

تحلیل عددی رفتار نشست و ظرفیت باربری ستون‌های سنگی محصور شده با ژئوتکستایل در خاک نرم

* (۱) حسن شرفی، (۲) پوریا حیدریان

(۱) دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران h_sharafi@razi.ac.ir

(۲) دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران pouryaheydarian7@gmail.com

چکیده:

خاک‌های نرم به دلیل مقاومت برشی پایین و نشست‌پذیری زیاد همواره یکی از چالش‌های اصلی در اجرای پروژه‌های عمرانی به شمار می‌روند. بهسازی این خاک‌ها از طریق ستون‌های سنگی یکی از روش‌های متداول است که کارایی آن در بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک به اثبات رسیده است. با این حال، ستون‌های سنگی معمولی در برابر گسترش جانبی و برآمدگی مقاومت کافی ندارند و این موضوع باعث محدودیت در ظرفیت باربری آن‌ها می‌شود. محصورسازی ستون‌ها با ژئوتکستایل رویکردی نوین برای رفع این مشکل است که در سال‌های اخیر توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر محصورسازی ستون‌های سنگی بر رفتار نشست و ظرفیت باربری، مدل‌سازی‌های عددی دوبعدی و سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS انجام شد. در مدل دوبعدی رفتار ستون منفرد در شرایط محصور و غیرمحصور تحلیل شد و در مدل سه‌بعدی عملکرد گروهی ستون‌ها زیر یک پلیت بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت. در هر دو حالت، پارامترهای هندسی ستون‌ها شامل قطرهای ۰/۸، ۱ و ۱/۲ متر و ارتفاع‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ متر در نظر گرفته شد. همچنین برای محصورسازی ستون‌های سنگی از ژئوتکستایل در سه حالت عمودی، افقی و ترکیبی عمودی-افقی با اندازه‌های متفاوت استفاده شد. نتایج مدل‌سازی بر اساس شاخص‌هایی همچون نشست کلی، سختی اولیه، ظرفیت باربری و نسبت کاهش نشست ارزیابی گردید. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که محصورسازی ستون‌ها با ژئوتکستایل موجب کاهش قابل‌ملاحظه نشست و افزایش ظرفیت باربری خاک می‌گردد. در مدل‌های دوبعدی، نسبت کاهش نشست (SSR) در محدوده ۳۰ تا ۵۰ درصد و ضریب بهبود باربری (BIF) حدود ۳۵ تا ۶۰ درصد به دست آمد. سختی اولیه ستون‌های محصور (K-init) حدود دو برابر حالت غیرمحصور محاسبه شد. در مدل‌های سه‌بعدی، میزان کاهش نشست بین ۴۰ تا ۵۰ درصد و بهبود ظرفیت باربری در حدود ۵۵ درصد بود. همچنین مقایسه آرایش‌های گروهی نشان داد که آرایش مثلثی به دلیل پوشش بهتر خاک، عملکرد بهتری نسبت به آرایش مربعی دارد.

کلیدواژه‌ها: ستون‌های سنگی، ژئوتکستایل، خاک‌های نرم، بهسازی زمین، PLAXIS2D & 3D

۱- مقدمه

کلیدی در مهندسی ژئوتکنیک بوده است. ستون‌های سنگی به‌عنوان یکی از روش‌های متداول بهسازی خاک، با جایگزینی بخشی از خاک نرم با مصالح دانه‌ای، موجب افزایش سختی بستر، بهبود ظرفیت باربری و تسریع فرآیند تحکیم می‌شوند. با این حال، عملکرد ستون‌های سنگی معمولی در خاک‌های بسیار نرم به دلیل مقاومت جانبی ناکافی خاک اطراف با محدودیت مواجه است. در چنین شرایطی، ستون سنگی تحت بارگذاری دچار گسترش جانبی شده و پدیده برآمدگی، به‌ویژه

خاک‌های نرم رسی به دلیل مقاومت برشی پایین، تراکم‌پذیری زیاد و حساسیت بالا نسبت به تغییرات تنش، از نامناسب‌ترین بسترها برای اجرای سازه‌های عمرانی محسوب می‌شوند. مقادیر کم مقاومت زهکشی‌نشده و مدول تغییر شکل پایین در این خاک‌ها، موجب بروز نشست‌های قابل توجه و کاهش پایداری سازه‌ها تحت بارگذاری‌های معمول می‌شود. ازاین‌رو، بهسازی خاک‌های نرم همواره یکی از موضوعات

در نواحی بالایی ستون، رخ می‌دهد که این امر منجر به کاهش ظرفیت باربری و افزایش نشست کلی سیستم می‌شود. به‌منظور رفع این محدودیت، محصورسازی ستون‌های سنگی با استفاده از مصالح ژئوسنتتیکی، به‌ویژه ژئوتکستایل، به‌عنوان راهکاری کارآمد مطرح شده است. ژئوتکستایل با تأمین مقاومت کششی جانبی، موجب محدود شدن تغییر شکل ستون، افزایش سختی جانبی و بهبود انتقال تنش بین ستون و خاک اطراف می‌شود. نتایج مطالعات اخیر نشان داده است که استفاده از ژئوتکستایل می‌تواند رفتار بار-نشست ستون‌های سنگی را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد. موراگسان و راجاکوپال (۲۰۱۰) یک سری آزمایشات برای مقایسه ظرفیت ظرفیت برشی ستون سنگی معمولی با ستون‌های محصورشده با پوشش ژئوتکستایل انجام دادند. نتایج حاکی از افزایش ظرفیت باربری برشی ستون‌های سنگی با قرار دادن پوشش ژئوتکستایل انجام گرفته است [1]. بزازیان بناب و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از مدلسازی آزمایشگاهی تأثیر پارامترهای هندسی و نوع ژئوتکستایل را بر رفتار ستون بررسی کردند. نتایج نشان داد ظرفیت باربری ستون‌های سنگی محصورکننده عمودی-افقی ترکیبی در مقایسه با سایر انواع به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد [2]. آنکیت تاکور و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی نشان دادند که ستون‌های سنگی مسلح شده افقی در مقایسه با ستون‌های سنگی محصور شده، بهبود بهتری در زمین ایجاد می‌کنند. استفاده از ژئوتکستایل به کاهش شکست ناشی از برآمدگی جانبی کمک می‌کند [3]. مهول کاتاکیا و همکاران (۲۰۲۳) در تحقیقی با عنوان مطالعه آزمایشگاهی ظرفیت باربری در ستون‌های سنگی منفرد و گروهی با و بدون پوشش نشان دادند که استفاده از تقویت‌کننده‌های ژئوتکستایل، ظرفیت باربری آنها را افزایش می‌دهد [4]. علیرضا نگهدار و نادر فتح‌العلومی (۲۰۲۲) در پژوهشی تحت عنوان بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر استفاده از ستون سنگی مسلح به صورت منفرد، گروهی و هسته دار در بهسازی خاک ماسه بادی نشان دادند که افزایش تعداد و تراکم ستونها میتواند ظرفیت باربری را

افزایش دهد [5]. با وجود مطالعات انجام‌شده، بررسی ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که همچنان خلأهایی در این زمینه وجود دارد. بخش قابل توجهی از پژوهش‌های پیشین به بررسی ستون‌های سنگی منفرد محدود شده و اثر اندرکنش ستون‌ها در آرایش‌های گروهی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، در بسیاری از مطالعات، تحلیل‌ها صرفاً بر پایه مدلسازی دوبعدی انجام شده و تفاوت نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی به‌صورت کمی بررسی نشده است. همچنین در برخی پژوهش‌ها، اعتبارسنجی مدل‌های عددی محدود یا کیفی بوده و مقایسه کمی نتایج با مطالعات معتبر کمتر ارائه شده است. در این پژوهش، به‌منظور پوشش بخشی از خلأهای موجود، رفتار نشست و ظرفیت باربری ستون‌های سنگی محصورشده با ژئوتکستایل در خاک نرم با استفاده از مدلسازی عددی بررسی شده است. در این راستا، ستون‌های سنگی منفرد با استفاده از تحلیل دوبعدی و ستون‌های سنگی گروهی با استفاده از تحلیل سه‌بعدی در نرم‌افزار PLAXIS مدل‌سازی شده‌اند. اثر پارامترهای هندسی ستون، آرایش ستون‌ها و محصورسازی ژئوتکستایل بصورت عمودی، افقی و ترکیبی عمودی-افقی با اندازه‌های متفاوت به‌صورت منسجم بررسی شده و نتایج حاصل از تحلیل‌ها با دو مطالعه معتبر اخیر اعتبارسنجی شده است. با وجود مطالعات متعدد درباره ستون‌های سنگی محصور شده با ژئوسنتتیک، اغلب پژوهش‌های پیشین هر یک تنها بر بخشی از پارامترهای مؤثر نظیر نوع محصورسازی، هندسه ستون، آرایش گروهی یا تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی تمرکز داشته‌اند. در بسیاری از این مطالعات، مقایسه مستقیم نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی تحت شرایط یکسان مدل‌سازی انجام نشده و اثر همزمان پارامترهای هندسی، نوع محصورسازی ژئوتکستایل و آرایش ستون‌ها بر پاسخ مکانیکی سیستم به‌صورت یکپارچه ارزیابی نشده است. در پژوهش حاضر، یک چارچوب عددی منسجم بر پایه نرم‌افزار PLAXIS توسعه داده شده است که امکان بررسی همزمان اثر قطر و ارتفاع ستون، نوع محصورسازی ژئوتکستایل (عمودی، افقی و ترکیبی) و آرایش

گروهی ستون‌ها را در محیط‌های دوبعدی و سه‌بعدی فراهم می‌کند. همچنین اختلاف عملکرد مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی از نظر نشست، ظرفیت باربری و سختی اولیه به‌صورت کمی مورد ارزیابی قرار گرفته و بر اساس نتایج حاصل، دیدگاهی کاربردی برای انتخاب مناسب‌ترین آرایش و نوع محصورسازی در طراحی بهسازی خاک‌های نرم ارائه شده است.

بر این اساس، اهداف اصلی این پژوهش به شرح زیر تعریف می‌شود:

۱. بررسی عددی رفتار نشست و ظرفیت باربری ستون‌های سنگی منفرد محصور و غیرمحصور در خاک نرم
۲. مقایسه رفتار ستون‌های سنگی منفرد و گروهی با استفاده از تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی
۳. ارزیابی اثر پارامترهای هندسی و آرایش ستون‌ها بر عملکرد سیستم
۴. اعتبارسنجی نتایج عددی با استفاده از مطالعات معتبر پیشین

برخلاف مطالعاتی که هر یک تنها بر یک یا چند پارامتر تمرکز داشته‌اند، در این پژوهش تلاش شده است اثر متقابل پارامترهای هندسی، نوع محصورسازی و آرایش ستون‌ها تحت شرایط یکسان مدل‌سازی بررسی شود تا امکان مقایسه مستقیم عملکرد گزینه‌های مختلف برای طراحی مهندسی فراهم گردد.

۲- روش تحقیق و مدل‌سازی عددی

۲-۱. مشخصات هندسی و شرایط مرزی

هندسه مدل در فاز مدل‌سازی دوبعدی برای ستون منفرد بصورت یک دامنه خاک به ابعاد 12×12 متر و در فاز مدل‌سازی سه بعدی نیز برای ستون‌های سنگی گروهی بصورت یک دامنه خاک به ابعاد 60×60 متر و یک پلیت به ابعاد 12×12 متر که ستون‌ها زیر آن قرار می‌گیرند در نظر گرفته شد. ابعاد هندسه موردنظر برای طراحی نیز به این‌صورت که حداقل ۵ برابر بزرگترین بعد افقی در عرض و حداقل ۵ برابر بزرگترین بعد عضو قائم در جهت طول اجرا شد. ارتفاع

خاک نیز در هر دو مدل‌سازی ۵ برابر ارتفاع ستون‌ها در هر حالت تعریف شد. همچنین در هر دو حالت مدل‌سازی از ستون‌های سنگی با چهار قطر متفاوت که شامل 0.06 ، 0.08 ، 0.1 و 0.12 متر بود استفاده شد. ارتفاع ستون‌ها نیز به ترتیب ۳، ۴، ۵ و ۶ متر در نظر گرفته شد. در این تحقیق از مدل رفتاری خاک موهر-کولمب در هر دو فاز مدل‌سازی استفاده شد. ابعاد دامنه مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار المان محدود، به‌گونه‌ای انتخاب شده است که اثرات تنش و کرنش ناشی از ستون‌ها به حاشیه دامنه نرسد. برای ستون سنگی منفرد، ابعاد 12×12 متر و برای گروه ستون‌ها، 60×60 متر در نظر گرفته شد. برای اطمینان از عدم تأثیر شرایط مرزی، تحلیل حساسیت ابعاد دامنه با تغییر ابعاد در محدوده‌های مختلف انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش ابعاد فراتر از ۱۲ متر (در هر سمت ستون منفرد) تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر توزیع نشست و تنش‌های عمقی ندارد، لذا این ابعاد به‌عنوان بهینه انتخاب گردید.

برای جلوگیری از تأثیرگذاری نامطلوب مرزهای مدل بر نتایج، شرایط مرزی به‌صورت زیر تعریف شد:

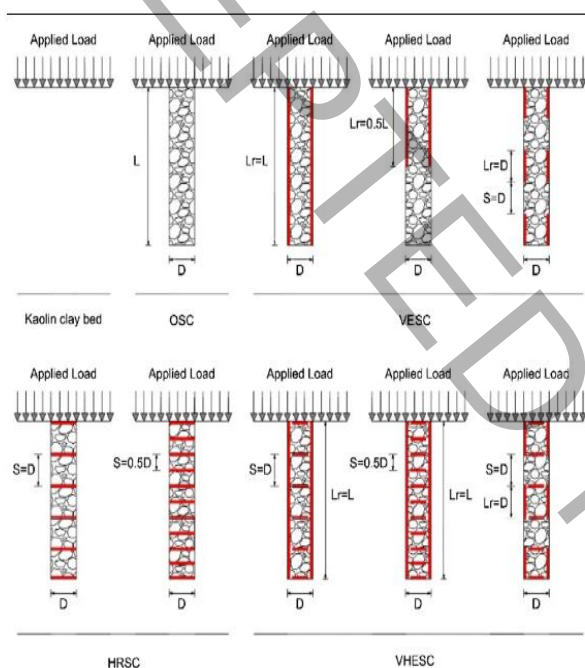
سطح بالایی خاک، آزاد برای تغییر شکل و محل اعمال بارگذاری لحاظ شد و لبه‌های جانبی محدودیت جابجایی افقی ($U_x = 0$) در نظر گرفته شد تا از حرکت جانبی غیرواقعی جلوگیری شود کف مدل نیز به‌عنوان لایه سخت افقی ($U_x = 0$) در نظر گرفته شد تا از حرکت جانبی غیرواقعی جلوگیری شود کف مدل نیز به‌عنوان لایه سخت در نظر گرفته شد و تغییر شکل قائم و افقی در آن صفر تعریف شد ($U_x = U_y = 0$). بارگذاری به‌صورت بار گسترده یکنواخت بر سطح مدل اعمال شد. در مرزهای جانبی دامنه، جابجایی افقی محدود شده (roller boundary) و در کف مدل، جابجایی در هر دو جهت قائم و افقی صفر فرض شده است. (fixed boundary) این شرایط، نشان‌دهنده وجود لایه خاک بسیار متراکم یا سنگ بستر در عمق پایین‌تر است و از بازتاب امواج تنشی جلوگیری می‌کند.

برای بررسی اثر جهت‌گیری و پیکربندی ژئوتکستایل، سه حالت زیر در نظر گرفته شد:

حالت افقی: ژئوتکستایل‌ها به‌صورت لایه‌ای افقی با اندازه‌های متفاوت در ستون قرار گرفتند.

حالت عمودی: ژئوتکستایل به‌صورت غلاف کامل، نیمه کامل و با فواصل به اندازه قطر ستون اطراف ستون را محصور کردند.

حالت ترکیبی: ترکیب حالت افقی و عمودی، یعنی وجود لایه‌های افقی به همراه غلاف جانبی.



شکل ۱) شماتیک ستونهای سنگی با حالت های متفاوت ژئوتکستایل
Fig1) Schematic of stone columns with different geotextile configurations

۲-۴. مدل تماس (Interface): برای شبیه‌سازی دقیق رفتار فصل مشترک بین ستون سنگی و خاک اطراف، از المان تماس (Interface) با پارامترهای کاهش مقاومت (مانند نسبت کاهش چسبندگی و زاویه اصطکاک) استفاده شد. این امر امکان مدل‌سازی لغزش و جداشدگی احتمالی بین ستون و خاک را فراهم می‌کند.

Soil - Geotextile interface ($\phi = 38.73^\circ$; $c = 15 \text{ kN/m}^2$)

Soil - Soil interface ($\phi = 30^\circ$; $c = 1.6 \text{ kN/m}^2$)

برای خاک‌های بسیار نرم (مقاومت برشی زهکشی نشده ≥ 15 کیلوپاسکال)، از تکنیک استفاده از پوشش ژئوتکستایل در اطراف ستون سنگی برای ایجاد تکیه‌گاه جانبی استفاده می‌شود و در نتیجه از گسترش جانبی ستون جلوگیری می‌شود. خواص خاک رس نرم مورد استفاده در جدول ۱ فهرست شده است. همچنین از سنگدانه‌های خرد شده با اندازه‌هایی در محدوده ۲-۱۰ میلی‌متر به عنوان ماده پرکننده استفاده شد. تمام خواص فیزیکی و مکانیکی سنگدانه‌های خرد شده نیز در جدول ۲ ذکر شده است. با توجه به ماهیت خطی و استوانه‌ای ستون‌ها و همچنین شرایط بارگذاری، تحلیل در محیط Plane Strain انجام پذیرفت. این فرض، ساده‌سازی قابل قبولی در تحلیل‌های ژئوتکنیکی برای مسائل تکرارشونده در راستای عمود بر صفحه دوبعدی فراهم می‌کند.

جدول ۱) مشخصات خاک و ستون سنگی

Table1) Soil and stone column specifications

پارامتر	خاک	سنگدانه
طبقه بندی خاک	CL	GW
چسبندگی	۱۵ KN/m^2	۱ KN/m^2
زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)	1°	43°
وزن مخصوص	۲/۶	-
رطوبت بهینه (%)	۱۹	-
وزن مخصوص اشباع (γ_{sat})	۱۹/۱ KN/m^3	۲۳/۲۵ KN/m^3
وزن مخصوص غیر اشباع (γ_{unst})	-	۲۲/۷۸ KN/m^3
مدول یانگ	۱۰۰۰۰ KN/m^2	۵۵۰۰۰ KN/m^2
نسبت پواسون	۰/۳	۰/۳۵

جدول ۲) مشخصات ژئوتکستایل پلی پروپیلن بافته شده

Table2) Specifications of woven polypropylene geotextile

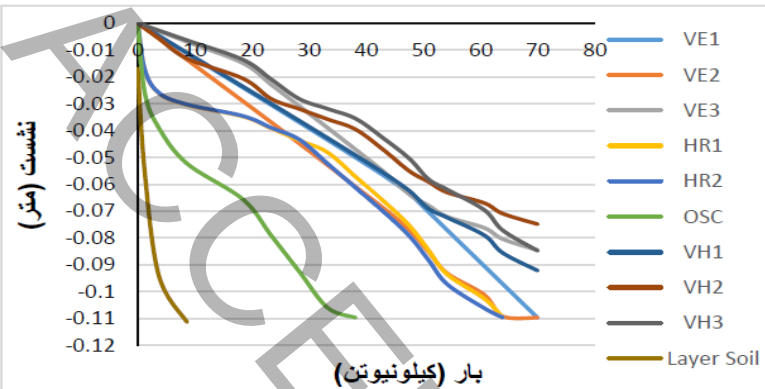
پارامتر	حجم
سختی	۱۵۰ KN/m
مقاومت کششی تسلیم (N_p)	۴۵ KN/m
جرم در واحد سطح	۲۰۰ g/m^2
سختی محوری (EA)	۷۵۰۰۰ KN/m
مدول الاستیسیته (E)	۱۵۰۰۰۰ KN/m^2

۲-۴. مدل‌سازی ژئوتکستایل

۳- نتایج و تحلیل عددی

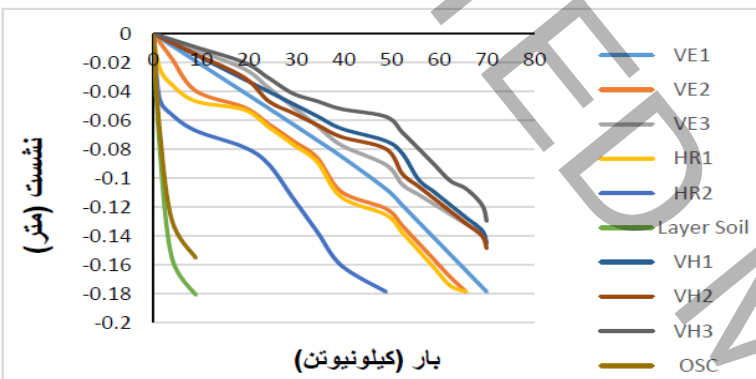
۳-۱. رفتار نشست ستون سنگی منفرد (تحلیل دوبعدی)

نتایج تحلیل دوبعدی ستون‌های سنگی منفرد نشان می‌دهد که محصورسازی ستون با ژئوتکستایل تأثیر چشمگیری بر کاهش نشست نهایی خاک نرم دارد. برای نمونه، نتایج حاصل از نمودار بار-نشست ستون منفرد با قطر ۰/۶ متر نشان داد که حتی کوچک‌ترین قطر ستون نیز می‌تواند بهبود قابل توجهی در رفتار خاک نرم ایجاد کند. در بار مرجع ۴۰ کیلونیوتن، نشست از حدود ۶۰ میلی‌متر به ۳۳ میلی‌متر کاهش یافت و شاخص SSR حدود ۴۰ درصد به دست آمد. سختی اولیه خاک تقریباً دو برابر شد و ظرفیت باربری در نشست ۵۰ میلی‌متر حدود ۳۵ تا ۴۵ درصد افزایش یافت. همچنین در ستون سنگی با قطر ۰/۸ متر و ارتفاع ۵ متر، نشست نهایی ستون غیرمحصور برابر با حدود ۹۵-۹۰ میلی‌متر محاسبه شد، در حالی که این مقدار در حالت محصورشده به حدود ۴۵-۵۰ میلی‌متر کاهش یافت که بیانگر کاهش تقریباً ۴۵ تا ۵۰ درصدی نشست است. این کاهش قابل توجه نشان‌دهنده نقش مؤثر ژئوتکستایل در مهار گسترش جانبی ستون و افزایش سختی سیستم است. بررسی اثر قطر ستون نشان می‌دهد که با افزایش قطر از ۰/۶ به ۱ متر، نشست نهایی در هر دو حالت محصور و غیرمحصور کاهش می‌یابد؛ با این حال، میزان کاهش نشست در ستون‌های محصورشده محسوس‌تر است. به‌طور خاص، افزایش قطر ستون موجب افزایش سطح تماس ستون با خاک اطراف و در نتیجه بهبود اندرکنش خاک-ستون می‌شود. در حضور ژئوتکستایل، این اثر تقویت شده و ستون قادر است بخش بیشتری از بار اعمالی را بدون تغییر شکل جانبی قابل توجه تحمل کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع ستون، به‌ویژه در ستون‌های شناور، منجر به کاهش نشست نهایی می‌شود؛ اما این تأثیر در ستون‌های محصورشده پایدارتر و یکنواخت‌تر است. در ستون‌های غیرمحصور، افزایش ارتفاع همواره منجر به بهبود عملکرد نمی‌شود، زیرا گسترش جانبی ستون در نواحی بالایی همچنان کنترل نشده باقی می‌ماند.



شکل ۲) نمودار بار-نشست ستون سنگی منفرد با قطر ۰/۶ متر و ارتفاع ۳

Fig2) Load-settlement diagram of a single stone column with a diameter of 0.6m and a height of 3m



شکل ۳) نمودار بار-نشست ستون سنگی منفرد با قطر ۱ متر و ارتفاع ۵ متر

Fig3) Load-settlement diagram of a single stone column with a diameter of 1m and a height of 5m

نتایج عددی نشان می‌دهد که عملکرد سیستم بهسازی‌شده نه‌تنها به هندسه ستون‌ها، بلکه به نحوه آرایش آن‌ها و نحوه محصورسازی نیز وابسته است. افزایش ظرفیت و کاهش نشست در این مطالعه را می‌توان ناشی از افزایش سختی معادل سیستم، بهبود مسیر انتقال بار، و محدود شدن گسترش جانبی خاک نرم دانست. بنابراین، تفسیر نتایج باید فراتر از توصیف ساده نمودارها بوده و بر پایه مکانیزم‌های حاکم انجام شود.

۳-۱-۱. اثر پارامترهای هندسی بر پاسخ بار-نشست

بر اساس نتایج، تغییرات هندسی موجب بهبود قابل توجه پاسخ مکانیکی سیستم شده است. برای نمونه، در برخی حالت‌ها ۳۷٪ افزایش و در برخی دیگر ۴۵٪ افزایش مشاهده شده است. این اختلاف نشان می‌دهد که حساسیت پاسخ سیستم به هندسه، یکنواخت نیست و به ترکیب پارامترهای طراحی وابسته است. به بیان دیگر، هنگامی که ابعاد یا نسبت‌های هندسی به محدوده‌ای نزدیک می‌شوند که در آن ناحیه تغییر شکل بحرانی درون ستون یا اطراف آن کنترل می‌شود، نرخ بهبود عملکرد افزایش می‌یابد؛ اما پس از آن، افزایش بیشتر پارامتر هندسی لزوماً به بهبود متناسب منجر نمی‌شود. از دیدگاه مهندسی ژئوتکنیک، این رفتار را می‌توان به افزایش نسبت جایگزینی، کاهش تمرکز تنش در خاک نرم، و بهبود قفل و بست بین ستون و خاک اطراف نسبت داد. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که طراحی بهینه نباید صرفاً بر افزایش ابعاد متمرکز باشد، بلکه باید بر یافتن محدوده‌ای متعادل از ابعاد هندسی استوار شود که در آن بیشترین بهره‌وری سازه‌ای حاصل گردد. از منظر توزیع تنش، افزایش قطر سبب افزایش نسبت تمرکز تنش σ_c / σ_s شده که این موضوع در کانتورهای تنش عمودی مشاهده می‌شود. این روند با یافته‌های (Thakur et al. (2020, 2021 که کاهش نشست در بازه ۳۰-۶۰٪ را گزارش کرده‌اند، سازگار است. دامنه تغییرات به‌دست‌آمده در این پژوهش نیز در همین بازه قرار دارد که نشان‌دهنده همخوانی مدل عددی با مطالعات پیشین است. اختلاف جزئی در مقادیر مطلق نشست نسبت به برخی مطالعات می‌تواند ناشی از تفاوت در نسبت H/D ، فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها و شرایط مرزی مدل‌سازی باشد.

۳-۱-۲. اثر محدوده هندسی

وجود بازه ۳۵-۴۰ در نتایج حاکی از آن است که یک محدوده بهینه یا بحرانی برای پارامتر هندسی مورد مطالعه وجود دارد. اگر این بازه مربوط به قطر، نسبت H/D یا فاصله‌گذاری باشد، معنای مهندسی آن این است که سیستم در این محدوده وارد ناحیه‌ای می‌شود که در آن افزایش سختی مؤثر و کاهش تغییر شکل جانبی به‌طور محسوس‌تری رخ می‌دهد در چنین

حالتی، افزایش بیشتر پارامتر موردنظر ممکن است به دلیل اشباع شدن مکانیزم‌های مقاومتی، اثر کمتری بر عملکرد کلی داشته باشد. این موضوع از منظر طراحی بسیار مهم است، زیرا نشان می‌دهد که بهبود عملکرد لزوماً با افزایش نامحدود ابعاد یا تغییرات هندسی حاصل نمی‌شود، بلکه باید ناحیه بهینه شناسایی شود. افزایش نسبت H/D تا مقدار مشخصی موجب بهبود عملکرد سیستم شد، اما پس از عبور از یک مقدار آستانه، نرخ بهبود کاهش یافت. این رفتار نشان می‌دهد که مکانیزم حاکم، کنترل ناحیه تغییر شکل جانبی (bulging) (zone) در بخش فوقانی ستون است. مطابق مشاهدات عددی، بیشترین تغییر شکل جانبی در یک‌سوم فوقانی ستون رخ می‌دهد؛ بنابراین افزایش طول ستون پس از پوشش ناحیه بحرانی، تأثیر کمتری در بهبود عملکرد خواهد داشت. این نتیجه با گزارش (Bazzazian Bonab et al. (2020 مبنی بر تمرکز تغییر شکل در بخش فوقانی ستون سازگار است بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بهینه‌سازی H/D باید با توجه به عمق ناحیه گسیختگی برشی انجام شود و افزایش بی‌رویه طول ستون لزوماً منجر به بهبود متناسب در ظرفیت نخواهد شد.

۳-۱-۳. اثر نوع محصورسازی ژئوتکستایل

مقایسه حالت‌های غیرمحصور، محصورسازی عمودی، افقی و ترکیبی نشان داد که بیشترین بهبود عملکرد مربوط به حالت محصورسازی ترکیبی بوده است. از دیدگاه مکانیکی:

محصورسازی عمودی موجب افزایش مقاومت شعاعی و کنترل پدیده bulging می‌شود.

محصورسازی افقی باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش محیطی و افزایش سختی موضعی ستون می‌گردد.

حالت ترکیبی همزمان هر دو مکانیزم را فعال کرده و بیشترین افزایش سختی معادل سیستم را ایجاد می‌کند.

این نتایج از نظر کیفی با مطالعات آزمایشگاهی Bazzazian Bonab et al. (2020) همخوانی دارد. با این حال، میزان بهبود در این مطالعه کمی متفاوت است که می‌تواند ناشی از تفاوت

در مدول کششی ژئوتکستایل، شرایط مرزی عددی و نوع مدل رفتاری خاک باشد.

۳-۲. رفتار باربری و سختی اولیه ستون منفرد

منحنی‌های بار-نشست به دست آمده از تحلیل دوبعدی نشان می‌دهد که ستون‌های سنگی محصور شده دارای سختی اولیه بالاتری نسبت به ستون‌های غیرمحصور هستند. این افزایش سختی اولیه به طور مستقیم ناشی از محدود شدن تغییر شکل جانبی ستون توسط ژئوتکستایل است. در بارگذاری‌های اولیه، ستون محصور شده قادر است با نشست کمتر، بار بیشتری را تحمل کند که این موضوع از دیدگاه طراحی سازه‌ای اهمیت ویژه‌ای دارد. محاسبه نسبت کاهش نشست (SSR) نشان داد که میزان SSR برای قطرهای مختلف بین ۴۰ تا ۵۰ درصد تغییر کرده است که بیانگر تأثیر قابل توجه محصورسازی در بهبود عملکرد ستون است. مقایسه ظرفیت باربری نهایی ستون‌ها نیز نشان می‌دهد که ضریب بهبود باربری (BIF) در ستون‌های محصور شده به طور متوسط بین ۱/۴ تا ۱/۶ افزایش یافته است یعنی افزایش حدود ۴۰ تا ۶۰ درصدی ظرفیت باربری، در حالی که این مقدار برای ستون‌های غیرمحصور به مراتب کمتر است. این نتایج بیانگر آن است که محصورسازی ژئوتکستایل نه تنها نشست را کاهش می‌دهد، بلکه ظرفیت باربری مؤثر ستون‌های سنگی را نیز به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد.

تحلیل توزیع تنش قائم در طول ستون نشان می‌دهد که در ستون‌های غیرمحصور، تمرکز تنش در نواحی بالایی ستون رخ می‌دهد، در حالی که در ستون‌های محصور شده، تنش‌ها به صورت یکنواخت‌تری در طول ستون توزیع می‌شوند. این توزیع یکنواخت‌تر تنش موجب بهبود عملکرد کلی سیستم و کاهش احتمال گسیختگی موضعی می‌شود.

جدول ۳) جمع بندی نتایج مدلسازی دو بعدی

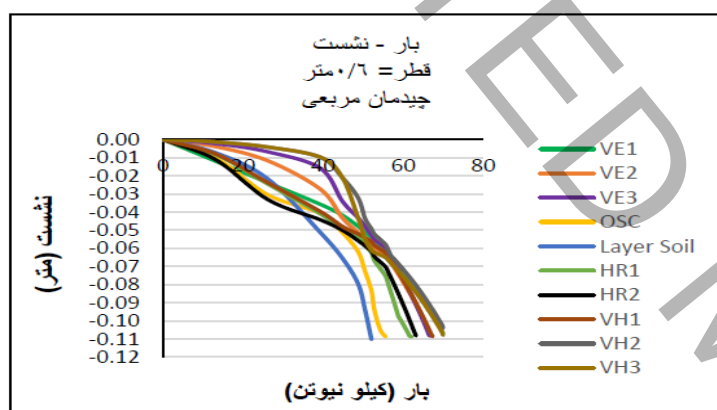
Table 3) Summary of two-dimensional modeling results

ردیف	قطر (متر)	ارتفاع (متر)	سختی اولیه	نسبت کاهش نشست	ضریب بهبود باربری
۱	۰/۶	۳	۲ برابر افزایش	۴۰ درصد	۳۵-۴۵ درصد افزایش
۲	۰/۸	۴	۲-۲/۱ برابر افزایش	۴۰ درصد	۴۰-۵۰ درصد افزایش
۳	۱	۵	۲ برابر افزایش	۴۵ درصد	۴۵-۵۵ درصد افزایش
۴	۱/۲	۶	۲/۵ برابر افزایش	۵۳ درصد	۵۵-۶۰ درصد افزایش

۳-۳. رفتار ستون‌های سنگی گروهی (تحلیل سه بعدی)

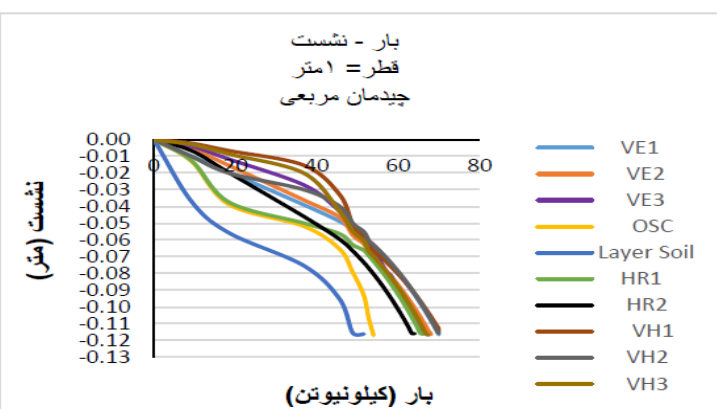
نتایج تحلیل سه بعدی ستون‌های سنگی گروهی نشان می‌دهد که اندرکنش بین ستون‌ها نقش تعیین کننده‌ای در رفتار کلی سیستم دارد؛ رفتاری که در تحلیل دوبعدی قابل بازنمایی دقیق نیست. در ستون‌های گروهی غیرمحصور، هم‌پوشانی نواحی تنش و تغییر شکل موجب افزایش نشست کلی سیستم می‌شود، در حالی که در ستون‌های محصور شده، این اثر به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج عددی، محصورسازی موجب کاهش نشست نهایی بین ۳۵ تا ۵۵ درصد شد. این کاهش در قطرهای بزرگ‌تر (۱ و ۱/۲ متر) محسوس‌تر بود، زیرا در این حالت ژئوتکستایل نیروی حلقوی بیشتری را تحمل کرده و مانع از گسترش جانبی ستون شد. نتایج تحلیل سه بعدی نسبت به مدل دوبعدی، مقادیر نشست کمتری را نشان دادند (به طور متوسط ۱۵ تا ۲۰ درصد کمتر) که نشان دهنده برتری مدل سه بعدی در نمایش واقع بینانه رفتار فضایی خاک و ستون است. افزایش قطر ستون، همانند مدل دوبعدی، موجب بهبود عملکرد سیستم شد. اما تفاوت مهم در مدل سه بعدی، افزایش محسوس سختی کل سیستم در قطرهای بزرگ است، زیرا افزایش قطر علاوه بر افزایش

برای دستیابی به نتایج واقع‌بینانه ضروری است. تحلیل سه‌بعدی قادر است اثرات اندرکنش ستون‌ها، تمرکز تنش و تغییر شکل‌های موضعی را با دقت بیشتری شبیه‌سازی کند. به‌منظور بررسی استقلال نتایج عددی از اندازه مش، تحلیل حساسیت مش انجام شد. در این راستا، مدل عددی با اندازه‌های مختلف المان مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج نشست نهایی و ظرفیت باربری با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد که با ریزتر شدن مش، تغییرات این پارامترها ناچیز بوده و اختلاف نتایج کمتر از ۵ درصد است؛ بنابراین، مش انتخاب‌شده برای تحلیل‌ها از دقت عددی کافی برخوردار است.



شکل ۴) نمودار بار-نشست ستون سنگی با قطر ۰/۶ متر و ارتفاع ۳ متر با چیدمان مربعی

Fig 4) Load-settlement diagram of a stone column with a diameter of 0.6 and a height of 3 with a square arrangement



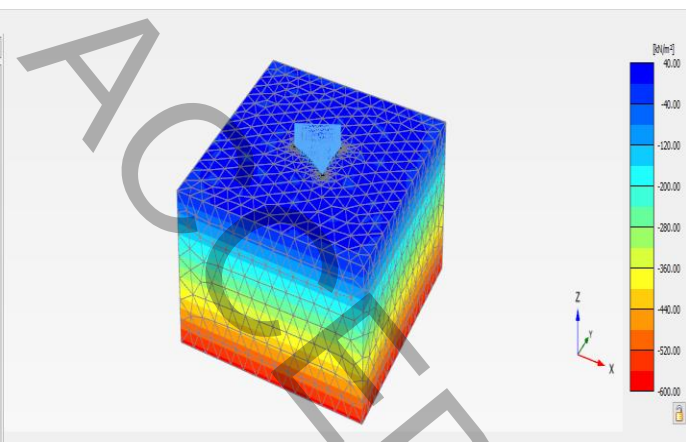
شکل ۵) نمودار بار-نشست ستون سنگی با قطر ۱ متر و ارتفاع ۵ متر با چیدمان مربعی

Fig5) Load-settlement diagram of a stone column with a diameter of 1 and a height of 5 with a square arrangement

سطح باربر، حجم سه‌بعدی ستون را نیز افزایش داده و انتقال تنش در راستای افقی را بهبود می‌بخشد. برای مثال، افزایش قطر از ۰/۶ به ۱/۲ متر منجر به کاهش نشست تا ۵۵ درصد و افزایش ظرفیت باربری تا ۶۰ درصد گردید. در مورد ارتفاع ستون، نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع تا نسبت $H/D=5$ موجب کاهش نشست و افزایش ظرفیت باربری می‌شود، اما پس از آن تأثیر چندانی بر عملکرد سیستم ندارد.

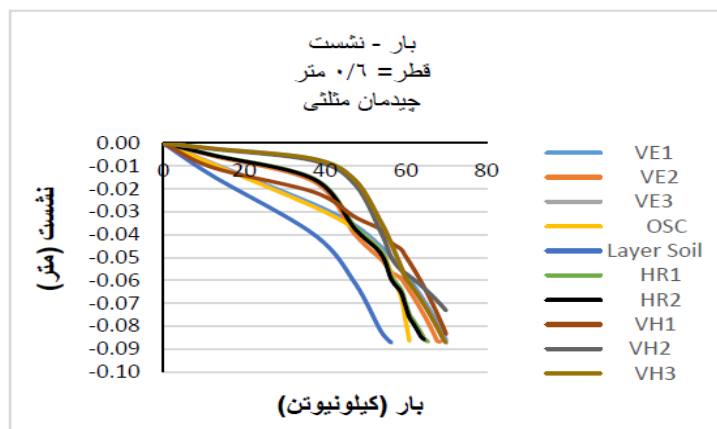
در مدل سه‌بعدی، تغییر شکل جانبی ستون به‌وضوح قابل مشاهده بود. در حالت غیرمحصور، بیشینه برآمدگی در فاصله حدود ۰/۳ تا ۰/۴ ارتفاع ستون از سطح زمین رخ داد. اما در حالت محصور با ژئوتکستایل، میزان برآمدگی حدود ۴۰٪ کاهش یافت و شکل تغییر شکل به حالت یک‌نواخت‌تری تغییر کرد. نتیجه‌ی این پدیده آن است که ژئوتکستایل با تأمین مقاومت کششی حلقوی، فشار جانبی خاک را متعادل کرده و مانع از گسیختگی موضعی ستون می‌شود. روند مشاهده‌شده در این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش نسبت H/D تا مقدار ۵، نشست کاهش یافته و ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. این رفتار با نتایج گزارش‌شده در ادبیات پژوهش هم‌خوانی دارد، زیرا افزایش H/D معمولاً موجب افزایش طول مؤثر ستون، بهبود انتقال بار به لایه‌های مقاوم‌تر و کاهش ناحیه تغییر شکل متمرکز در بخش بالایی خاک نرم می‌شود. در نتیجه، سیستم سختی بیشتری پیدا کرده و تمایل به گسترش جانبی و نشست موضعی کاهش می‌یابد. با این حال، همان‌طور که در برخی مطالعات پیشین نیز اشاره شده است، این بهبودها تا یک محدوده مشخص ادامه دارد و پس از آن نرخ افزایش عملکرد می‌تواند کاهش یابد، زیرا اثرات اشباع‌شدن مکانیزم انتقال بار و محدودیت‌های ناشی از شرایط مرزی و اندرکنش خاک-ستون ظاهر می‌شوند. بنابراین، نتیجه این پژوهش نه‌تنها با ادبیات موجود سازگار نیست، بلکه از نظر مکانیکی نیز قابل توجیه است.

مقایسه نتایج تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی نشان می‌دهد که اگرچه تحلیل دوبعدی برای بررسی رفتار ستون منفرد مناسب است، اما در ستون‌های گروهی، استفاده از تحلیل سه‌بعدی



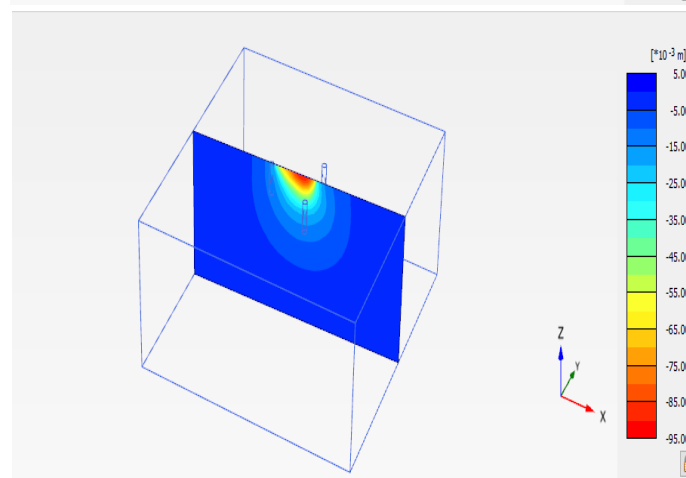
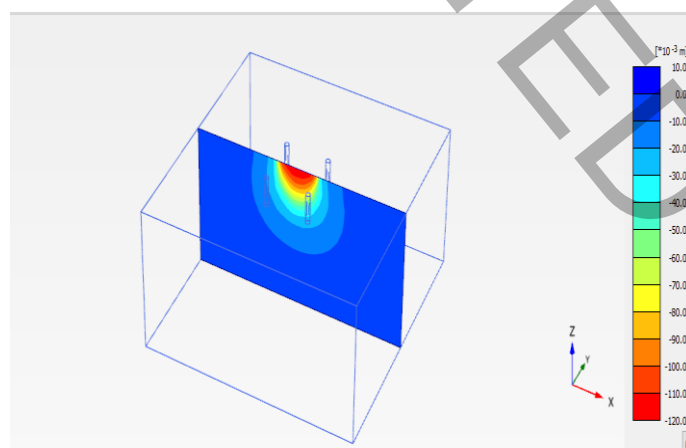
شکل ۸) تنش کل در آرایش مربعی و مثلثی

Fig 8) Total stress in square and triangular arrangement



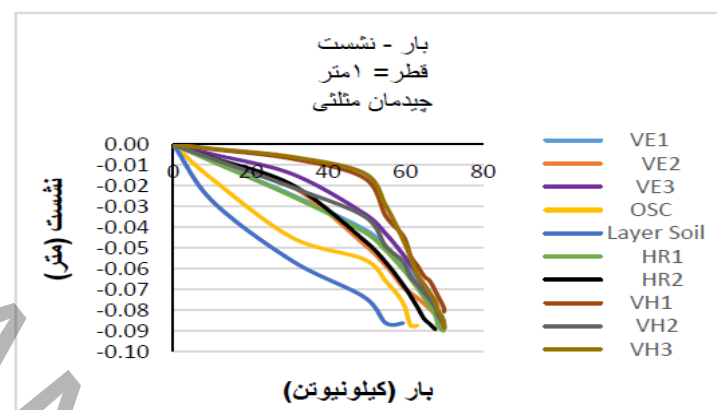
شکل ۶) نمودار بار-نشست ستون سنگی با قطر ۰/۶ متر و ارتفاع ۳ متر

با چیدمان مثلثی
Fig 6) Load-settlement diagram of a stone column with a diameter of 0.6 and a height of 3 with a Triangular arrangement



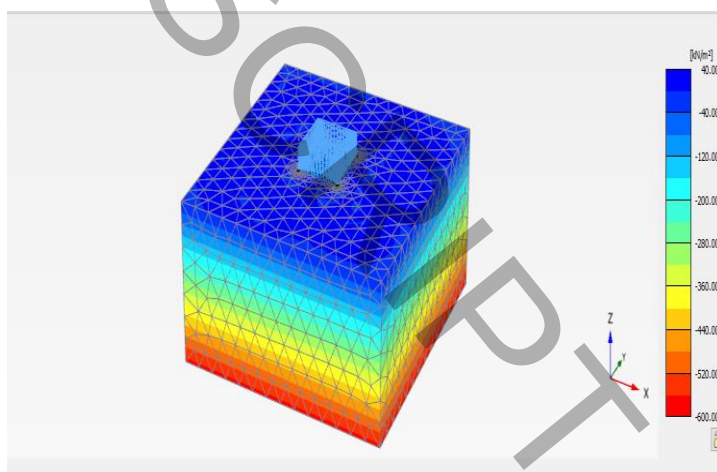
شکل ۹) تغییر شکل کل در آرایش مربعی و مثلثی

Fig 9) Total deformation in square and triangular arrangement



شکل ۷) نمودار بار-نشست ستون سنگی با قطر ۱ متر و ارتفاع ۵ متر
با چیدمان مثلثی

Fig 7) Load-settlement diagram of a stone column with a diameter of 1 and a height of 5 with a Triangular arrangement



۳-۴. کاربرد میدانی و محدودیت های روش بهسازی ستونهای سنگی.

نتایج این پژوهش نشان دهنده پتانسیل بالای روش بهسازی با ستونهای سنگی در افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پیها است. کاربرد میدانی این روش در پروژههای عمرانی، بهویژه در مناطق با خاکهای مسئله دار مانند خاکهای نرم، رسوبات آبرفتی، یا لندفیلها، می تواند منجر به کاهش هزینههای ساخت، افزایش ایمنی سازهها و تسریع در اجرای پروژهها شود.

چگونگی اجرای میدانی:

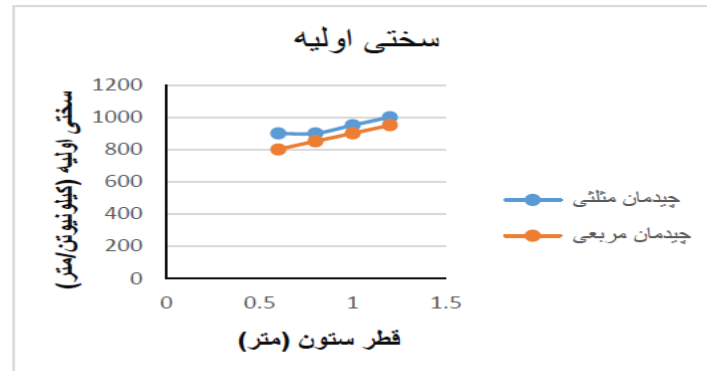
اجرای ستونهای سنگی معمولاً با استفاده از روشهای مختلفی مانند لرزشی (Vibro-stone column) یا حفاری و پر کردن (Danish method) صورت می گیرد. در روش لرزشی، یک میله لرزاننده به درون زمین نفوذ کرده و همزمان با لرزش و ارتعاش، شن و ماسه به درون حفره تزریق می شود تا ستون متراکم تشکیل گردد. در روش حفاری و پر کردن، ابتدا حفره ای ایجاد شده و سپس با شن و ماسه پر می شود. انتخاب روش اجرا به عواملی چون نوع خاک، عمق مورد نیاز، شرایط دسترسی کارگاه و تجهیزات موجود بستگی دارد.

محدودیتها و ملاحظات: با وجود مزایای فراوان، اجرای این روش با محدودیتهایی نیز همراه است:

نوع خاک: این روش برای خاکهای رسی اشباع شده با نفوذپذیری بسیار کم، ممکن است کارایی کمتری داشته باشد، زیرا تخلیه آب از خاک رسی کند است و زمان لازم برای تحکیم افزایش می یابد.

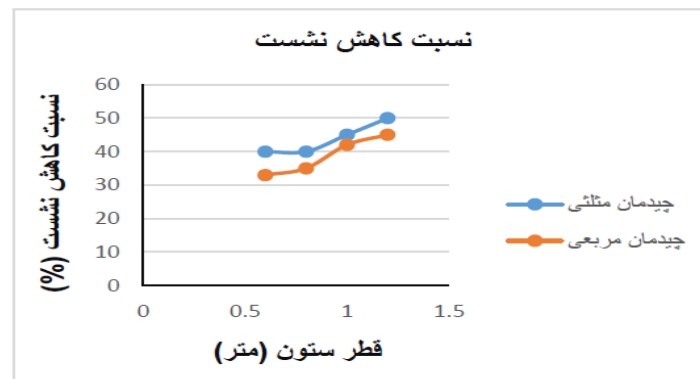
ارتفاع ستون: در اعماق زیاد، اجرای ستونهای سنگی با چالشهای فنی و افزایش هزینههای اجرایی مواجه می شود.

تداخل با سازههای مجاور: لرزشهای ناشی از اجرای ستونها (در روش لرزشی) می تواند بر سازههای مجاور یا تأسیسات زیرزمینی تأثیر بگذارد، لذا نیاز به مطالعات دقیق و رعایت تمهیدات لازم است.



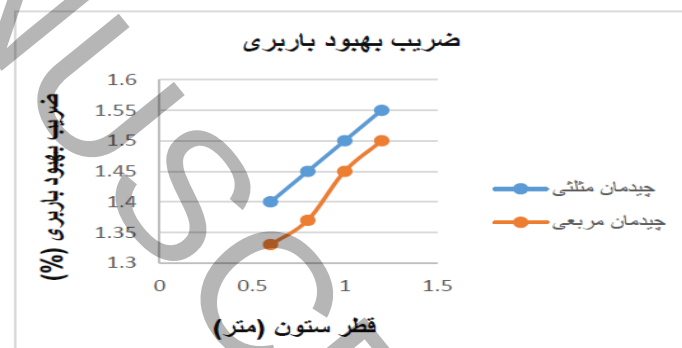
شکل ۱۰) نمودار سختی اولیه در دو چیدمان مثلثی و مربعی

Fig 10) Initial stiffness diagram in two square and triangular arrangements



شکل ۱۱) نمودار نسبت کاهش نشست در دو چیدمان مثلثی و مربعی

Fig 11) Settlement reduction diagram in two square and triangular arrangements



شکل ۱۲) نمودار ضریب بهبود باربری در دو چیدمان مثلثی و مربعی

Fig 12) Load-bearing improvement diagram in two square and triangular arrangements

۴- تحلیل و بررسی حساسیت به اندازه مش

برای ارزیابی وابستگی نتایج به شبکه المان‌های محاسباتی، بررسی حساسیت مش‌بندی در سه حالت «ستون منفرد»، «آرایش مربعی» و «آرایش مثلثی» با قطر ۰/۶ متر و ژئوتکستایل نوع VE1 انجام شد. سه سطح مش شامل Very Coarse، Medium و Very Fine برای هر حالت شبیه‌سازی گردید و منحنی‌های بار-نشست استخراج و با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهند که برای ستون منفرد اختلاف قابل توجهی بین مش‌های Medium و Very Fine وجود دارد (میانگین اختلاف درصد حدود ۲۹ درصد و بیشینه تا ۵۸ درصد در برخی نقاط بار). بنابراین برای تحلیل دقیق رفتار ستون منفرد به‌ویژه در بازه‌های بار بالا، لازم است از مش ریز (Very Fine) استفاده شود. در مقابل، برای حالت گروهی با آرایش مثلثی، میانگین اختلاف بین Medium و Very Fine تنها ۱/۷ درصد و بیشینه ۶/۴ درصد بود؛ این موضوع بیانگر همگرایی مناسب نتایج در مش‌های Medium و Very Fine برای حالت گروهی است و نشان می‌دهد که در مدل‌های گروهی می‌توان با صرفه‌جویی محاسباتی، از مش Medium بهره برد به شرطی که ریزسازی محلی در حول ستون‌ها اعمال شود. بنابراین توصیه می‌شود: برای محاسبات نهایی ستون منفرد از مش Very Fine استفاده شود؛ برای محاسبات سه‌بعدی گروهی از مش Medium استفاده گردد. در مواردی که محدودیت سخت‌افزاری وجود داشته باشد، باید تفاوت‌های درصدی بین مش‌های Medium و Very Fine گزارش شود تا دامنه عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها مشخص باشد.

کنترل کیفیت: تضمین تراکم و یکنواختی ستون‌ها در تمام طول و عرض آن‌ها، نیازمند نظارت دقیق و اجرای صحیح مراحل است.

پایداری شیمیایی: در محیط‌های خورنده، پایداری شیمیایی شن و ماسه مورد استفاده باید در نظر گرفته شود.

نتیجه‌گیری کاربردی: در مجموع، روش بهسازی با ستون‌های سنگی یک راهکار مهندسی مؤثر و اقتصادی برای بهبود خواص مکانیکی خاک‌های سست است. با درک صحیح محدودیت‌ها و انتخاب روش اجرای مناسب، می‌توان از این تکنیک در طیف وسیعی از پروژه‌های عمرانی بهره برد. ارزیابی‌های دقیق پارامترهای خاکی و شرایط میدانی، کلید موفقیت در اجرای این روش بهسازی خواهد بود.

جدول (۴) جمع بندی نتایج مدلسازی سه بعدی

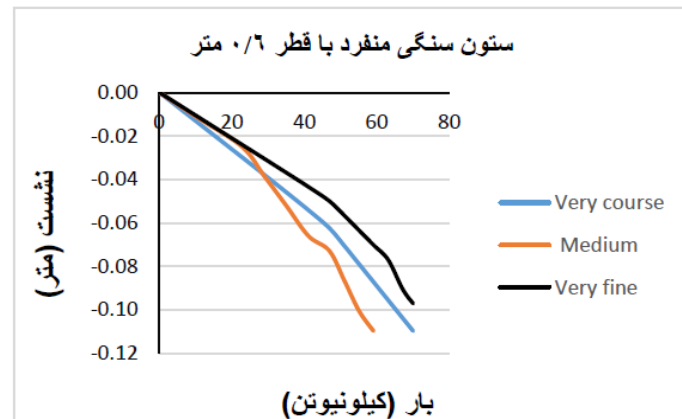
Table 4) Summary of 3D modeling results

ردیف	قطر (متر)	ارتفاع (متر)	آرایش	نسبت سختی اولیه نشست	ضریب بهبود باربری
۱	۰/۶	۳	مربعی	۳۵-۳۰ درصد	۳۷ درصد افزایش
۲	۰/۶	۳	مثلثی	۴۰/۷ درصد	۴۵-۳۵ درصد افزایش
۳	۰/۸	۴	مربعی	۳۵-۳۰ درصد	۳۷ درصد افزایش
۴	۰/۸	۴	مثلثی	۴۰ درصد	۴۵ درصد افزایش
۵	۱	۵	مربعی	۴۰-۳۵ درصد	۴۵ درصد افزایش
۶	۱	۵	مثلثی	۴۵-۲۰/۵ درصد	۵۰-۴۵ درصد افزایش
۷	۱/۲	۶	مربعی	۵۰-۴۵ درصد	۵۰ درصد افزایش
۸	۱/۲	۶	مثلثی	۵۵-۴۵ درصد	۶۰-۵۰ درصد افزایش

۵- بحث و تفسیر مهندسی نتایج

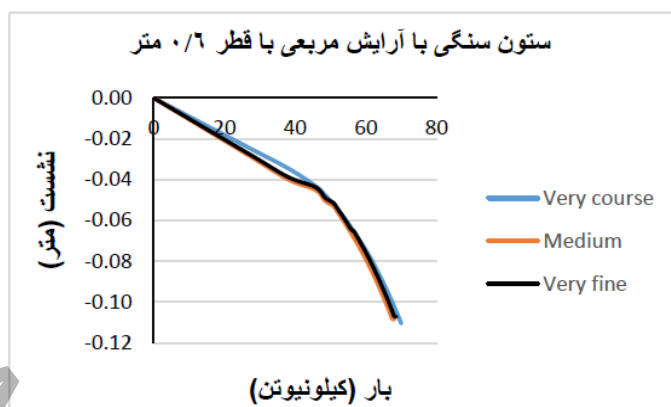
نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که نقش اصلی ژئوتکستایل در بهبود عملکرد ستون‌های سنگی، تأمین مقاومت کششی جانبی و جلوگیری از بروز پدیده برآمدگی ستون است. در ستون‌های غیرمحصور، مقاومت جانبی ناکافی خاک نرم اطراف موجب گسترش جانبی ستون و تمرکز تغییر شکل در نواحی بالایی می‌شود. این رفتار نه تنها ظرفیت باربری ستون را کاهش می‌دهد، بلکه منجر به افزایش نشست کلی سیستم می‌گردد. در مقابل، حضور ژئوتکستایل باعث محدود شدن تغییر شکل جانبی ستون و انتقال مؤثرتر بار به عمق خاک می‌شود. این امر موجب افزایش سختی اولیه، بهبود توزیع تنش و کاهش نشست نهایی می‌گردد. مقایسه نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی نشان می‌دهد که تحلیل سه‌بعدی برای بررسی ستون‌های گروهی ضروری است، زیرا قادر به بازنمایی دقیق اندرکنش ستون‌ها و رفتار واقعی سیستم می‌باشد. همخوانی نتایج این پژوهش با مطالعات معتبر پیشین نشان می‌دهد که مدل عددی توسعه‌یافته قادر است رفتار مکانیکی ستون‌های سنگی محصورشده را با دقت قابل قبول شبیه‌سازی کند و می‌تواند به عنوان ابزاری قابل اعتماد در تحلیل و طراحی مورد استفاده قرار گیرد.

بررسی نتایج این پژوهش نشان داد که آرایش مثلثی ستون‌های سنگی عملکرد بهتری نسبت به آرایش مربعی دارد. علت این موضوع را می‌توان به چند عامل مکانیکی مهم نسبت داد. نخست آنکه در آرایش مثلثی فاصله مرکز تا مرکز ستون‌ها کمتر بوده و ستون‌ها با توزیع یکنواخت‌تری اطراف ناحیه بارگذاری قرار می‌گیرند. این ویژگی باعث پخش بهتر تنش‌ها و کاهش نواحی ضعیف بین ستون‌ها می‌شود. همچنین در این آرایش، هم‌پوشانی نواحی تأثیر برشی ستون‌ها افزایش یافته و محصورشدگی جانبی مؤثر خاک بیشتر می‌گردد که نتیجه آن کاهش بیشتر نشست است. علاوه بر این، آرایش مثلثی بالاترین نسبت سطح تقویت‌شده را ایجاد می‌کند و از نظر هندسی بهترین آرایش برای قرارگیری حداکثری ستون‌ها در یک مساحت مشخص محسوب می‌شود. این امر موجب می‌



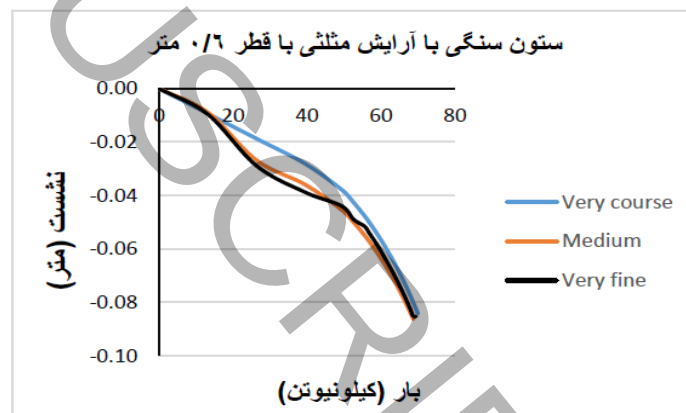
نمودار بار-نشست بررسی حساسیت مش ستون سنگی منفرد

Fig13) Load-settlement diagram of sensitivity analysis of single stone column mesh



نمودار بار-نشست بررسی حساسیت مش ستونهای سنگی با آرایش مربعی

Fig14) Load-settlement diagram of sensitivity analysis of mesh of stone columns with square arrangement



نمودار بار-نشست بررسی حساسیت مش ستونهای سنگی با آرایش مثلثی

Fig15) Load-settlement diagram of sensitivity analysis of mesh of stone columns with triangular arrangement

۷- نتیجه گیری

بر اساس نتایج تحلیل‌های عددی انجام‌شده، می‌توان نتایج زیر را به‌صورت خلاصه و کاربردی ارائه کرد:

نتایج تحلیل‌های عددی نشان داد که محصورسازی ستون‌های سنگی با ژئوتکستایل نقش مؤثری در افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست سیستم خاک-ستون ایفا می‌کند. این بهبود عملکرد عمدتاً ناشی از تأمین محصورشدگی جانبی و افزایش مقاومت در برابر گسترش جانبی ستون سنگی است.

مقایسه ستون‌های سنگی محصور و غیرمحصور نشان داد که در ستون‌های غیرمحصور، تمرکز تغییر شکل‌های جانبی و بروز پدیده برآمدگی عمدتاً در ناحیه بالایی ستون رخ می‌دهد، در حالی که استفاده از ژئوتکستایل موجب کنترل مؤثر این تغییر شکل‌ها و توزیع یکنواخت‌تر تنش در طول ستون می‌شود.

محصورسازی ستون‌های سنگی با ژئوتکستایل موجب کاهش نشست نهایی خاک نرم به میزان حدود ۴۵ تا ۵۰ درصد می‌شود.

ظرفیت باربری ستون‌های محصورشده نسبت به ستون‌های غیرمحصور به‌طور متوسط تا ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. افزایش قطر و ارتفاع ستون‌ها، به‌ویژه در حالت محصورشده، منجر به بهبود قابل توجه سختی اولیه و عملکرد باربری سیستم می‌شود.

در ستون‌های گروهی، آرایش مثلثی عملکرد بهتری نسبت به آرایش مربعی از نظر توزیع تنش و کاهش نشست از خود نشان می‌دهد (بهبود ۱۰ تا ۱۵ درصدی).

نتایج حاکی از آن است که پوشش ژئوتکستایل باعث افزایش سختی جانبی ستون سنگی شده و در نتیجه، شیب اولیه منحنی بار-نشست افزایش می‌یابد. این موضوع بیانگر بهبود رفتار باربری ستون در مراحل اولیه بارگذاری و کاهش تغییر شکل‌های اولیه بستر است.

تحلیل‌های سه‌بعدی ستون‌های سنگی گروهی نشان داد که تأثیر محصورسازی ژئوتکستایل در سیستم‌های گروهی محسوس‌تر از ستون‌های منفرد است. در این حالت،

شود بخش بیشتری از بار توسط ستون‌ها تحمل شده و نشست کمتری در خاک نرم ایجاد گردد. از سوی دیگر، تمرکز تنش در فضای بین ستون‌ها در آرایش مربعی بیشتر بوده ولی در آرایش مثلثی این نقاط تنش به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابند که منجر به عملکرد باربری یکنواخت‌تر و پایدارتر می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که رفتار عددی مشاهده‌شده از منظر فیزیکی با مکانیزم‌های شناخته‌شده اندرکنش ستون سنگی و خاک نرم، به‌ویژه اثر محصورسازی جانبی و توزیع تنش، همخوانی کامل دارد.

۶- اعتبارسنجی مدل عددی

به‌منظور اطمینان از صحت مدل عددی، نتایج این پژوهش با یافته‌های (Bazzazian Bonab 2020) و همکاران و Ankit Thakur و همکاران (۲۰۲۰) مقایسه شده است. تطابق مناسب منحنی‌های بار-نشست و مقادیر نشست نهایی، BIF و SSR نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل عددی است. اختلاف نتایج در بازه قابل قبول تحلیل‌های ژئوتکنیکی قرار دارد و رفتار کلی سیستم به‌خوبی بازتولید شده است.

جدول ۵) اعتبارسنجی نتایج تحقیق با مطالعات گذشته

Table 5) Validation of research results with previous studies

ردیف	پژوهشگران	نوع تحقیق	مدل یا روش استفاده شده	کاهش نشست	افزایش ظرفیت باربری
۱	Bazzazian Bonab et al. (۲۰۲۰)	آزمایشگاهی	مدل فیزیکی	۴۰-۶۰ درصد	۲۵-۴۵ درصد
۲	Thakur et al. (۲۰۲۱)	آزمایشگاهی + عددی	مدل فیزیکی + PLAXIS 2D & 3D	۳۰ درصد	۳۰-۴۰ درصد
۳	تحقیق حاضر (۲۰۲۵)	عددی	PLAXIS 2D & 3D	۴۰-۵۳ درصد (۲بعدی) ۳۰-۵۵ درصد (۳بعدی)	۳۵-۶۰ درصد (۲بعدی) ۳۷-۶۰ درصد (۳بعدی)

ژئوتکستایل علاوه بر کنترل گسترش جانبی هر ستون، موجب بهبود اندرکنش بین ستون‌ها و توزیع مناسب‌تر تنش در توده خاک اطراف می‌شود.

بررسی کانتورهای تنش و تغییر شکل نشان داد که در ستون‌های محصورشده، تنش‌های جانبی به‌طور مؤثری توسط ژئوتکستایل جذب شده و تمرکز تنش در ناحیه تماس ستون و خاک کاهش می‌یابد. این امر منجر به کاهش شدت برآمدگی و افزایش پایداری کلی سیستم می‌شود.

از منظر کاربردی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از ستون‌های سنگی محصورشده با ژئوتکستایل می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای بهسازی خاک‌های نرم با مقاومت زهکشی‌نشده پایین باشد. به‌ویژه در پروژه‌هایی که محدودیت نشست معیار اصلی طراحی است، به‌کارگیری ستون‌های محصور موجب بهبود قابل توجه عملکرد سیستم و افزایش ضریب اطمینان طراحی می‌شود. یافته‌های این تحقیق می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای طراحی و تحلیل ستون‌های سنگی محصور در پروژه‌های عملی مورد استفاده قرار گیرد.

قابلیت اجرایی: روش‌های محصورسازی پیشنهادی، شامل استفاده از ژئوتکستایل‌ها و ژئوسنتتیک‌ها، از نظر فنی و اقتصادی در پروژه‌های عمرانی قابل توجه هستند.

محصورسازی عمودی: اجرای ستون‌های سنگی همراه با غلاف‌های ژئوتکستایل در حین عملیات تراکم (مانند روش Vibro-Replacement، روشی رایج برای افزایش مقاومت و کاهش نفوذپذیری است).

محصورسازی افقی: استفاده از لایه‌های ژئوسنتتیک در هنگام تراکم ستون‌ها، به‌ویژه در پروژه‌های بهسازی خاک، ضمن افزایش پایداری، نقش مؤثری در کنترل نشست ایفا می‌کند. این روش‌ها به دلیل سهولت اجرا و در دسترس بودن مصالح، راهکاری عملی برای پیاده‌سازی طرح‌های بهسازی محسوب می‌شوند.

با توجه به نتایج و محدودیت‌های تحقیق حاضر، می‌توان پیشنهادی زیر را برای ادامه و تکمیل پژوهش‌ها در آینده ارائه داد:

به‌کارگیری مدل‌های رفتاری پیشرفته‌تر خاک (مانند مدل‌های ساختاری-پلاستیک یا مدل‌های وابسته به زمان) به جای مدل‌های ساده Mohr-Coulomb یا Hardening Soil

بررسی رفتار ستون‌های محصور تحت بارگذاری چرخه‌ای (مثلاً بارگذاری ناشی از ترافیک).

تحلیل رفتار ستون‌ها در شرایط دینامیکی مانند زلزله و بررسی نقش ژئوتکستایل در کاهش ارتعاش و افزایش پایداری.

در نظر گرفتن اثر تغییرات سطح آب زیرزمینی و شرایط زهکشی در بلندمدت.

مراجع

- [1] Murugesan, S., & Rajagopal, K. (2010). Studies on the Behavior of Single and Group of Geosynthetic Encased Stone Columns. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 136(1), 129–139. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000187](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000187)
- [2] Bazzazian Bonab, S., Lajevardi, S. H., Saba, H. R., Ghalandarzadeh, A., & Mirhosseini, S. M. (2020). Experimental studies on single reinforced stone columns with various positions of geotextile. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(3). <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00349-0> (In Persian)
- [3] Thakur, A., Rawat, S., & Gupta, A. K. (2020). Experimental and numerical modelling of group of geosynthetic-encased stone columns. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00379-8>
- [4] Katakiya, M., P Parmar, Samirsinh. (2023). Experimental Study of Bearing Capacity in Single and Group Stone Columns With and Without Encasement. *Journal of Advances in Geotechnical Engineering*, 6(1). <https://doi.org/10.5281/zenodo.7736100>
- [5] Negahdar, A., Fatholouloumi, Nader. (2022). The Experimental and Numerical Studies of Encased Stone Column Individually, in Group and Nucleated on Improvement of Loose Sandy Soil. *Journal of Structural and Construction Engineering*. <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.337866.2789> (In Persian)

- [15] S. V. S., James, J., Pavithra, K., Renuka Devi, S., Sangeetha, K., Sasikala, M., & Adamu, M. (2023). Comparison of Encased Stone Column with Conventional Column for Varied Parameters through Experimental and Numerical Investigations. *Advances in Civil Engineering*, 2023, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2023/7564756>
- [16] Gupta, H., Sathe, R. S., & Sharma, J. K. (2022). Numerical analysis on load-settlement response of reinforced granular blanket over ordinary stone column. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 19(1), 1–7. [https://doi.org/10.6703/ijase.202209_19\(3\).006](https://doi.org/10.6703/ijase.202209_19(3).006)
- [17] Saied, M., Abu Zeid, M. M., & Abdel Naiem, M. A. (2022). Numerical Study of the Behaviour of Embankment Constructed over Soft Soil Stabilized with Ordinary and Geosynthetic - Reinforced Stone Columns. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 0(0), 189–204. <https://doi.org/10.21608/jesaun.2022.127095.1122>
- [18] Elsiragy, M. (2021). Utilization of stone column for improving seismic response of foundation on soft clay- Numerical study. *Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 0(0), 56–61. <https://doi.org/10.21608/jpme.2021.58911.1069>
- [19] Ahmed, D., Noor Linda bt Taib, Siti, Ayadat, Tahar, Hasan, Alsidqi. (2020). Numerical investigation on the performance of stone columns under raft foundation in soft clayey soils. *International UNIMAS Engineering Conference 2020 (ENCON 2020)*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1101/1/012015>
- [20] Grizi, A., Al-Ani, W., & Wanatowski, D. (2022). Numerical Analysis of the Settlement Behavior of Soft Soil Improved with Stone Columns. *Applied Sciences*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/app12115293>
- [21] M. Bahrami, S. M. M. (2021). Large-Scale Experimental Study on Collapsible Soil Improvement Using Encased Stone Columns. *International Journal of Engineering*, 34(5). <https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.05b.08> (In Persian)
- [22] Yasser, F., Altahrany, A., & Elmeligy, M. (2022). Numerical investigation of the settlement behavior of hybrid system of floating stone columns and granular mattress in soft clay soil. *International Journal of Geo-*
- [6] Srijan, S., & Gupta, A. K. (2023). Vertically and Horizontally Reinforced End-Bearing Stone Column: An Experimental and Numerical Investigation. *Applied Sciences*, 13(19). <https://doi.org/10.3390/app131911016>
- [7] Shahmandi, A., Ghazavi, M., Barkhordari, K., & Hashemi, M. (2023). The Effect of Using Reinforced Granular Blanket and Single Stone Column on Improvement of Sandy Soil: Experimental Study. *International Journal of Engineering*, 36(8), 1532–1547. <https://doi.org/10.5829/ije.2023.36.08b.13> (In Persian)
- [8] Xu, F., Moayedi, H., Foong, L. K., Moghadam, M. J., & Zangeneh, M. (2021). Laboratory and numerical analysis of geogrid encased stone columns. *Measurement*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108369>
- [9] Gu, M., Mo, H., Qiu, J., Yuan, J., & Xia, Q. (2022). Behavior of floating stone columns reinforced with geogrid encasement in model tests. *Frontiers in Materials*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.980851>
- [10] Hataf, N., Nabipour, N., & Sadr, A. (2020). Experimental and numerical study on the bearing capacity of encased stone columns. *International Journal of Geo-Engineering*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s40703-020-00111-6> (In Persian)
- [11] Thakur, A., Rawat, S., & Gupta, A. K. (2021). Experimental and Numerical Investigation of Load Carrying Capacity of Vertically and Horizontally Reinforced Floating Stone Column Group. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(4), 3003–3018. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01674-y>
- [12] Thakur, A., Rawat, S., & Gupta, A. K. (2020). Experimental study of ground improvement by using encased stone columns. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00383-y>
- [13] Naseer, S., Sarfraz Faiz, M., Iqbal, S., & Jamil, S. M. (2019). Laboratory and numerical based analysis of floating sand columns in clayey soil. *International Journal of Geo-Engineering*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40703-019-0106-6>
- [14] Menon, A. R., Bhasi, A., & Konnur, S. (2023). Experimental and Numerical Investigation of Column-Supported Soft Clays Reinforced with Basal Geocell. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 11(2), 675–702. <https://doi.org/10.1007/s40515-023-00293-3>

[27] Ehsaniyamchi, A., & Ghazavi, M. (2019). Short-term and long-term behavior of geosynthetic-reinforced stone columns. *Soils and Foundations*, 59(5), 1579–1590. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.07.007>

[28] Mehrannia, N., Nazariafshar, J., & Kalantary, F. (2017). Experimental Investigation on the Bearing Capacity of Stone Columns with Granular Blankets. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(1), 209–222. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0317-6> (In Persian)

[29] Mehrannia, N., Kalantary, F., & Ganjian, N. (2018). Experimental study on soil improvement with stone columns and granular blankets. *Journal of Central South University*, 25(4), 866–878. <https://doi.org/10.1007/s11771-018-3790-z>

(In Persian)

Engineering, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s40703-022-00177-4>

[23] Rezaei, M. M., Lajevardi, S. H., Saba, H., Ghalandarzadeh, A., & Zeighami, E. (2019). Laboratory Study on Single Stone Columns Reinforced with Steel Bars and Discs. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s40891-019-0154-1> (In Persian)

[24] Cheng, Y., Cai, X., Mo, H., & Gu, M. (2023). Numerical Analysis on the Behavior of Floating Geogrid-Encased Stone Column Improved Foundation. *Buildings*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/buildings13071609>

[25] Gu, M., Mo, H., Qiu, J., Yuan, J., & Xia, Q. (2022). Behavior of floating stone columns reinforced with geogrid encasement in model tests. *Frontiers in Materials*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.980851>

[26] Nasiri, M., & Hajiazizi, M. (2019). An experimental and numerical investigation of reinforced slope using geotextile encased stone column. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(5), 543–552. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1651029> (In Persian)