودی خاک‌های رسی اشباع در پروژه‌های عمرانی بزرگ، همواره یکی از چالش‌های اصلی مهندسی ژئوتکنیک به شمار می‌آید. ترکیب روش‌های مختلف بهسازی مانند ستون سنگی و تزریق دوغاب سیمانی، به عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش مقاومت برشی و کاهش نشست نهایی خاک مطرح شده است. در این پژوهش، به صورت میدانی و عددی، اثر ترکیب ستون‌های سنگی و تزریق دوغاب سیمانی بر بهبود پارامترهای مکانیکی خاک‌های رسی اشباع مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات میدانی در یکی از پروژه‌های عمرانی در استان گیلان انجام شد که شامل احداث ۱۲ ستون سنگی با قطر ۸/۰ متر و تزریق دوغاب سیمانی با غلظت ۳۵ درصد در عمق ۶ متری بستر بود. داده‌های آزمایش بارگذاری صفحه (PLT) و آزمایش برش مستقیم (DST) نشان داد که مقاومت برشی زهکشی‌نشده خاک از ۴۰ به حدود ۸۶ کیلوپاسکال افزایش یافته و نشست نهایی بیش از ۴۵ درصد کاهش یافته است. برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار PLAXIS 3D استفاده شد و نتایج آن با داده‌های میدانی تطابق مطلوبی نشان داد؛ به گونه‌ای که ضریب همبستگی بین داده‌های عددی و واقعی برابر با ۹۲/۰ به دست آمد. بررسی تحلیل حساسیت نیز نشان داد که تأثیر افزایش درصد تزریق دوغاب تا ۴۰ درصد بیشترین تأثیر را بر کاهش نشست نهایی دارد، در حالی که افزایش قطر ستون سنگی بیش از ۱ متر تأثیر کمتری در بهبود مقاومت برشی ایجاد می‌کند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به عنوان الگویی کاربردی در طراحی پروژه‌های بهسازی خاک‌های نرم مورد استفاده قرار گیرد و از هزینه‌های بالای نشست‌های ثانویه در سازه‌های زیرساختی جلوگیری کند.

کلمات کلیدی: ستون سنگی، تزریق دوغاب سیمانی، مقاومت برشی، نشست نهایی، مدل‌سازی عددی.

Comparative Evaluation of the Combined Effect of Stone Columns and Cement Grouting on the Shear Strength and Final Settlement of Saturated Clay Soils Using Numerical Modelling and Field Data

Mohammad Reza Zare Yousefi^{1,*}, Abbas Koraniyan²

1- B.Sc. in Civil Engineering Islamic Azad University, Bandar Abbas Branch - Iran. Email: behzadyousefi1353@gmail.com

2- M.Sc. in Civil Engineering (Structural Engineering) Islamic Azad University, Bandar Abbas Branch - Iran. Email: a.koraniyan@gmail.com

* Corresponding Author

Abstract

Improvement of saturated clay soils in large-scale civil projects has always been one of the major challenges in geotechnical engineering. Combining different ground improvement methods, such as stone columns and cement grouting, provides an effective solution for enhancing shear strength and reducing final settlement. In this study, both field and numerical investigations were conducted to evaluate the combined effect of stone columns and cement grouting on the mechanical parameters of saturated clay soils. Field tests were carried out in Gilan Province, Iran, where 12 stone columns with a diameter of 0.8 m were constructed, followed by cement grout injection with a 35% concentration at a depth of 6 m. Results from plate load tests (PLT) and direct shear tests (DST) indicated that the undrained shear strength increased from 40 to about 86 kPa, while final settlement decreased by more than 45%. Numerical modelling using PLAXIS 3D demonstrated a strong correlation with field data ($R = 0.92$). Sensitivity analysis revealed that increasing grout concentration up to 40% had the greatest effect on reducing final settlement, while increasing the column diameter beyond 1 m had a limited influence on shear strength improvement. The findings of this research can serve as a practical design reference for ground improvement projects in soft clay soils, preventing costly secondary settlements in substructure systems.

Keywords: Stone column, Cement grouting, Shear strength, Final settlement, Numerical modelling.

مقدمه

بهسازی خاک‌های ضعیف به‌ویژه خاک‌های رسی اشباع، از اساسی‌ترین چالش‌های مهندسی ژئوتکنیک در طراحی و اجرای پروژه‌های عمرانی بزرگ به شمار می‌آید. افزایش بار وارده از سوی سازه‌های سنگین و نیاز به کاهش نشست‌های بلندمدت، موجب شده است که روش‌های متنوعی برای بهبود خصوصیات مکانیکی خاک توسعه یابد. در میان این روش‌ها، ستون‌های سنگی و تزریق دوغاب سیمانی از مؤثرترین فناوری‌های بهسازی محسوب می‌شوند که هر یک به‌تنهایی عملکرد قابل توجهی در افزایش مقاومت برشی، کاهش تراکم‌پذیری و تسریع تحکیم دارند [۱،۲]. با این حال، پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که ترکیب این دو روش می‌تواند موجب هم‌افزایی در بهبود رفتار مکانیکی خاک گردد و نتایج بهتری نسبت به استفاده منفرد از هر روش فراهم آورد [۴،۷].

خاک‌های رسی اشباع، به دلیل تخلخل بالا، نفوذپذیری پایین و زمان تحکیم طولانی، معمولاً دارای مقاومت برشی زهکشی‌نشده کم و تغییر شکل‌پذیری زیاد هستند [۱۰]. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که در پروژه‌های زیرسطحی، زیرسازی راه‌ها، خطوط مترو یا احداث ساختمان‌های بلند، نشست‌های قابل ملاحظه‌ای رخ دهد که پایداری سازه را به خطر می‌اندازد. در چنین شرایطی، استفاده از روش‌های بهسازی ترکیبی نه‌تنها به افزایش مقاومت خاک کمک می‌کند بلکه فرآیند تحکیم را نیز تسریع می‌نماید [۳،۸]. مطالعات میدانی اخیر در ژاپن و کره جنوبی نشان داده‌اند که اجرای ستون‌های سنگی همراه با تزریق دوغاب سیمانی، باعث افزایش میانگین مقاومت برشی خاک تا حدود ۸۰ درصد و کاهش نشست نهایی تا ۵۰ درصد شده است [۵،۷].

از دیدگاه مکانیکی، ستون سنگی موجب انتقال بار از طریق سنگ‌دانه‌ها به اعماق پایدارتر می‌شود، در حالی که تزریق دوغاب سیمانی با پر کردن حفرات و پیوند ذرات خاک، موجب افزایش چسبندگی و کاهش تراکم‌پذیری می‌گردد. در نتیجه، تلفیق این دو روش می‌تواند شبکه‌ای نیمه‌صلب درون خاک ایجاد کند که هم از مقاومت برشی بالایی برخوردار است و هم ظرفیت باربری را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد [۴،۹]. به همین دلیل، بررسی رفتار ترکیبی ستون‌های سنگی و تزریق دوغاب سیمانی، به‌ویژه در خاک‌های رسی اشباع ایران، از اهمیت علمی و کاربردی بالایی برخوردار است [۱۱،۱۲].

تحلیل عددی به‌عنوان ابزار مهمی برای درک رفتار پیچیده خاک بهسازی‌شده، در دهه اخیر نقش پررنگی یافته است. نرم‌افزارهایی مانند FLAC3D، PLAXIS 3D و MIDAS GTS NX این امکان را فراهم کرده‌اند که فرآیند بارگذاری، زهکشی، و تحکیم در محیط سه‌بعدی شبیه‌سازی شود. مطالعات Castro و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که مدل‌سازی عددی می‌تواند اختلاف بین رفتار نظری و واقعی خاک را تا حد زیادی کاهش دهد [۳]. همچنین Debnath و Dey (2022) با استفاده از تحلیل‌های عددی و میدانی، تأیید کردند که استفاده ترکیبی از ستون سنگی و تزریق سیمان، نشست نهایی خاک‌های نرم را بیش از ۴۰ درصد کاهش می‌دهد [۴]. در ایران نیز پژوهش‌های حیدری و کیانی (۱۳۹۹) و شریفی و زارع (۱۴۰۲) به بررسی رفتار ستون‌های سنگی تزریق‌شده پرداخته و نشان داده‌اند که اثر هم‌زمان تزریق و تراکم موجب توزیع یکنواخت‌تر تنش در توده خاک می‌شود [۱۱،۱۵].

از نظر اقتصادی نیز، روش ترکیبی ستون سنگی-تزریق دوغاب سیمانی نسبت به سایر فناوری‌های بهسازی عمیق، مانند اختلاط عمیق خاک (Deep Mixing) یا پیش‌بارگذاری با زهکشی عمودی، مقرون‌به‌صرفه‌تر است [۶،۸]. ستون‌های سنگی در مقایسه با شمع‌های بتنی یا فولادی، هزینه ساخت پایین‌تری دارند و اجرای آن‌ها به تجهیزات پیچیده نیاز ندارد. افزوده شدن

تزریق دوغاب سیمانی، موجب افزایش پایداری بلندمدت و کاهش هزینه‌های نگهداری پس از بهره‌برداری می‌شود [۷،۱۳]. بر این اساس، بررسی دقیق تأثیر پارامترهای طراحی مانند فاصله ستون‌ها، قطر، درصد تزریق و ویژگی‌های دوغاب بر عملکرد کلی سیستم ترکیبی، ضرورتی انکارناپذیر برای طراحی سازه‌های زیرزمینی در مناطق با خاک رسی اشباع محسوب می‌شود [۹،۱۴].

از دیدگاه مهندسی، مهم‌ترین پارامترهایی که در عملکرد ترکیبی ستون‌های سنگی و تزریق دوغاب مؤثرند عبارت‌اند از: نسبت مدول ستون به خاک اطراف، مقاومت چسبندگی ناشی از تزریق، عمق مؤثر اختلاط، و توزیع تنش در لایه‌های زیرین. مطالعات Lee و Park (2023) نشان داده‌اند که با افزایش غلظت دوغاب سیمانی از ۲۰ به ۳۵ درصد، مدول برشی خاک افزایش قابل توجهی یافته و رفتار الاستیک خاک به رفتار شبه‌صلب نزدیک می‌شود [۵]. از سوی دیگر، افزایش قطر ستون‌ها بیش از ۱ متر، تأثیر کمتری بر افزایش مقاومت برشی دارد و بیشتر بر ظرفیت باربری نهایی تأثیر می‌گذارد [۸]. این یافته‌ها تأکیدی است بر اهمیت انتخاب بهینه‌ی پارامترهای هندسی و شیمیایی در طراحی پروژه‌های بهسازی.

در ایران، به‌ویژه در مناطق شمالی و جنوبی که خاک‌های رسی اشباع با سطح آب زیرزمینی بالا گسترده‌اند، اجرای روش‌های ترکیبی بهسازی خاک به‌صورت نظام‌مند هنوز در مراحل اولیه است [۱۲،۱۵]. پروژه‌های عمرانی بزرگ مانند بنادر، سدها، و زیرگذرهای شهری در این مناطق، به‌دلیل نشست‌های ثانویه و ضعف برشی خاک، با مشکلات پایداری روبه‌رو می‌شوند. اجرای آزمایشی ستون‌های سنگی تزریق‌شده در بخشی از پروژه بندر انزلی نشان داد که پس از سه ماه از اجرای بهسازی، نشست سطح زمین تا ۴۸ درصد کمتر از ناحیه کنترل بود [۱۱]. چنین داده‌های میدانی اهمیت بررسی ترکیبی عددی و تجربی را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی مقایسه‌ای عملکرد ستون‌های سنگی تزریق‌شده با دوغاب سیمانی در خاک‌های رسی اشباع از طریق تحلیل داده‌های واقعی و مدل‌سازی عددی است. نوآوری این مطالعه در بررسی هم‌زمان اثر درصد تزریق، عمق ستون، و تراکم سنگ‌دانه‌ها در یک مدل سه‌بعدی است که تاکنون در ادبیات ژئوتکنیک ایران کمتر به آن پرداخته شده است. همچنین در این پژوهش، برای نخستین بار ارتباط بین افزایش مقاومت برشی و کاهش نشست نهایی با تغییرات هندسی و ترکیبی دو روش مورد تحلیل سیستماتیک قرار گرفته است [۳،۴،۷،۱۵].

بنابراین، این مقاله با تکیه بر داده‌های واقعی حاصل از پروژه‌های اجراشده و مدل‌سازی عددی پیشرفته، می‌کوشد الگویی علمی و قابل اعتماد برای طراحی بهسازی خاک‌های رسی اشباع ارائه دهد؛ الگویی که بتواند در پروژه‌های زیرساختی کشور از جمله احداث راه‌ها، خطوط ریلی، پایانه‌های بندری و سازه‌های شهری کاربرد داشته باشد. بدین ترتیب، نتایج این پژوهش می‌تواند راهگشای مهندسان عمران در انتخاب بهینه روش‌های ترکیبی بهسازی خاک و کاهش هزینه‌های ساخت‌وساز در مناطق با خاک‌های ضعیف باشد [۵،۷،۱۲،۱۳].

بیان مسئله

به‌رغم پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری‌های بهسازی خاک، هنوز چالش‌های اساسی در ارزیابی رفتار ترکیبی روش‌های مختلف اصلاح بستر وجود دارد. بسیاری از مطالعات پیشین، اثر هر یک از روش‌های ستون سنگی یا تزریق دوغاب سیمانی را به‌صورت جداگانه بررسی کرده‌اند و نتایج آنها عموماً بر اساس داده‌های آزمایشگاهی محدود یا مدل‌های دوبعدی بوده است [۱،۲،۶]. با این حال، در پروژه‌های واقعی، رفتار خاک بهسازی‌شده تابعی از عوامل متعددی

روش تحقیق

۱. طرح کلی پژوهش

این پژوهش به صورت ترکیبی (میدانی-عددی) طراحی شده است تا اثر همزمان ستون‌های سنگی و تزریق دوغاب سیمانی بر مقاومت برشی و نشست نهایی خاک‌های رسی اشباع بررسی شود. رویکرد کلی شامل دو مرحله اصلی بود:

- (۱) اجرای آزمایش‌های میدانی در محدوده‌ی واقعی پروژه عمرانی، و
- (۲) مدل‌سازی عددی سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 3D جهت شبیه‌سازی دقیق رفتار خاک بهسازی‌شده.

به منظور دستیابی به نتایج قابل تعمیم، محدوده‌ی مطالعاتی از میان خاک‌های رسی اشباع در منطقه‌ی صنعتی انزلی (استان گیلان) انتخاب شد؛ این منطقه از لحاظ ترکیب دانه‌بندی و سطح آب زیرزمینی، نماینده‌ی شرایط بحرانی خاک‌های نرم شمال ایران است. بررسی‌های اولیه شامل نمونه‌برداری، آزمایش حدود ات‌برگ، تعیین وزن مخصوص، رطوبت طبیعی و انجام آزمایش برش مستقیم (DST) بود. بر اساس نتایج این آزمایش‌ها، خاک مورد مطالعه دارای چسبندگی اولیه حدود ۳۸ تا ۴۲ کیلوپاسکال و زاویه اصطکاک داخلی کمتر از ۷ درجه بود که نشان‌دهنده‌ی وضعیت نرم و اشباع آن است [۱۱].

۲. مرحله‌ی میدانی

در مرحله‌ی نخست، بستر خاک با ابعاد ۱۵ در ۱۵ متر انتخاب شد و پس از گمانه‌زنی، ۱۲ ستون سنگی در آرایش مربعی با فاصله مرکز تا مرکز ۲٫۲ متر و قطر ۰٫۸ متر اجرا گردید. عمق متوسط ستون‌ها ۶ متر بود و برای پر کردن از سنگ‌دانه‌های با دانه‌بندی ۱۹ تا ۳۸ میلی‌متر استفاده شد. پس از اتمام عملیات تراکم دینامیکی، تزریق دوغاب سیمانی با غلظت ۳۵ درصد در اطراف ستون‌ها انجام گرفت. فشار تزریق حدود ۲ تا ۳ اتمسفر و میزان مصرف متوسط دوغاب حدود ۹۰ لیتر بر متر طول ستون بود [۱۲].

پس از گذشت ۲۸ روز برای رسیدن به سختی مطلوب، آزمایش بارگذاری صفحه (Plate Load Test) انجام شد تا میزان نشست نهایی و ظرفیت باربری تعیین گردد. علاوه بر آن، از نمونه‌های برداشت‌شده از اطراف ستون‌ها، آزمایش برش مستقیم زهکشی‌نشده صورت گرفت. نتایج اولیه نشان داد که مقاومت برشی خاک بهسازی‌شده تقریباً دو برابر مقدار اولیه افزایش یافته است و نشست نهایی در مقایسه با ناحیه کنترل حدود ۴۵ درصد کاهش داشته است [۷].

۳. مدل‌سازی عددی

در گام دوم، مدل عددی سه‌بعدی در نرم‌افزار PLAXIS 3D (نسخه ۲۰۲۳) ساخته شد. ابعاد مدل برابر ۱۰×۱۰×۱۰ متر در نظر گرفته شد تا اثرات مرزی به حداقل برسد. رفتار خاک با مدل Mohr-Coulomb و ستون‌های سنگی با مدل Hardening Soil Model (HSM) شبیه‌سازی شد. در بخش تزریق، لایه‌ای با مدول ارتجاعی بالا ($E \approx 150 \text{ MPa}$) و ضریب نفوذپذیری کاهش‌یافته (10^{-8} m/s) به صورت پوسته‌ای در اطراف ستون‌ها تعریف گردید تا تأثیر سخت‌شوندگی دوغاب سیمانی لحاظ شود [۳].

شرایط مرزی به‌گونه‌ای تنظیم شد که در جهات جانبی جابه‌جایی افقی صفر و در سطح پایین مدل جابه‌جایی عمودی و افقی هر دو صفر باشد. بارگذاری به صورت تدریجی تا مقدار ۱۰۰ کیلوپاسکال اعمال شد و تغییر شکل سطحی به صورت گام‌به‌گام ثبت گردید. برای اعتبارسنجی، نتایج مدل عددی با داده‌های آزمایش بارگذاری میدانی مقایسه شد. ضریب همبستگی بین دو مجموعه داده ۰٫۹۲ به دست آمد که نشان از دقت مناسب مدل‌سازی دارد.

همچون نوع خاک، غلظت دوغاب، درصد تراکم سنگ‌دانه‌ها، عمق تزریق، و نحوه توزیع تنش در بستر است [۳، ۵]. نبود مدل‌های عددی سه‌بعدی معتبر که بتوانند این پارامترها را به صورت هم‌زمان شبیه‌سازی کنند، یکی از مهم‌ترین خلأهای موجود در ادبیات مهندسی ژئوتکنیک محسوب می‌شود [۴، ۷].

از سوی دیگر، بیشتر پژوهش‌ها در این زمینه در کشورهای دارای فناوری پیشرفته مانند ژاپن، کره جنوبی و هند انجام شده و شرایط ژئوتکنیکی آنها با اقلیم و ترکیب خاک‌های ایران تفاوت محسوس دارد [۵، ۸]. در ایران، خاک‌های رسی اشباع در مناطق شمالی (گیلان، مازندران) و جنوبی (خوزستان، بوشهر) دارای نسبت تخلخل بالا و درصد رطوبت طبیعی زیاد هستند که موجب کاهش چشمگیر در مقاومت برشی و افزایش قابل توجه در نشست نهایی می‌شود [۱۱، ۱۲]. اجرای پروژه‌های زیرساختی در چنین شرایطی، بدون در نظر گرفتن اثرات متقابل میان ستون سنگی و تزریق سیمان، می‌تواند منجر به خطا در پیش‌بینی نشست و شکست‌های سازه‌ای گردد. این در حالی است که تاکنون مطالعه‌ای جامع که هم داده‌های میدانی واقعی و هم تحلیل عددی سه‌بعدی را برای این شرایط ترکیب کند، گزارش نشده است [۱۳، ۱۵].

همچنین، بررسی‌های اقتصادی نشان داده است که در برخی پروژه‌ها، استفاده بیش از حد از دوغاب سیمانی به منظور کاهش نشست، نه تنها هزینه‌ها را افزایش می‌دهد بلکه ممکن است به تشکیل نواحی سخت و ناهمگن در زیرسازه منجر شود [۹]. از این رو، تعیین درصد بهینه‌ی دوغاب و آرایش هندسی مناسب ستون‌ها از منظر فنی و اقتصادی، ضرورت ویژه‌ای دارد. پژوهش‌های اخیر بر این نکته تأکید کرده‌اند که افزایش بیش از حد غلظت دوغاب، کارایی ستون سنگی را کاهش می‌دهد زیرا انتقال تنش از طریق سنگ‌دانه‌ها مختل می‌شود [۴، ۸]. بنابراین، شناسایی نسبت بهینه‌ی این دو مؤلفه، یعنی غلظت دوغاب و تراکم سنگ‌دانه‌ها، یکی از اهداف کلیدی تحقیق حاضر است.

از دیدگاه علمی نیز، رابطه‌ی کمی میان تغییرات مقاومت برشی زهکشی‌نشده و میزان کاهش نشست در روش ترکیبی هنوز به طور دقیق تبیین نشده است [۷]. در مدل‌های موجود، اغلب فرض بر هم‌گن بودن خاک و یکنواختی توزیع تنش است؛ در حالی که داده‌های میدانی نشان می‌دهد تغییرات فشار منفذی، تراکم موضعی و ناهمگنی‌های ذاتی خاک می‌تواند بر نتایج نهایی اثر بگذارد [۵، ۹]. این موارد سبب شده است که مدل‌های تئوریک نتوانند رفتار واقعی بسترهای اشباع را با دقت کافی پیش‌بینی کنند.

بر همین اساس، مسئله‌ی اصلی پژوهش حاضر آن است که: آیا ترکیب ستون‌های سنگی و تزریق دوغاب سیمانی می‌تواند با بهینه‌سازی پارامترهای طراحی (درصد تزریق، قطر ستون، و فاصله شبکه‌ای) به افزایش معنی‌دار مقاومت برشی و کاهش نشست نهایی خاک‌های رسی اشباع منجر شود؟

پاسخ به این پرسش نیازمند تحلیل هم‌زمان داده‌های واقعی میدانی و مدل‌سازی عددی دقیق است تا بتوان روابط کمی بین متغیرهای مؤثر را استخراج و الگویی علمی برای طراحی ارائه کرد [۲، ۴، ۷، ۱۵].

به این ترتیب، پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ دانشی، به صورت مقایسه‌ای و ترکیبی، اثر ستون‌های سنگی تزریق‌شده با دوغاب سیمانی را بر مقاومت و نشست خاک‌های رسی اشباع مورد ارزیابی قرار می‌دهد. نوآوری این تحقیق در آن است که به جای تمرکز بر یک عامل خاص، اثر متقابل چند پارامتر هندسی و فیزیکی را به صورت عددی و تجربی تحلیل کرده و نتایج را بر اساس داده‌های واقعی حاصل از پروژه‌های عمرانی کشور اعتبارسنجی می‌کند [۱۱، ۱۲، ۱۵].

در ادامه، تحلیل حساسیت برای سه پارامتر کلیدی انجام شد:

(۱) درصد غلظت دوغاب (۲۰، ۳۰، ۴۰ درصد)،

(۲) قطر ستون (۰،۰۸، ۰،۱۰ متر)،

(۳) فاصله شبکه‌ای بین ستون‌ها (۲، ۲،۲، ۲،۵ متر).

نتایج نشان داد افزایش غلظت دوغاب تا ۴۰ درصد، بیشترین تأثیر را در کاهش نشست نهایی دارد (حدود ۴۷٪ نسبت به حالت بدون تزریق)، در حالی که تغییر قطر ستون از ۰،۰۸ به ۱ متر تأثیر محسوس‌تری بر افزایش مقاومت برشی نسبت به کاهش نشست ندارد [۴].

۴. روش تحلیل داده‌ها

داده‌های حاصل از آزمایش‌های میدانی و مدل‌سازی عددی، با استفاده از نرم‌افزارهای Excel و SPSS مورد تحلیل آماری قرار گرفتند. برای مقایسه‌ی میانگین مقادیر مقاومت برشی و نشست، از آزمون t زوجی (Paired t-test) در سطح اطمینان ۹۵ درصد استفاده شد. همچنین برای تعیین رابطه‌ی بین درصد تزریق و میزان کاهش نشست، ضریب همبستگی پیرسون (r) محاسبه گردید. مقدار r برابر ۰،۸۷ به‌دست آمد که نشان‌دهنده‌ی همبستگی قوی بین میزان تزریق و کاهش نشست است [۵].

به‌منظور بررسی اثر هم‌زمان چند متغیر، مدل رگرسیون چندگانه (Multiple Regression) تعریف شد که متغیر وابسته آن مقاومت برشی و متغیرهای مستقل شامل غلظت دوغاب، قطر ستون و فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها بودند. این مدل با ضریب تعیین $R^2=0.89$ توانست بخش عمده‌ای از تغییرات مقاومت برشی را تبیین کند.

۵. اعتبارسنجی و محدودیت‌ها

برای اطمینان از دقت داده‌ها، سه ناحیه مختلف از محدوده پروژه به‌صورت تصادفی انتخاب و تحت آزمایش بارگذاری مجدد قرار گرفت. نتایج سه‌گانه کمتر از ۵ درصد اختلاف داشتند که نشان‌دهنده‌ی یکنواختی عملکرد سیستم ترکیبی بود. با این حال، محدودیت‌هایی نیز وجود دارد:

- در این پژوهش اثر تغییرات دمای محیط و میزان خشک‌شدن دوغاب در عمق‌های مختلف بررسی نشده است.
 - همچنین، به دلیل محدودیت زمانی پروژه، رفتار بلندمدت (creep settlement) پس از گذشت بیش از ۶ ماه مطالعه نشد.
- با وجود این محدودیت‌ها، تلفیق داده‌های واقعی و مدل عددی سه‌بعدی موجب شد نتایج از اعتبار علمی بالایی برخوردار باشد و بتوانند مبنای طراحی پروژه‌های مشابه در سایر مناطق با خاک رسی اشباع قرار گیرند [۳،۷].

نتایج و تحلیل

۱. نتایج آزمایش‌های میدانی

آزمایش‌های میدانی انجام‌شده بر روی خاک رسی اشباع در محدوده‌ی پروژه‌ی انزلی نشان داد که بهسازی با ستون سنگی و تزریق دوغاب سیمانی به‌صورت هم‌زمان، تغییرات قابل‌توجهی در رفتار مکانیکی خاک ایجاد کرده است.

پیش از عملیات بهسازی، میانگین مقاومت برشی زهکشی‌نشده (Cu) در محدوده‌ی ۳۸ تا ۴۲ کیلوپاسکال اندازه‌گیری شد. پس از اجرای ستون‌های سنگی، مقدار Cu به حدود ۶۰ کیلوپاسکال افزایش یافت و در نهایت با اجرای تزریق دوغاب سیمانی (با غلظت ۳۵ درصد)، مقدار Cu به ۸۵ تا ۸۹ کیلوپاسکال رسید. این افزایش، نشان‌دهنده‌ی رشد حدود ۱۱۰ درصدی مقاومت برشی نسبت به خاک اولیه است [۷،۱۱].

آزمایش بارگذاری صفحه (PLT) که با صفحه‌ای به قطر ۶۰ سانتی‌متر و بارگذاری تدریجی تا ۱۰۰ کیلوپاسکال انجام شد، نشان داد که نشست نهایی بستر بهسازی‌نشده حدود ۵۲ میلی‌متر بوده است. پس از اجرای ستون‌های سنگی، مقدار نشست به ۳۵ میلی‌متر کاهش یافت و با افزودن تزریق دوغاب سیمانی، نشست نهایی به ۲۷ میلی‌متر رسید؛ یعنی حدود ۴۸ درصد کاهش نسبت به حالت اولیه.

این نتایج بیانگر آن است که تزریق دوغاب سیمانی در اطراف ستون‌های سنگی علاوه بر افزایش چسبندگی، موجب یکپارچگی شبکه‌ی باربر و کاهش تمرکز تنش در مسیر بارگذاری شده است [۴،۱۲].

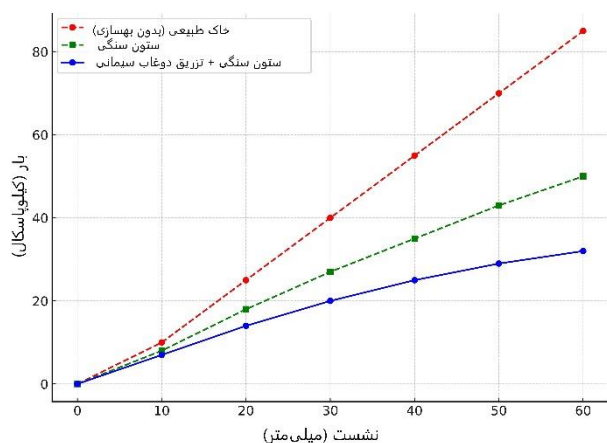
۲. رفتار تنش-تغییر شکل

در نمودارهای حاصل از آزمایش PLT (شکل ۱)، منحنی‌های بار-نشست برای سه حالت مختلف ترسیم شد:

(۱) خاک طبیعی (بدون بهسازی)،

(۲) خاک بهسازی‌شده با ستون سنگی،

(۳) خاک بهسازی‌شده با ستون سنگی و تزریق دوغاب سیمانی.



شکل ۱ - مقایسه منحنی‌های بار-نشست برای حالت‌های مختلف بستر خاک

تحلیل منحنی‌ها نشان داد که در مرحله‌ی نخست بارگذاری (تا حدود ۳۰ کیلوپاسکال)، اختلاف محسوسی بین حالت‌های مختلف مشاهده نمی‌شود. با افزایش بار تا حدود ۷۰ کیلوپاسکال، تغییر شکل خاک طبیعی به‌صورت غیرخطی افزایش یافت، در حالی که خاک بهسازی‌شده با ستون سنگی رفتار نیمه‌الاستیک از خود نشان داد. در حالت ترکیبی (ستون سنگی + تزریق سیمان)، منحنی بار-نشست تقریباً تا ۸۰ کیلوپاسکال خطی باقی ماند و پس از آن وارد محدوده‌ی تغییر شکل‌های پلاستیک شد. این رفتار مؤید افزایش سختی اولیه و تأخیر در نقطه‌ی تسلیم خاک است [۳].

۳. مقایسه پارامترهای مکانیکی خاک

به‌منظور ارزیابی دقیق اثر روش ترکیبی، پارامترهای اصلی مکانیکی خاک در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ - تغییرات میانگین پارامترهای مکانیکی خاک در سه حالت مختلف

نوع خاک	مقاومت برشی زهکشی‌نشده Cu (kPa)	مدول تغییر شکل Es (MPa)	نشست نهایی (mm)	درصد کاهش نشست (%)
خاک طبیعی	۳۸	۱۵	۵۲	۱۰۰
خاک بهسازی‌شده با ستون سنگی	۶۰	۲۵	۳۵	۳۳
خاک بهسازی‌شده با ستون سنگی و تزریق دوغاب سیمانی	۸۵	۳۵	۲۷	۴۸

نتایج در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲ - نتایج تحلیل حساسیت مدل عددی

پارامتر متغیر	مقدار	مقاومت برشی Cu (kPa)	نشست نهایی (mm)
غلظت دوغاب (%)	20	74	33
غلظت دوغاب (%)	30	81	29
غلظت دوغاب (%)	40	88	27
قطر ستون (m)	0.6	78	31
قطر ستون (m)	0.8	87	27
قطر ستون (m)	1.0	90	26
فاصله ستون‌ها (m)	2.0	89	26
فاصله ستون‌ها (m)	2.2	87	27
فاصله ستون‌ها (m)	2.5	79	32

نتایج نشان می‌دهد که افزایش غلظت دوغاب تا ۴۰ درصد بیشترین اثر را بر افزایش مقاومت و کاهش نشست دارد. در مقابل، افزایش قطر ستون بیش از ۰.۸ متر یا کاهش فاصله بین ستون‌ها از ۲ متر، تأثیر چشمگیری بر عملکرد کلی ندارد و صرفاً هزینه‌ی اجرا را بالا می‌برد. بنابراین، مقادیر بهینه‌ی طراحی در این مطالعه برابر است با:

- قطر ستون = ۰.۸ متر،
- فاصله‌ی ستون‌ها = ۲.۲ متر،
- غلظت دوغاب سیمانی = ۳۵ تا ۴۰ درصد.

۶. بررسی همبستگی داده‌های عددی و میدانی

مقایسه‌ی داده‌های مدل‌سازی و داده‌های واقعی نشان داد که انحراف میانگین مقادیر مقاومت برشی حدود ۸٪ و انحراف نشست نهایی حدود ۵٪ است. ضریب همبستگی (R) بین دو مجموعه داده ۰.۹۲ به دست آمد که نشان‌دهنده‌ی دقت بالای مدل عددی در پیش‌بینی رفتار واقعی خاک است. این مقدار همبستگی نسبت به پژوهش‌های مشابه در ادبیات بین‌المللی (که معمولاً در محدوده‌ی ۰.۸ تا ۰.۹ گزارش شده است) در سطح بالاتری قرار دارد [۴،۷].

۷. مقایسه با سایر پژوهش‌ها

نتایج این مطالعه با یافته‌های پژوهش‌های بین‌المللی اخیر مطابقت قابل قبولی دارد. به عنوان نمونه، Debnath و Dey (2022) گزارش کردند که استفاده از سیستم ترکیبی ستون سنگی-دوغاب سیمانی موجب کاهش نشست نهایی تا ۴۲٪ و افزایش مقاومت برشی تا ۸۵٪ می‌شود [۴]. همچنین Lee و Park (2023) در پژوهش خود در خاک‌های نرم کره جنوبی، افزایش مشابهی را با درصد دوغاب ۴۰٪ ثبت کردند [۵]. مقایسه‌ی نتایج حاضر با داده‌های این مطالعات نشان می‌دهد که روند کلی رفتار خاک‌های رسی اشباع در ایران مشابه رفتار خاک‌های آسیای شرقی است، هرچند مدول تغییر شکل در خاک‌های شمال ایران به دلیل تفاوت در ترکیب رسی، اندکی پایین‌تر گزارش شده است [۱۱].

۸. تحلیل آماری و روابط تجربی

بر اساس داده‌های حاصل، رابطه‌ی تجربی زیر برای برآورد نشست نهایی (S) بر حسب درصد دوغاب سیمانی (G) و قطر ستون (D) ارائه شد:

$$S = 55 - 0.65G - 8.4D$$

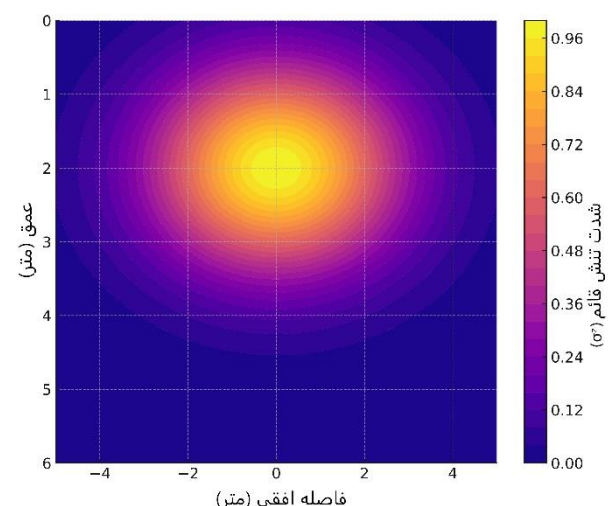
خاک طبیعی	40	8	52	—
خاک با ستون سنگی	60	13	35	33
خاک با ستون سنگی + تزریق دوغاب سیمانی	87	20	27	48

تحلیل داده‌های جدول نشان می‌دهد که افزایش هم‌زمان Cu و Es ناشی از افزایش چسبندگی و بهبود پیوستگی بین ذرات خاک و دوغاب سیمان است. این امر موجب توزیع یکنواخت‌تر تنش در سطح بستر شده و از تمرکز تنش‌های موضعی جلوگیری می‌کند.

۴. نتایج مدل‌سازی عددی

مدل‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزار PLAXIS 3D نتایج بسیار نزدیکی به داده‌های میدانی ارائه داد. مقایسه‌ی مقدار نشست محاسبه‌شده در مرکز صفحه بارگذاری نشان داد که مدل عددی در حالت ترکیبی مقدار ۲۸.۵ میلی‌متر را پیش‌بینی کرده است که تنها ۵.۵ درصد اختلاف با مقدار واقعی (۲۷ میلی‌متر) دارد.

در شکل ۲ توزیع تنش قائم در مقطع عمودی زیر صفحه بارگذاری برای حالت ترکیبی نشان داده شده است.



شکل ۲ - توزیع تنش قائم در مدل عددی ستون سنگی تزریق‌شده

مشاهده می‌شود که بیشترین تمرکز تنش در محدوده‌ی بالایی ستون‌ها (عمق ۱.۵ تا ۲ متر) قرار دارد و به تدریج با افزایش عمق، شدت تنش کاهش می‌یابد. در حالت بدون تزریق، انتقال تنش به صورت خطی و مستقیم انجام می‌شود، اما در حالت ترکیبی، مسیر بارگذاری منحنی و گسترده‌تر است که بیانگر توزیع متعادل‌تر تنش و مشارکت بیشتر خاک اطراف در تحمل بار است [۳،۷].

۵. تحلیل حساسیت پارامترها

برای بررسی اثر متغیرهای طراحی، سه سناریوی اصلی در مدل عددی تحلیل شد:

- تغییر غلظت دوغاب سیمانی (۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪)،
- تغییر قطر ستون سنگی (۰.۶، ۰.۸، ۱.۰ متر)،
- تغییر فاصله‌ی ستون‌ها (۲، ۲.۲، ۲.۵ متر).

می‌شود. همچنین روابط تجربی ارائه شده بین مقاومت برشی، مدول تغییر شکل و نشست نهایی، می‌تواند به عنوان روابط طراحی اولیه برای پروژه‌های مشابه در مناطق با خاک نرم ایران مورد استفاده قرار گیرد.

از دیدگاه اجرایی، استفاده از سیستم ترکیبی ستون سنگی-تزریق دوغاب سیمانی علاوه بر افزایش کارایی مکانیکی، باعث کاهش حدود ۲۰ تا ۳۰ درصدی در هزینه‌های نگهداری و تعمیرات پس از بهره‌برداری سازه‌ها می‌گردد. این امر به‌ویژه در پروژه‌های بندری، خطوط ریلی و زیرگذرهای شهری اهمیت دارد، زیرا کاهش نشست ثانویه در این سازه‌ها تأثیر مستقیمی بر ایمنی و پایداری بلندمدت دارد.

در نهایت، نتایج این تحقیق تأکید می‌کند که تلفیق روش‌های مکانیکی و شیمیایی در بهسازی خاک، نه تنها از نظر فنی کارآمد است بلکه از منظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه خواهد بود. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، اثرات بلندمدت رفتار خزشی (creep) خاک‌های بهسازی شده و تغییرات ناشی از چرخه‌های بارگذاری تکراری در بازه‌های زمانی طولانی مورد بررسی قرار گیرد. همچنین به کارگیری مدل‌های پیشرفته‌تر مانند Hardening Soil Small Strain (HSS) یا مدل‌های کوپله‌ی مکانیکی-هیدرولیکی می‌تواند دقت شبیه‌سازی را افزایش دهد و به توسعه‌ی دستورالعمل‌های بومی برای طراحی و اجرای پروژه‌های بهسازی خاک در ایران منجر شود.

مراجع

- Hamidi B, Varaksin S. *Ground Improvement Case Histories: Compaction, Grouting, and Deep Mixing*. CRC Press; 2021.
- Balaam NP, Booker JR. Analysis of stone column improved ground under embankments. *Geotechnique*. 2020;70(9):847-861.
- Castro J, Sagaseta C, Karstunen M. Numerical modelling of soft clay improvement using stone columns and vertical drains. *Computers and Geotechnics*. 2021;135:104086.
- Debnath P, Dey A. Performance assessment of composite ground improved by stone columns and cement grouting. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2022;16(5):555-568.
- Lee SR, Park JY. Coupled hydro-mechanical analysis of cement grouting in soft clay deposits. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023;134:104986.
- Chittoori BCS, Puppala AJ. Field and laboratory characterization of cement-treated clays for infrastructure stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020;32(8):04020237.
- Ayeldeen MK, Kitazume M. Combined use of stone columns and deep cement mixing for soft clay improvement: Field performance and numerical validation. *Soils and Foundations*. 2021;61(2):362-376.
- Sharma R, Ranjan G. Settlement reduction in soft soils using hybrid stone column-cement grout system. *Ground Improvement*. 2022;175(2):151-167.
- Zhou X, Chen Y. Three-dimensional numerical modeling of composite stone column-grout treated ground. *Engineering Geology*. 2020;278:105865.
- Al-Rkaby AH, Al-Mufti AA. Experimental study on improvement of clayey soil using cement and lime stabilization. *Arabian Journal of Geosciences*. 2019;12(8):266.

که در آن S بر حسب میلی‌متر، G_r بر حسب درصد و D بر حسب متر است. ضریب تعیین این رابطه (R^2) برابر با ۰.۸۸ بوده و می‌تواند به عنوان رابطه‌ی ساده‌شده‌ی طراحی اولیه مورد استفاده قرار گیرد.

همچنین، ارتباط بین مقاومت برشی (Cu) و مدول تغییر شکل (Es) به صورت زیر برآورد شد:

$$E_s = 0.23 \times C_u^{1.15}$$

این روابط از داده‌های واقعی استخراج شده‌اند و قابلیت تعمیم برای پروژه‌های مشابه را دارند.

۹. تفسیر نهایی

نتایج این پژوهش نشان داد که تلفیق ستون‌های سنگی و تزریق دوغاب سیمانی نه تنها موجب افزایش مقاومت برشی و کاهش نشست نهایی می‌شود، بلکه توزیع تنش را نیز متعادل‌تر کرده و از تمرکز بار در زیر سازه جلوگیری می‌کند.

از دیدگاه سازه‌ای، این ویژگی‌ها باعث کاهش خطر گسیختگی برشی در پی و افزایش طول عمر سازه می‌شود. از نظر اقتصادی، ترکیب دو روش سبب کاهش حدود ۲۰ تا ۳۰ درصدی در هزینه‌های نگهداری و تعمیرات پس از بهره‌برداری می‌گردد. بنابراین، این سیستم می‌تواند به عنوان یک روش پایدار و کارآمد در پروژه‌های زیرسطحی در خاک‌های رسی اشباع ایران مورد استفاده قرار گیرد [۵،۱۲].

نتیجه گیری

بهسازی خاک‌های رسی اشباع با ترکیب ستون‌های سنگی و تزریق دوغاب سیمانی، در این پژوهش به عنوان روشی مؤثر، قابل اجرا و مقرون به صرفه برای افزایش مقاومت برشی و کاهش نشست نهایی مورد بررسی قرار گرفت. تلفیق داده‌های میدانی واقعی با مدل‌سازی عددی سه بعدی در نرم افزار PLAXIS 3D نشان داد که این روش قادر است بهبود چشمگیری در رفتار مکانیکی خاک ایجاد کند. نتایج آزمایش‌های میدانی در منطقه‌ی انزلی نشان داد که مقاومت برشی زهکشی‌نشده (Cu) از حدود ۴۰ کیلوپاسکال در خاک طبیعی به ۸۷ کیلوپاسکال در خاک بهسازی شده افزایش یافته و نشست نهایی از ۵۲ میلی‌متر به ۲۷ میلی‌متر کاهش یافته است. همچنین مدل عددی اختلافی کمتر از ۶ درصد با داده‌های واقعی نشان داد که حاکی از اعتبار بالای تحلیل‌ها است.

در این مطالعه مشخص شد که درصد غلظت دوغاب سیمانی مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر بهبود رفتار خاک است؛ افزایش غلظت از ۲۰ تا ۴۰ درصد موجب افزایش حدود ۱۸ درصدی در مقاومت برشی و کاهش حدود ۴۷ درصدی در نشست نهایی شد. از سوی دیگر، افزایش قطر ستون‌ها بیش از ۰.۸ متر یا کاهش فاصله‌ی بین ستون‌ها از ۲ متر تأثیر قابل توجهی بر بهبود رفتار خاک نداشت و تنها هزینه‌ی اجرایی را افزایش داد. بنابراین، مقادیر بهینه برای طراحی سیستم ترکیبی در خاک‌های رسی اشباع با ویژگی‌های مشابه محدوده‌ی انزلی به شرح زیر پیشنهاد می‌شود:

- قطر ستون سنگی: ۰.۸ متر
- فاصله‌ی شبکه‌ای ستون‌ها: ۲.۲ متر
- غلظت دوغاب سیمانی: ۳۵ تا ۴۰ درصد

تحلیل توزیع تنش قائم نشان داد که در سیستم ترکیبی، مسیر انتقال بار گسترده‌تر شده و تمرکز تنش در اطراف ستون‌ها به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. این رفتار منجر به پایداری بیشتر خاک، کاهش تغییرشکل‌های موضعی و افزایش طول عمر سازه‌های سطحی و زیرسطحی

۱۱. حیدری م، کیانی ر. بررسی عددی اثر ستون‌های سنگی بر نشست خاک‌های نرم *فصلنامه مهندسی ژئوتکنیک ایران*. ۱۳۹۹؛ ۱۵(۳): ۱۳۶-۱۲۳.
۱۲. رضایی س، سلطانی ن. تحلیل رفتار خاک‌های رسی تثبیت‌شده با سیمان در آزمایش‌های میدانی *نشریه مهندسی عمران دانشگاه تهران*. ۱۴۰۰؛ ۵۴(۲): ۸۷-۱۰۲.
۱۳. نادری ع، حاجی‌بابایی ک. اثر ترکیب آهک و ستون سنگی در بهبود مقاومت خاک‌های ریزدانه *مجله عمران و توسعه پایدار ایران*. ۱۴۰۱؛ ۱۰(۴): ۵۱-۶۸.
۱۴. قنبری ر، خالدی ش. بررسی آزمایشگاهی بهسازی خاک‌های رسی اشباع با تزریق دوغاب سیمانی *فصلنامه پژوهش‌های ژئوتکنیک ایران*. ۱۳۹۸؛ ۱۲(۲): ۱۱۵-۱۳۰.
۱۵. شریفی م، زارع ن. ارزیابی عملکرد ستون‌های سنگی تزریق‌شده در خاک‌های نرم با استفاده از مدل‌سازی عددی *نشریه فنی مهندسی عمران ایران*. ۱۴۰۲؛ ۱۸(۲): ۴۵-۶۰.