

مطالعه آزمایشگاهی ظرفیت باربری معادل بستر رسی بهسازی شده با ستون سنگی

کریم بهاری امینه^۱ سید محمد علی صدرالدینی^{۲*} و محمد هادی علیزاده الیزی^۳

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر

^۳ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن

^۱ bahari.amineh@iau.ac.ir

^۲ ali.sadreddini@iau.ac.ir

^۳ alizadeh.elizei@iau.ac.ir

چکیده

در چند دهه‌ی اخیر، ساخت و ساز بر روی خاک‌های سست و مسئله‌دار، چالش‌ها و مشکلات زیادی را پیش‌روی مهندسان ژئوتکنیک قرار داده است. در این میان، روش‌های متعددی برای بهسازی این خاک‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله‌ی این روش‌ها، استفاده از ستون سنگی است که با حذف بخشی از خاک ضعیف و جایگزینی آن با ستون‌های خاک دانه‌ای صورت می‌گیرد. در این تحقیق، بهسازی بستر رسی سست از دو طبقه‌ی CL و CH، با ستون‌های سنگی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، نمونه‌های بهسازی نشده و بهسازی شده با گروه ستون سنگی، شامل ۷ ستون با قطر ۳۰ سانتی‌متر و چیدمان مثلی، در دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس مورد آزمایش قرار گرفته و پارامترهای مقاومت برشی معادل و مقادیر ظرفیت باربری تعیین شده‌اند. آزمایش برش با استفاده از روش سریع انجام شده است. همچنین، تأثیر متغیرهایی چون نوع خاک پیرامونی، تعداد لایه‌های ساخت ستون سنگی و راستای چینش ستون‌های سنگی محدود با چیدمان مثلی (رأس/قاعده)، بر پارامترهای مقاومت برشی و ظرفیت باربری مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس نتایج حاصل، بهسازی خاک رسی با استفاده از روش گروه ستون سنگی موجب افزایش قابل توجه ظرفیت باربری خاک‌های سست شده است. نتایج آزمایش انجام شده نشان داد کیفیت ستون سنگی اهمیت زیادی در توان باربری آن دارد. علاوه بر این بهسازی خاک رسی CL نسبت به بهسازی خاک CH به روش ستون سنگی می‌تواند توان باربری بستر را بیشتر افزایش دهد که بیانگر کارایی بیشتر این روش بهسازی در خاک‌های رسی سخت تر است.

کلیدواژه‌ها: بستر رسی؛ ستون سنگی؛ برش مستقیم بزرگ مقیاس؛ مقاومت برشی؛ ظرفیت باربری.

۱- مقدمه

هرگاه به عللی، امکان تغییر مسیر و یا تعویض خاک نباشد و یا اینکه هزینه‌ی تعویض خاک مقرون‌بصرفه نباشد، باید روش اصلاح و بهسازی خاک مورد بررسی قرار گیرد تا چنانچه از نظر اقتصادی و فنی قابل توجیه باشد، به انجام آن مبادرت گردد [۱ و ۳۵]. در این میان، اجرای ستون‌های سنگی، به عنوان روشی مؤثر، اقتصادی و سازگار با محیط زیست، دارای قابلیت بهسازی زمین‌های متشکل از خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده‌ی سست می‌باشد [۲ و ۳۸]. این ستون‌ها، به علت کارایی مناسب یکی از متداول‌ترین روش‌های اصلاح خاک هستند. استفاده از این ستون‌ها، موجب افزایش ظرفیت باربری خاک‌های نرم و سست شده و نشست آنها را در اثر بارهای وارده کاهش می‌دهند. در خاک‌های رسی اشباع، این ستون‌ها به عنوان زهکش

برخی از خاک‌ها، به علت مشخصات فنی نامطلوب و یا دارا بودن مقادیر قابل توجهی رس یا لای، برای عملیات عمرانی نامرغوب محسوب می‌شوند. این گونه خاک‌ها به دلیل حساسیت و ناپایداری در برابر رطوبت، مقاومت کم و تراکم‌پذیری، مشکلات فراوانی را از نظر فنی و اقتصادی ایجاد می‌کنند. چنانچه مسیر یک راه از مناطقی که دارای خاک‌های نامرغوب باشد، عبور کند، طرح و اجرای زیرسازی و روسازی، مستلزم استفاده از لایه‌هایی با مصالح متفاوت و ضخیم خواهد بود. این امر باعث مصرف مقادیر قابل توجه مصالح، افزایش هزینه‌های عملیاتی و طولانی شدن زمان اجرای پروژه می‌شود. در این موارد اغلب اقدام به تغییر مسیر راه یا تعویض خاک می‌گردد.

عمل کرده و باعث کاهش زمان تحکیم می‌شوند [۳] و ۳۷-۴۰]. برخی از روش‌های اصلی اجرایی این ستون‌ها که در شرایط مختلف سایت‌ها قابل اعمال می‌باشند، شامل روش جایگزینی- ارتعاشی^۱ یا روش تر، روش جابجایی- ارتعاشی^۲ یا روش خشک، روش ستون سنگی کوبشی^۳، شمع‌های متراکم ماسه‌ای^۴، روش چرخشی- جابجایی^۵ و روش ستون سنگی صلب^۶ می‌باشد.

ستون‌های سنگی، اولین بار توسط "موراو"^۷ و همکاران (۱۸۳۰)، جهت تقویت پی با اهداف نظامی در کشور فرانسه به کار گرفته شدند که این اقدام، کاهش نشست و افزایش قابل توجه ظرفیت باربری را به دنبال داشت. سپس کاربرد این روش در کشورهای صنعتی گسترش یافته و فرایندهای اجرای آن بهبود بخشیده شد. قبل از سال ۱۷۹۱، اغلب تحقیقات در زمینه‌ی ستون سنگی، محدود به کارهای تجربی بود. سال ۱۷۹۱، اولین بررسی آزمایشگاهی بر روی ستون سنگی انجام گرفت که دلیل شکست ستون سنگی، انبساط جانبی در قسمت بالای ستون گزارش شد و بر این اساس، مفهوم سلول واحد، برای پیش‌بینی ظرفیت باربری ستون‌های سنگی ارائه گردید [۴]. در ایران، استفاده از ستون سنگی برای نخستین بار با استفاده از روش کوبیدنی اجرا شد و از سال ۱۳۸۳، تکنیک‌های ارتعاشی ساخت ستون‌های سنگی در ایران مورد استفاده قرار گرفت [۲].

ظرفیت باربری ستون سنگی، به ویژگی‌های اصطکاکی ستون، چسبندگی و ویژگی‌های اصطکاکی خاک‌های اطراف ستون، انعطاف‌پذیری یا صلیبیت فونداسیون برای انتقال تنش‌ها به خاک بهسازی شده و همچنین، مقدار فشار جانبی توسعه یافته در توده‌ی خاک اطراف و اعمال آن به کناره‌های ستون سنگی، به علت اندرکنش بین عناصر مختلف در سیستم نسبت داده می‌شود. ستون سنگی، ظرفیت محوری خود را از فشار منفعل توسعه یافته در خاک، ناشی از اثر شکم‌دادگی ستون و افزایش مقاومت در برابر تغییرشکل جانبی تحت سربار به دست می‌آورد [۵]. شکست ستون‌های سنگی، به صورت انبساط جانبی،

شکست برش (ستون، پانچ و کلی)، خمش و کماتش مشاهده شده است [۶]. عملکرد خاک مسلح شده با ستون سنگی نیز، به پارامترهای مختلفی بستگی دارد. به منظور درک و پیش‌بینی رفتار ستون‌های سنگی، مطالعات بسیاری بر اساس مدل‌سازی فیزیکی، تجزیه و تحلیل ریاضی و آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده‌اند که در ادامه به برخی از این مطالعات اشاره می‌گردد.

ازگاندی و کالومبا^۸ (۲۰۱۴) [۷]، با بررسی عددی و انجام آزمایش به این نتیجه رسیدند که هنگام تغییر قطر ستون در خاک پایه به میزان ۱/۵، ۲ و ۳ برابر قطر اولیه‌ی ستون، ظرفیت باربری، تقریباً به میزان ۲، ۴ و ۱۰ برابر مقاومت اولیه افزایش می‌یابد. فولادی (۲۰۱۴) [۸]، با بررسی تأثیر ستون سنگی بر ظرفیت باربری خاک دریافت که در مدل‌های با مقیاس خیلی کوچک، تشابه لازم بین نمونه‌های آزمایشگاهی و واقعی وجود نداشته و نمی‌توان از نتایج مدل‌های خیلی کوچک استفاده کرد.

پژوهش انجام شده توسط مختاری (۲۰۱۴) [۹] نشان داده است که افزایش قطر، ارتفاع، تعداد، سختی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی ستون‌ها، افزایش درصد ناحیه‌ی اصلاح شده و کاهش عرض پی، تأثیر افزایشی بر ظرفیت باربری خاک دارند. مرادی (۲۰۱۶) [۱۰] با بررسی تأثیر افزایش قطر و تغییر چیدمان ستون‌های سنگی، نوع خاک پیرامونی ستون سنگی و درصد رطوبت خاک پیرامونی بر ظرفیت باربری خاک رس، بیشترین افزایش ظرفیت باربری را برای نمونه‌های متشکل از خاک رس و ستون‌های سنگی دارای قطر ۷ سانتیمتر، با چیدمان مثلی و رطوبت خاک پیرامونی معادل دو درصد کمتر از رطوبت بهینه گزارش کرده که نسبت به ظرفیت باربری خاک‌های CL و CH پیرامونی شاهد، به ترتیب، افزایشی به میزان ۵/۵ برابر و ۴/۳ برابر حاصل شده است. کردگار (۲۰۱۸) [۱۱]، در مطالعه‌ی خود برای مدل کردن اثر استفاده از ستون سنگی بر ظرفیت باربری خاک‌های رسی، از برنامه‌ی اجزاء محدود PLAXIS استفاده نموده است. بر اساس نتایج، تأثیر طول ستون سنگی و سختی پوشش آنها بر ظرفیت باربری، نسبت به سایر عوامل، قابل توجه‌تر بوده و باید در تحلیل و طراحی جامع سیستم خاک-سازه در نظر گرفته شود.

- 1 Vibro-Replacement
- 2 Vibro-Displacement
- 3 Rammed stone column
- 4 Compacted sandy pile
- 5 Rotary Displacement or Rotocolumn Method
- 6 Rigid Stone Column
- 7 Moreau

در پژوهش انجام شده توسط حنا، خلیفه و عبدالرحمان^۹ (۲۰۱۸) [۱۲]، برای بررسی عملکرد خاک رس مسلح شده با ستون‌های سنگی منفرد و گروهی، یک روش آزمایشگاهی جدید با لحاظ نمودن اثر انرژی تراکم مورد استفاده در طول فرآیند نصب ستون سنگی، همچنین، اثر فاصله‌ی بین ستون‌های سنگی بر مقاومت برشی خاک مسلح شده ارائه شده است. اصلائی، نظری افشار و گنجیان (۲۰۱۹) [۱۳]، یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی برای بررسی مقاومت برشی بستر ماسه‌ی مسلح شده با ستون سنگی، با انجام آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس و تغییر چیدمان ستون‌های سنگی انجام داده‌اند. با توجه به نتایج حاصل، بیشترین افزایش در مقادیر مقاومت برشی و سختی، برای چیدمان مربعی ستون‌های سنگی و حداقل افزایش، برای ستون‌های سنگی منفرد مشاهده شده است.

نظری افشار و همکاران (۱۳۹۹) [۱۷] در تحقیقات خود در خصوص بررسی مقاومت برشی معادل خاکهای چسبنده بهسازی شده با ستون‌های سنگی، با استفاده از دستگاه سه محوری و نمونه‌های آزمایشگاهی با قطر ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر، مطالعاتی انجام دادند. ایشان تأثیر پارامترهایی همچون فشار دورگیر (۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال)، نسبت ناحیه اصلاح‌شده (۱۴٪ و ۲۶٪) و قطر ستون‌های سنگی (۳۷۰۵ و ۵۱ میلی‌متر) را بر رفتار خاک نرم تحلیل کردند. نتایج نشان داد افزودن ستون‌های سنگی منجر به افزایش قابل توجه مقاومت برشی زهکشی‌نشده و سختی نمونه‌ها می‌شود، به‌طوری با افزایش قطر ستون و فشار دورگیر، تنش انحرافی نهایی نمونه‌ها روند صعودی داشت. همچنین مشخص شد اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و روابط تحلیلی موجود (مانند روش همگن‌سازی خطی) در خاک‌های با مقاومت برشی پایین بیشتر است، که بیانگر نیاز به اصلاح این روابط با در نظر گرفتن اثرات تمرکز تنش در خاک‌های بسیار نرم است.

حمزه، محمد و بن‌یوسف^{۱۰} (۲۰۱۹) [۱۴]، با مقایسه‌ی بین شکل‌های یکنواخت و غیریکنواخت ستون برای تعیین طرح بهینه‌ی ستون، دو تحلیل اجزاء محدود دوبعدی با استفاده از نرم‌افزار Plaxis انجام داده‌اند. به طور کلی، روش مورد استفاده در این پژوهش (قطر بزرگتر در بالا و قطر کمتر در پایین ستون)،

استفاده از حجم کمتر مصالح سنگی و در نتیجه، هزینه‌ی کمتر و دستیابی به سطحی از ظرفیت باربری مشابه ستون استاندارد را امکان‌پذیر می‌سازد. در پژوهش صورت گرفته توسط الوایلی، فتاح و القیاسی^{۱۱} (۲۰۲۰) [۱۵] گزارش شده است که نسبت تمرکز تنش (نسبت تنش اعمال شده بر روی ستون‌های سنگی، به تنش اعمال شده بر روی خاک مجاور ستون) و ظرفیت باربری خاک بهسازی شده با ستون سنگی (مقدار نشست تحت تنش اعمال شده)، با افزایش مقاومت برشی زهکشی نشده (C_u)، تعداد ستون‌های سنگی (N_s) و نسبت L/D (قطر/طول) افزایش می‌یابد. نتایج پژوهش هاتف، نبی‌پور و صدر (۲۰۲۰) [۱۶]، برای بررسی اثرات طول محصورشدگی (نصف طول ستون و طول کامل ستون) و نوع مصالح سنگی بر ظرفیت باربری یک ستون سنگی منفرد مدفون در هر دو بستر رسی و ماسه‌ای، نشان‌دهنده‌ی بهبود مشخص ظرفیت باربری با محصور شدن نصف طول ستون بوده‌اند. همچنین، برای مصالح با اندازه‌ی کوچکتر، محصور نمودن ستون‌های سنگی، بهبود بیشتری نسبت به مصالح درشت‌تر ایجاد می‌کند. از سوی دیگر، با توجه به نتایج آزمایش‌ها، محصور نمودن ستون‌ها در بستر رسی، تأثیرگذارتر از ماسه است.

غفار پور و همکاران (۱۳۹۸) [۳۴] به بررسی تأثیر عواملی همچون شکل و هندسه ستون‌های سنگی، آرایش ستون‌های سنگی و مشخصات فنی مصالح استفاده شده در ساخت ستون‌های سنگی با استفاده از روشهای عددی اجزا محدود بر روی بیش از ۱۵۰ مدل پرداخته‌اند. مطالعه آن‌ها نشان داد که استفاده از ستون‌های سنگی تأثیر بسیار زیاد و قابل توجهی بر افزایش ظرفیت باربری خاک‌های سست دارد و نیز می‌تواند باعث کاهش نشست شود.

در پژوهش انجام شده توسط حداد و شاهوردی (۲۰۲۰) [۱۸]، عملکرد ستون سنگی شناور ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی و سنگدانه‌ی طبیعی، با انجام آزمایش بارگذاری محوری کوچک‌مقیاس مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به یافته‌ها، ظرفیت باربری بستر رس مسلح به ستون شناور پر شده با خرده آجر یا خرده بتن، تقریباً ۵ برابر ظرفیت باربری بستر رسی بدون سنگی بوده است. همچنین، ستون‌های سنگی شناور ساخته شده از یک نوع سنگدانه، عملکرد به مراتب بهتری نسبت به ستون

سنگی ساخته شده از ترکیب چند نوع مصالح بازیافتی با یکدیگر یا ترکیب مصالح بازیافتی با سنگدانه‌ی طبیعی داشته‌اند.

مهران نیا و همکاران (۲۰۱۸) [۴۰] با استفاده از مدل سازی آزمایشگاهی تاثیر مشخصات هندسی ستون‌های سنگی بر ظرفیت باربری خاک‌های سست را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه بزرگ مقیاس آن‌ها نشان داد با استفاده از ستون‌های سنگی دارای غلاف ژئوتکستایل ظرفیت باربری خاک سست و نسبت تمرکز تنش به طرز قابل توجهی افزایش می‌یابد.

در مطالعه‌ی صورت گرفته توسط ژو و همکاران^{۱۲} (۲۰۲۱) [۱۹]، اثرات ابعاد، طول و پارامترهای اصلی مرتبط با ستون سنگی بر رفتار تنش-کرنش ستون‌های سنگی محصورشده با ژئوگرید و ستون‌های غیرمسلح (محصورشده) مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آزمایشگاهی، با نتایج حاصل از نرم افزار Plaxis مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل نشان داده‌اند که وجود ستون‌های سنگی، موجب افزایش ظرفیت باربری خاک نرم، حداقل به میزان ۲ برابر شده و حتی با وجود کوتاه بودن طول، نشست‌های تفاضلی و کل را کاهش داده‌اند.

ساکسنا و روی^{۱۳} (۲۰۲۲) [۲۰] گزارش کرده‌اند که ظرفیت باربری ستون سنگی، عمدتاً به زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح ستون، قطر ستون سنگی، طول ستون سنگی، فاصله‌ی بین ستون‌های سنگی و چسبندگی زهکشی‌نشده‌ی خاک اطراف ستون سنگی بستگی دارد. در این مطالعه، فاصله‌ی بیش از 2D برای ستون‌ها (D: قطر ستون) پیشنهاد شده است. از سوی دیگر، ظرفیت باربری ستون سنگی، با افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح ستون و قطر ستون سنگی افزایش یافته است. کاظم‌زاده، زاد و یزدی (۲۰۲۲) [۲۱]، پژوهشی با هدف بررسی و کنترل میزان نشست و پایداری بستر رس نرم و خاکریز راه‌آهن تحت عبور قطار پرسرعت انجام داده‌اند. بر اساس نتایج، کاهش نشست کل و افزایش ظرفیت باربری ستون، وابسته به ارتفاع ستون سنگی بوده و قطر ستون سنگی بر منطقه‌ی تحت تاثیر ستون سنگی تاثیرگذار است. همچنین، افزایش سختی ژئوگرید، موجب کاهش نشست کل و نشست نامتقارن و کاهش طول محصورشدگی ستون سنگی توسط ژئوگرید، منجر به افزایش

نشست کل و نشست نامتقارن شده است. در مطالعه‌ی بزاززادگان، گنجیان و نظری افشار (۲۰۲۳) [۲۲]، اثر استفاده از ستون سنگی واقع بر بستر ماسه‌ای اشباع حاوی لنز ضعیف با استفاده از نرم افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان داده‌اند که در شرایط وجود لنز ضعیف، تغییر طول ستون سنگی غیرمسلح، تأثیر چندانی بر وقوع مود گسیختگی شکم‌دادگی و باربری آن نداشته و کاهش عمق قرارگیری لنز ضعیف، اثرات شکم‌دادگی ستون را افزایش می‌دهد.

برخی مطالعات آزمایشگاهی انجام شده شامل ساخت مدل های فیزیکی و آزمایش‌های آزمایشگاهی پر هزینه مانند سانتریفیوژ بوده است. امیر افشاری و قبری (۲۰۲۴) [۲۳] با استفاده از مدل‌های سانتریفیوژی ژئوتکنیکی، به بررسی عملکرد پی‌های حلقوی تقویت‌شده با ستون‌های سنگی بر روی لایه‌های خاک سست پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که به‌کارگیری ستون‌های سنگی با نسبت طول به قطر ۸ و آرایش حلقوی، موجب افزایش ظرفیت باربری به میزان ۲٫۸ برابر و افزایش مقادیر ضریب واکنش زیرسطحی (ks) و مدول یانگ (E) به میزان حدود ۳٫۴ برابر نسبت به حالت بدون تقویت می‌شود. برخی محققین نیز به کاربرد ژئوستنتیک‌ها در ساخت ستون سنگی پرداخته‌اند. فن و ناصری (۲۰۲۵) [۲۴] به بررسی عملکرد ستون‌های سنگی محصور در ژئوتکستایل عمودی (VGESC) و ستون‌های سنگی تقویت‌شده با پوشش‌های ژئوتکستایل افقی (HGCRSC) در شیب شنی کرمانشاه، ایران می‌پردازد. نتایج آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی سه‌بعدی نشان می‌دهد که ستون‌های محصور در ژئوتکستایل موجب افزایش ۶۲ درصدی ظرفیت باربری و تغییر حالت شکست از برشی به خمشی می‌شوند VGESC. تأثیرات بهتری نسبت به HGCRSC دارد.

یکی از روش‌های بهسازی بستر دایک‌ها و دستک‌های رسوبگیر در سواحل که در برخی نواحی شامل خاک رسی با خصوصیات مکانیکی متنوع می‌باشد روش ستونهای ماسه‌ای، شنی و سنگی است. این روش امکان کاهش پتانسیل روانگرایی را دارد و حتی در صورت اجرا با الگوی مشخص مقاومت جانبی محدودی را در برابر پدیده گسترش جانبی فراهم مینماید. با توجه به عرض کم دستک‌های رسوبگیر، عمدتاً اجرای روش‌های فوق با تعداد کم در مقطع عرضی مورد نیاز است. با نگاهی به پژوهش‌ها و مطالعات صورت گرفته [۳۵-۴۰]، می‌توان

³ Xu et al.

¹ Saxena & Roy

۳- مصالح مورد استفاده

در این تحقیق، دو نوع خاک رس به عنوان خاک پیرامونی ستون‌های سنگی و یک نوع خاک ماسه برای ساخت ستون سنگی مورد استفاده قرار گرفته است. نوع و ابعاد مصالح خاک پیرامونی با توجه به نوع خاک معمول موجود در بندر و سواحل که نیازمند بهسازی هستند و نوع و ابعاد مصالح ستون ها با توجه به خصوصیات مصالح معمول در ساخت ستون های شنی و ماسه‌ای انتخاب گردید. خاک‌های مذکور، تحت آزمایش دانه-بندی با روش الک (استاندارد ASTM-D422 [۲۶])، آزمایش هیدرومتری مصالح با روش رسوب‌سنجی (استاندارد ASTM-D422)، آزمایش تعیین حدود آتربرج (استاندارد ASTM-D4318 [۲۷])، آزمایش تعیین درصد رطوبت طبیعی مصالح (استاندارد ASTM-D2216 [۲۶])، آزمایش تعیین چگالی ذرات جامد توده‌ی خاک (G_s) (استاندارد ASTM-D854 [۲۹]) و آزمایش تراکم به روش پراکتور استاندارد (استاندارد ASTM-D698 [۳۰]) قرار گرفته‌اند. مشخصات مصالح مورد استفاده در جدول ۱ آزمایش ها و استاندارد های ارزیابی در جدول ۲ و نمودار دانه بندی آن-ها در شکل ۱ نمایش داده شده است. مطابق سیستم طبقه‌بندی متحد(استاندارد ASTM-D2487 [۳۱])، خاک های مورد استفاده در این تحقیق از طبقه‌ی CH (رس با خاصیت خمیری زیاد، همراه با ماسه)، طبقه‌ی CL (رس با خاصیت خمیری کم، همراه با ماسه) و خاک ماسه از طبقه‌ی SM (ماسه‌ی لای‌دار) بوده‌اند. لازم به ذکر است در جدول ۱ LL حد روانی، PL حد خمیری، PI شاخص خمیری، γ_{dmax} درصد رطوبت نمونه سازی، G_s چگالی ویژه دانه های خاک، و ω_{opt} درصد رطوبت بهینه است.

جدول ۱. مشخصات مصالح خاکی مورد استفاده

Classification*	ω_{opt}	γ_{dmax} gr/cm ³	G_s	ω	PI	PL	LL	Materials
CH	19.42	1.571	2.78	16.49	27	24	51	Clay#1
CL	15.56	1.632	2.72	12.51	12	19	31	Clay#2
SM	11.62	1.81	2.66	9.54	---	NPL	---	Sand

* according to Unified soil classification system

جدول ۲. آزمایش انجام شده و استاندارد ها

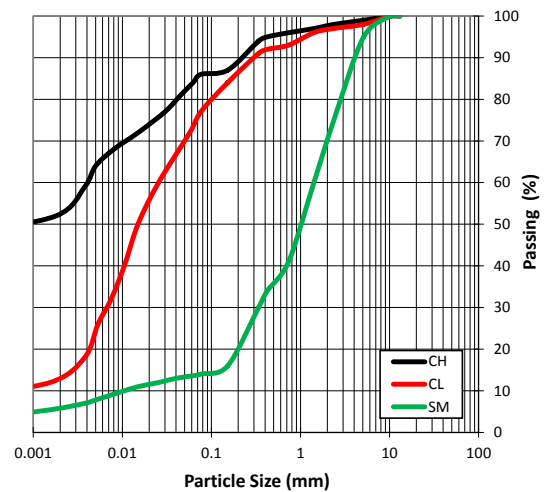
#	Test	Standard Code
1	آزمایش دانه‌بندی با روش الک [25]	ASTM-D422
2	آزمایش هیدرومتری مصالح با روش رسوب‌سنجی [25]	ASTM-D422
3	آزمایش تعیین حدود آتربرج [27]	ASTM-D4318
4	آزمایش تعیین درصد رطوبت طبیعی مصالح [28]	ASTM-D2216

دریافت که در گذشته بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی برای تعیین ظرفیت باربری بستر سست مسلح شده با ستون‌های سنگی انجام شده است. در این مطالعات، تأثیر عوامل مختلف بر ظرفیت باربری مورد ارزیابی قرار گرفته، اما تأثیر عواملی چون نوع خاک پیرامونی، تعداد لایه‌های ساخت ستون سنگی که بیانگر نحوه اجرا و یکنواختی تراکم در ستون ها می‌باشد و یا راستای چینش ستون ها نسبت به جهت بارگذاری در خصوص گروه ستون سنگی محدود (تعداد کم ستون ها)، چندان مورد توجه قرار نگرفته است. با توجه به اهمیت انرژی تراکم در طول فرآیند ساخت ستون سنگی و مرتبط بودن میزان تراکم و یکنواختی تراکم در طول هر ستون با تعداد لایه‌های ساخت ستون سنگی، همچنین اهمیت ویژگی‌های خاک سست پیرامون ستون‌های سنگی بر عملکرد این ستون‌ها، در پژوهش حاضر، خاک رس پیرامونی سست از دو طبقه‌ی مختلف با استفاده از ستون‌های سنگی مسلح شده و رفتار نمونه‌های متشکل از خاک پیرامونی و ستون سنگی، با تغییر راستای بارگذاری نسبت به چیدمان مثلثی و تعداد لایه‌های ساخت ستون سنگی، در دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس با هدف بررسی مقاومت برشی معادل و عملکرد این روش بهسازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. دستگاه آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس با توجه به امکان اعمال تنش قائم یکنواخت و ایجاد صفحه برش برآورد مقاومت برشی گروه ستون سنگی را در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی میسر می‌نماید. از انجام آزمایش‌های مذکور، پارامترهای مقاومت برشی معادل که بیانگر عملکرد خاک رس مسلح شده با ستون سنگی است و ظرفیت باربری معادل کل مجموعه ارزیابی و مقایسه می‌گردد.

۲- دستگاه آزمایش

در این مطالعه از دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس، مطابق استاندارد ASTM D3080 [۲۵] به روش سریع، بر روی خاک با رطوبتی معادل رطوبت بهینه استفاده شده است. در روش آزمایش UU، به نمونه اجازه‌ی زهکشی داده نمی‌شود و این موضوع، در پروژه‌های عمرانی در مواردی مانند بالادست سازه‌های هیدرولیکی، فشارهای جانبی خاک در سازه‌های نگهبان، سازه‌ها در مناطق زلزله‌خیز و ... که سرعت اعمال فشار وارده قابل ملاحظه است، مصداق دارد.

5	آزمایش تعیین چگالی ذرات جامد توده‌ی خاک [29] (Gs)	ASTM-D854
6	آزمایش تراکم به روش پراکتور استاندارد [30]	ASTM-D698
7	آزمایش برش مستقیم خاک [25]	ASTM-D3080



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح رسی نوع ۱ و ۲ و مصالح ماسه‌ای

۴- روش انجام آزمایش

در این تحقیق، ابتدا آزمایش‌های اولیه‌ای، به منظور بررسی اثر پارامترهای متغیر تعریف شده، شامل نوع خاک پیرامونی، تعداد لایه‌های ساخت ستون سنگی و بارگذاری در راستای چینش از رأس یا قاعده در چیدمان مثلثی، بر پارامترهای مقاومت برشی و ظرفیت باربری خاک رس سست بهسازی شده با ستون سنگی انجام گردید. سپس بر اساس نتایج آن آزمایش‌ها (موضوع این مطالعه) نمونه‌های مکعبی ساخته شد و تحت آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس تحت تنش‌های نرمال ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال قرار گرفت. نمونه‌ها، دارای ابعاد $304 \times 304 \times 304$ میلیمتر و ارتفاع ۱۵۱ میلیمتر، متشکل از خاک رس سست پیرامونی از طبقه‌ی CL یا CH و گروه ستون سنگی (۷ ستون با قطر ۳۰ میلیمتر) بوده‌اند. ستون‌های سنگی در ۱ تا ۳ لایه ساخته شده و تحت بارگذاری در راستای چینش از رأس یا قاعده در چیدمان مثلثی قرار گرفته‌اند.

در این تحقیق، علاوه بر نمونه‌های شاهد، در مجموع، ۱۲ مجموعه‌ی نمونه‌ی مرکب برای آزمایش با دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس ساخته شد. برنامه آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه و مشخصات نمونه‌های مرکب ساخته شده، در جدول ۳ ارائه گردیده است.

در آزمایش انجام شده، فشار وارد بر نمونه‌ها تا مرحله‌ی گسیختگی ادامه یافته است. سرعت بارگذاری نمونه‌ها در فاز گسیختگی، به میزان ۱ میلیمتر بر دقیقه انتخاب گردید و گسیختگی تا کرنش ۲۰ درصد ادامه یافت. دلیل انتخاب تعداد ۷ ستون با قطر ۳۰ میلیمتر و چیدمان مثلثی برای ستون‌های سنگی مورد آزمایش در دستگاه برش مستقیم در این تحقیق، استفاده از نتیجه‌ی حاصل از مطالعه‌ی انجام شده توسط مرادی (۲۰۱۶) [۱۰] بوده که طبق نتایج آزمایش‌های انجام شده در تحقیق وی، در این مطالعه با توجه به ابعاد جعبه برش، تعداد ۷ ستون با قطر ۷۰ میلیمتر و با چیدمان مثلثی، به صورت بهینه انتخاب شده است.

جدول ۳. جدول برنامه آزمایش‌های انجام شده شامل مشخصات نمونه‌ها

Title	Surrounding Soil type	Loading Position	Stone column Preparation Layer
CL-1L-Tip	CL	Tip	1
CL-2L-Tip			2
CL-3L-Tip			3
CL-1L-Base		Base	1
CL-2L-Base			2
CL-3L-Base			3
CH-1L-Tip	CH	Tip	1
CH-2L-Tip			2
CH-3L-Tip			3
CH-1L-Base		Base	1
CH-2L-Base			2
CH-3L-Base			3

*SM Soil Column with 70 mm diameter and Triangle arrangement,

**Surrounding soil has been prepared with optimum moisture content

۵- نحوه‌ی ساخت نمونه‌ها

ابتدا کل جعبه‌ی دستگاه آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس با ابعاد $151 \times 304 \times 304$ میلیمتر، با خاک رس پیرامونی مورد استفاده از نوع CL یا CH، در سه لایه‌ی حدود ۵۰ میلیمتری پر شده و با اضافه نمودن رطوبت تا مقدار رطوبت بهینه و رسیدن به وزن مخصوص خشک حداکثر، خاک متراکم می‌گردد. سپس، شابلون ساخته شده برای استقرار ۷ ستون سنگی با قطر ۳۰ میلیمتر و چیدمان مثلثی، بر روی جعبه‌ی پرشده از خاک رس قرار گرفته و لوله‌های فولادی برنده‌ی نازک به عمق ۱۵۱ میلیمتر، در خاک رس درون جعبه با انرژی کوبشی فرو رانده می‌شوند. پس از کوبیدن تعداد لوله‌های موردنیاز در چیدمان مثلثی ستون‌های سنگی، با استفاده از اوگر^۱، تمام مصالح داخل لوله‌ها تخلیه می‌شوند. هم‌اکنون، شرایط برای ساخت و استقرار ستون‌های سنگی آماده است. مصالح ستون سنگی (ماسه از طبقه‌ی SM)، با رطوبت معادل رطوبت بهینه، در تعداد لایه‌های مختلف (۱، ۲ و ۳) داخل لوله‌ها قرار می‌گیرد، به طوری که پس از ریختن هر

¹ Auger

۶- نتایج و بحث و بررسی

۶-۱- نتایج کلی آزمایش

با استفاده از نتایج آزمایش‌های برش مستقیم شامل ترسیم نمودارهای تغییرات تنش برشی - جابجایی افقی و نمودارهای تغییرات تنش برشی - تنش نرمال، پارامترهای معادل مقاومت برشی کل و در نهایت، مقادیر ظرفیت باربری پی متکی بر آن بستر، تعیین گردید. در جدول ۴ خلاصه نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داده شده است. مقادیر ظرفیت باربری برای نمونه‌های مختلف، بر اساس نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم، مطابق فرمول هانسن (رابطه ۱) محاسبه شده است.

$$q_u = (0.5\gamma B N_\gamma S_\gamma) + (\bar{P}_0 N_q S_q) + (C N_c S_c) \quad (1)$$

در رابطه‌ی فوق:

q_u : ظرفیت باربری نهایی خاک کف پی؛

C : چسبندگی خاک؛

$\bar{P}_0$: فشار سربار، برابر γD_f (γ ، وزن مخصوص خاک اطراف پی)

D_f : عمق مدفون پی؛

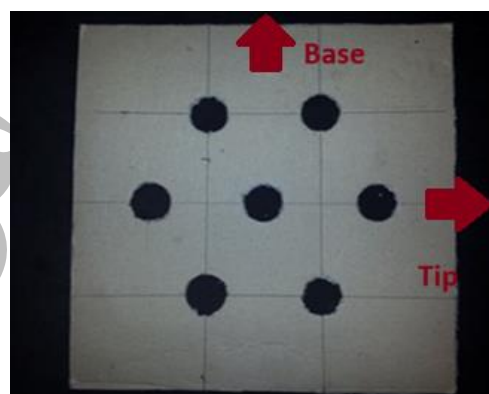
B : عرض پی؛ و

$N_c, N_q, N_\gamma, S_c, S_q, S_\gamma$ ضرایب ظرفیت باربری [۳۰].

در محاسبه‌ی ظرفیت باربری از رابطه‌ی فوق، عمق مدفون پی (D_f).

برابر یک و عرض پی (B)، برابر ۵ متر فرض شده‌اند.

لایه، مصالح با چکش مخصوص تا رسیدن به وزن مخصوص خشک حداکثر کوبیده می‌شود و با هر بار کوبیدن، لوله‌ی جدار تا تراز مشخصی بالا آورده می‌شود و تا زمانی که کل لوله خارج شود، این روند ادامه می‌یابد. بدین ترتیب، نمونه‌های مرکب (خاک سست پیرامونی + ستون سنگی) ساخته می‌شوند. شابلون مورد استفاده برای نصب ستون‌های سنگی در جعبه‌ی برش مستقیم، در شکل ۲ نشان داده شده است. جهت نصب ستون‌های سنگی در جعبه‌ی دستگاه برش مستقیم، از الگوی مثلثی استفاده شده است. الگوی مثلثی، شامل ۷ ستون سنگی بوده که در دایره‌ای با قطر معادل $D_e = 1.05S$ که در آن، S فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌های سنگی است، قرار داده می‌شوند. این دایره، شامل ستون‌های سنگی و خاک اطراف آنها است. در این مطالعه شابلون در دو جهت راس (Tip) و قاعده (Base) در دستگاه برش قرار داده شد تا تاثیر جهت چینش گروه ستون‌ها نیز مطالعه گردد.



شکل ۲. شابلون مورد استفاده برای نصب ستون‌سنگی در جعبه‌ی برش

جدول ۴. خلاصه‌ی نتایج آزمایش برش مستقیم برای خاک‌های پیرامونی شاهد و نمونه‌های مرکب

q_u (kPa)	ϕ (°)	C (kPa)	τ_{max} (kPa)	σ_v (kPa)	γ_{dmax} (kN/m ³)	ω_{opt} (%)	مشخصات نمونه
384	22	31	113.3	50 100 200	16.32	15.56	CL
602	26	34	131		16.32	15.56	CL-1L-Tip
882	29	38	148.1		16.32	15.56	CL-2L-Tip
2576	37	48	190.5		16.32	15.56	CL-3L-Tip
523	25	32	126.2		16.32	15.56	CL-1L-Base
679	27	35	135.2		16.32	15.56	CL-2L-Base
1591	34	40	173		16.32	15.56	CL-3L-Base
400	19	46	115.1		15.71	19.42	CH
544	22	49	128.5		15.71	19.42	CH-1L-Tip
759	25	53	145.2		15.71	19.42	CH-2L-Tip
1381	30	61	178.5		15.71	19.42	CH-3L-Tip
490	21	48	126.5		15.71	19.42	CH-1L-Base
661	24	50	139.1		15.71	19.42	CH-2L-Base
1071	28	57	164.1		15.71	19.42	CH-3L-Base

پیرامونی رسی با ستون سنگی، موجب افزایش تنش برشی گسیختگی و در نتیجه، افزایش مقاومت نمونه‌ی بهسازی شده با ستون سنگی، در مقایسه با خاک بهسازی نشده می‌گردد.

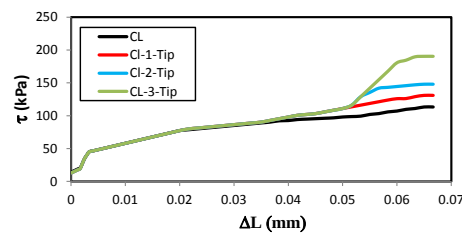
نتایج نشان می‌دهد در خاک CL و CH، صرف نظر از مقدار تنش نرمال، با افزایش تعداد لایه های آماده سازی ستون سنگی، مقاومت برشی افزایش یافته است. این موضوع به سبب افزایش یکنواختی تراکم و بهبود عملکرد ستون سنگی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد، خاک پیرامونی CL با توجه به سختی بیشتر نسبت به خاک CH محصور شدگی بیشتری در ستون سنگی ایجاد می‌نماید لذا دانه‌های ماسه در کرنش برشی کوچکتری بسیج شده و با ایجاد قفل و بست مقاومت برشی کل را افزایش می‌دهد. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد لایه‌های آماده سازی ستون سنگی و در نتیجه افزایش تراکم و یکنواختی خاک ماسه‌ای در هر ستون، جابجایی نسبی کمتری جهت بسیج دانه های خاک و افزایش مقاومت برشی مجموعه مورد نیاز است.

با توجه به شکل ۳، جهت چیدمان گروه ستون سنگی تاثیر قابل توجهی بر کارایی این روش بهسازی دارد. در صورت چیدمان و بارگذاری در راستای چینش از راس، مقدار مقاومت برشی گروه ستون سنگی بیشتر از شرایطی است که چیدمان و بارگذاری در راستای چینش از راس انجام می‌گیرد، که بیانگر توزیع مناسب تر تنش در ستون های سنگی در صورت بارگذاری در جهت قاعده است.

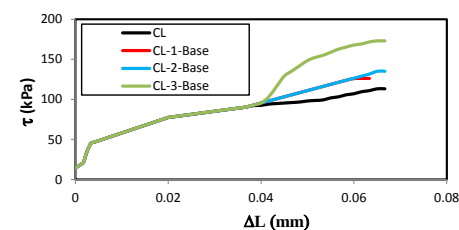
۳-۶- بررسی خصوصیات مقاومت برشی معادل

مقادیر پارامترهای مقاومت برشی معادل به دست آمده از آزمایش برش مستقیم، برای خاک‌های پیرامونی CL و CH و نمونه‌های مرکب متشکل از خاک‌های مذکور و ستون‌های سنگی، همچنین، میزان تغییرات این پارامترها در نمونه‌های مرکب، نسبت به مقدار مربوطه در خاک پیرامونی، در جدول ۳ ارائه گردیده است. این مقادیر بیانگر عملکرد کلی توده خاک مسلح شده است و می‌تواند معیاری برای برآورد ظرفیت باربری پی متکی بر این خاک ارائه نماید. در نهایت بر اساس مقادیر معادل به دست آمده ظرفیت باربری معادل پی متکی بر بستر محاسبه شده و به منظور ارزیابی عملکرد روش بهسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

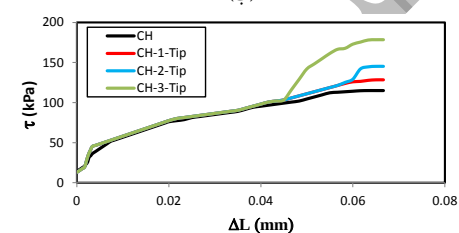
در شکل ۴ تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی معادل بستر مسلح نشده و مسلح شده با گروه ستون سنگی و بارگذاری



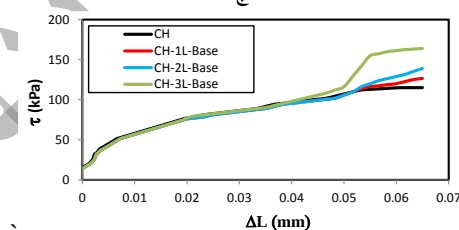
(الف)



(ب)



(ج)



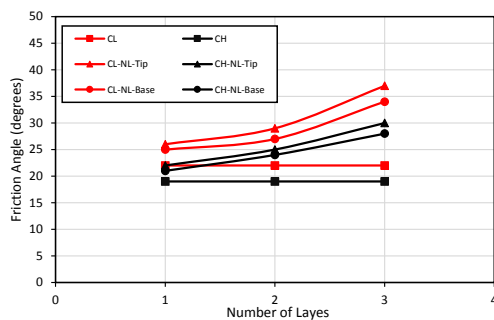
(د)

شکل ۳. تغییرات تنش برشی - جابجایی افقی تحت تنش نرمال ۲۰۰ کیلوپاسکال برای نمونه‌های (الف) غیر مسلح و مسلح شده خاک CL با گروه ستون سنگی آماده شده در ۱ تا ۳ لایه و بارگذاری در راستای چینش از راس و (ب) قاعده و نمونه‌های (ج) غیر مسلح و مسلح شده خاک CH با گروه ستون سنگی آماده شده در ۱ تا ۳ لایه و بارگذاری در راستای چینش از راس و (د) قاعده

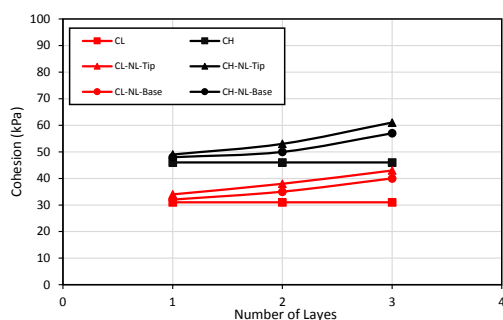
۲-۶- بررسی رفتار تنش برشی - جابجایی

نتایج نشان می‌دهد افزایش تنش نرمال از ۵۰ به ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال سبب افزایش تنش برشی می‌گردد که قابل انتظار است. به عنوان نمونه نمودارهای تنش برشی - جابجایی افقی، برای نمونه‌های حاوی خاک‌های CL و CH مسلح شده با ستون سنگی و غیر مسلح در دو حالت بارگذاری در راستای چینش از رأس و قاعده، با تنش نرمال ۲۰۰ کیلوپاسکال در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌گردد، صرف‌نظر از مقدار تنش نرمال اعمال شده و تعداد لایه‌های ساخت ستون سنگی و محل بارگذاری آنها در چیدمان مثلی، بهسازی خاک

برشی بالایی می‌باشد. افزایش چسبندگی معادل نمونه‌های مرکب نسبت به خاک پیرامونی را می‌توان به تراکم، انسجام و مقاومت برشی بالای توده‌ی ترکیبی تشکیل شده نسبت داد. یکی از دلایل افزایش مقاومت برشی در چیدمان مثلثی، افزایش فشار محصورکنندگی اعمال شده توسط ستون‌های سنگی به خاک بین این ستون‌ها است که مطالعات گذشته نیز نتایج مشابهی مشاهده شده است [۱۳].



(الف)



(ب)

شکل ۴. تغییرات (الف) زاویه‌ی اصطکاک داخلی و (ب) چسبندگی معادل بستر مسلح نشده و مسلح شده با گروه ستون سنگی و بارگذاری در راستای چینش از راس و قاعده بر حسب تعداد لایه‌های آماده سازی ستون‌های سنگی

۳-۶- بررسی ظرفیت باربری پی متکی بر بستر

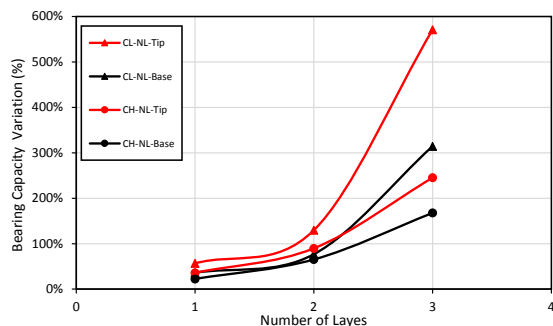
در شکل ۵ تغییرات ظرفیت‌های باربری محاسبه شده بر اساس مقادیر چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی معادل بدست آمده از آزمایش برش مستقیم نمونه‌های مسلح نشده و مسلح شده با گروه ستون سنگی با بارگذاری در راستای چینش از راس و قاعده بر حسب تعداد لایه‌های آماده سازی ستون‌ها نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد، صرف‌نظر از تعداد لایه‌های ساخت و بارگذاری در هر راستای چینش از ستون سنگی، بهسازی خاک با گروه ستون سنگی، موجب افزایش ظرفیت باربری نسبت به خاک مسلح نشده شده است. از سوی دیگر، بازای هر

در راستای چینش از راس و قاعده بر حسب تعداد لایه‌های آماده سازی ستون‌های سنگی، نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد، بازای تعداد لایه‌ی ثابت ساخت ستون سنگی و بارگذاری در راستای چینش یکسان (راستای راس و قاعده)، در هر دو دسته‌ی نمونه‌های مسلح شده شامل خاک پیرامونی CL و CH، مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی معادل نسبت به مقادیر آن در نمونه‌های مسلح نشده افزایش یافته است. این افزایش با بیشتر شده تعداد لایه‌های آماده سازی ستون‌های سنگی بیشتر می‌شود. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد در حالت بارگذاری در راستای چینش از راس، مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی معادل بزرگتری نسبت به حالت بارگذاری در راستای چینش از قاعده به ازای تعداد هر تعداد لایه آماده سازی و یا هر نوع خاک پیرامونی (که در این مطالعه بررسی شده است) حاصل می‌گردد.

علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد، با بهسازی خاک با استفاده از گروه ستون سنگی، میزان افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی معادل در نمونه‌های با خاک پیرامونی CL بیشتر از نمونه‌های با خاک پیرامونی CH بوده است. بیشترین میزان افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی معادل نمونه‌های بهسازی شده حاوی خاک‌های پیرامونی CL و CH، نسبت به مقدار متناظر آن در نمونه‌های بهسازی نشده، به ترتیب، ۶۸٫۲ درصد و ۵۷٫۹ درصد و بیشترین میزان افزایش چسبندگی داخلی معادل نمونه‌های بهسازی شده حاوی خاک‌های پیرامونی CL و CH، نسبت به مقدار متناظر آن در نمونه‌های بهسازی نشده، به ترتیب، ۳۸٫۷۱ درصد و ۳۲٫۶۱ درصد بوده است. این موضوع بیانگر کارایی بیشتر ستون سنگی در خاک‌هایی با سختی بستر می‌باشد که می‌توانند محصورشدگی بیشتری را برای هر ستون تأمین نمایند.

به طور کلی، تکنیک بهسازی خاک به واسطه‌ی ستون سنگی، شامل حذف بخشی از خاک سست پیرامونی و جایگزین نمودن آن با ستون‌های ماسه‌ای متراکم می‌باشد. در این مطالعه، ستون‌ها ساخته شده به طور کامل در لایه‌ی خاک سست نفوذ کرده‌اند و بر کف سخت جعبه دستگاه آزمایش برش متکی شده است. وجود این ستون‌های سخت، منجر به ایجاد توده‌ی خاک ترکیبی، شامل خاک سست و جسم سخت ستون می‌شود که در مقایسه با خاک سست بهسازی نشده، دارای سختی، تراکم و مقاومت

بیشتری در محصور نمودن دانه‌های دارد و در نتیجه می‌تواند فشار همه‌جانبه بیشتری در مصالح دانه‌ای به‌ازای هر مقدار تنش سربار یکسان (در این مطالعه تنش نرمال آزمایش برش مستقیم) ایجاد نماید.



شکل ۵. تغییرات ظرفیت‌های باربری محاسبه شده بر اساس مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی معادل بدست آمده از آزمایش برش مستقیم نمونه‌های مسلح نشده و مسلح شده با گروه ستون سنگی و بارگذاری در راستای چینش از راس و قاعده بر حسب تعداد لایه‌های آماده سازی ستون‌های سنگی

علاوه بر این لازم به ذکر است که بر اساس مطالعات قبلی انجام شده [۸]، در ساخت ستون سنگی، به طور معمول، ۱۵ تا ۳۵ درصد از حجم خاک ضعیف با مصالح ستون سنگی جایگزین می‌شود. لذا، با رعایت محدوده‌ی درصد بهینه‌ی اشغال حجم ستون‌های سنگی در خاک‌های نرم رسی، ستون‌های سنگی موجب بهبود ظرفیت باربری خاک نرم می‌شوند که در مورد ستون‌های سنگی نصب شده در خاک سست پیرامونی در این تحقیق، درصد اشغال حجم ستون‌های سنگی در جعبه‌ی برش، معادل ۲۹/۹۲ درصد بوده که در محدوده‌ی درصد بهینه‌ی اشغال مذکور قرار دارد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر بهسازی دو نوع خاک رسی با استفاده از گروه ستون سنگی بررسی گردید. به این منظور از دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس استفاده شد. به‌طورکلی تأثیر عواملی مانند، نوع خاک پیرامونی ستون سنگی، تعداد لایه‌های خاک جهت

تعداد لایه‌ی ساخت ثابت و بارگذاری در هر راستای چینش از ستون‌ها، میزان افزایش ظرفیت باربری در تمام نمونه‌های مرکب با خاک پیرامونی CL در مقایسه با میزان افزایش ظرفیت باربری در تمام نمونه‌های مرکب با خاک پیرامونی CH بیشتر بوده است. بیشترین میزان افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های مرکب متشکل از خاک‌های پیرامونی CL و CH و ستون‌های سنگی، نسبت به مقدار متناظر آن در خاک پیرامونی به ترتیب ۵۷۱ درصد و ۲۴۵ بوده است. که بیانگر عملکرد بهتر خاک CL در تامین محصور شدگی ستون‌های سنگی می‌باشد. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد آماده سازی ستون‌های سنگی در تعداد لایه‌های بیشتر به سبب ایجاد یکنواختی در تراکم خاک هر ستون، موجب افزایش ظرفیت باربری معادل کل شده است. به طور کلی، افزایش ظرفیت باربری در بهسازی خاک سست با ستون سنگی، ناشی از عوامل زیر است:

- ۱) ویژگی‌های اصطکاکی مصالح ستون سنگی
- ۲) چسبندگی و ویژگی‌های اصطکاکی بین خاک پیرامونی و ستون سنگی
- ۳) فشردگی و چگالش خاک سست پیرامونی، در اثر نصب ستون سنگی
- ۴) تغییر خصوصیات خاک پیرامونی و تنش‌های موجود در توده‌ی خاک، به واسطه‌ی قرارگیری مصالح سخت‌تر ستون سنگی در خاک رس پیرامونی
- ۵) نوع عملکرد ستون سنگی

بر اساس مطالعات گذشته، مقاومت خاک بهسازی شده با استفاده از ستون‌های سنگی، از اندرکنش بین خاک و ستون تأمین می‌شود که این اندرکنش، از فشار جانبی ایجاد شده در توده‌ی خاک اطراف نشئت گرفته و بر قسمت‌های جانبی ستون سنگی اعمال می‌شود [۳۱]. در این مطالعه، ظرفیت باربری نهایی در نمونه‌های مسلح شده با خاک پیرامونی CL، نسبت به ظرفیت باربری نهایی نمونه مسلح شده مشابه با خاک پیرامونی CH بیشتر بوده است. دلیل این امر را می‌توان در عملکرد مصالح دانه‌ای ستون‌ها جستجو کرد. مقاومت برشی مصالح دانه‌ای ستون سنگی تحت تأثیر فشار همه‌جانبه ایجاد شده در آن قرارداد با افزایش فشار همه‌جانبه و تنش نرمال در مصالح دانه‌ای قفل و بست دانه‌ها بیشتر شده و مقاومت برشی کل افزایش می‌یابد. در صورتی‌که خاک پیرامونی تراکم بیشتری داشته باشد توانایی

آماده‌سازی ستون‌ها و راستای بارگذاری نسبت به جهت چینش گروه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد؛

استفاده از روش بهسازی گروه ستون سنگی می‌تواند باربری خاک‌های رسی را به طور قابل‌توجهی افزایش دهد. کارایی این روش در خاک‌های CL بیشتر از خاک‌های CH است. این موضوع می‌تواند ناشی سختی بیشتر خاک CL و در نتیجه ایجاد محصورکنندگی بیشتر برای ستون شنی باشد که به کمک غلاف محصور نشده است. علاوه بر این نتایج نشان داده نحوه اجرای ستون سنگی و یکنواختی تراکم ماسه درون آن می‌تواند تأثیر معنی‌داری بر کارایی این روش بهسازی داشته باشد. در فرایند اجرای ستون سنگی هر چقدر تعداد لایه‌های که طی آن مصالح درون ستون ریخته و متراکم می‌گردد بیشتر باشد تراکم یکنواخت‌تری در مصالح ستون ایجاد می‌گردد و در نتیجه قفل و بست دانه‌های خاک درون ستون با یکدیگر بیشتر شده و مقاومت برشی مصالح افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آزمایش نشان داد، حداقل جابه‌جایی موردنیاز جهت بسیج نیروی پیسیو جهت کارایی بهسازی به روش ستون سنگی موردنیاز است، در خاک CL کمتر از خاک CH می‌باشد. همچنین این مقدار با افزایش تعداد لایه‌های اجرایی ستون سنگی و یکنواخت‌تر شدن تراکم درون ستون‌ها کاهش می‌یابد. این موضوع بیانگر اهمیت تراکم و فشار محصورشدگی در مصالح ستون سنگی می‌باشد که پیش‌تر به آن اشاره گردید. با افزایش تراکم و محصورشدگی مصالح دانه‌ای درون ستون‌ها، جابه‌جایی کمتری جهت قفل و بست دانه‌های مصالح و ایجاد نیروی مقاوم موردنیاز است. علاوه بر این مطالعه حاضر نشان داد در اجرای محدود گروه

ستون سنگی با آرایش مثلثی، راستای قرارگیری الگوی ستون‌ها نسبت به جهت بار می‌تواند بر ظرفیت باربری نهایی اثرگذار باشد. هرچند در صورت افزایش تعداد ستون‌های سنگی و گسترده‌تر شدن پلان به‌نحوی که راستای قاعده از راس قابل‌تفکیک نباشد، جهت بارگذاری نسبت به راستای چینش تأثیری محسوس نخواهد داشت.

در این تحقیق از سه نوع خاک مشخص، یک ابعاد مشخص ستون، یک ابعاد مشخص جعبه آزمایش و دستگاه آزمایش برش مستقیم استفاده شده است. نتایج بدست آمده محدود به مصالح روش آزمایش و ابعاد هندسی مورد بررسی است. نتایج بدست آمده در این مطالعه صرفاً در خصوص مقاومت برشی معتبر بوده و ممکن است قابل‌تعمیم به نشست و تحکیم خاک بهسازی شده نباشد. همچنین نتایج این مطالعه تفاوت راستای سطح گسیختگی نسبت به امتداد ستون‌های شنی در برش مستقیم نسبت به شرایط واقعی در زیر پی را در نظر نمی‌گیرد و مطالعه عملکرد روش بهسازی از نظر تغییرشکل و تحکیم ارزیابی نمی‌نماید. لکن نتایج این تحقیق می‌تواند مورد توجه محققین در زمینه‌های مطالعاتی مشابه با شرایط محیطی متفاوت مانند دانسته درصد رطوبت جنس مصالح و ابعاد مختلف قرارگیرد و به درک گسترده‌تر و عمیق‌تری از موضوع بهسازی خاک به روش ستون‌های سنگی و ماسه ای منتج گردد.

Modeling of Soft Soil Improvement using Compacted Lime Mortar Columns," MCEJ , vol. 14, no. 2, pp. 129–141, 2014.

[4] S. Ghafarpour Jahromi, S. Ghorban Beigi, and M. Yaghoubi, "Investigation of Failure Mechanism in Ground Improved with Group of Stone Columns," in Proc. 1st Nat. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering , Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran, 2014.

[5] M. Mokhtari and B. Kalantari, "Soft Soil Stabilization Using Stone Columns—A Review," Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE) , vol. 17, no. J, pp. 1459–1466, 2012.

۸- مراجع

[1] Management and Planning Organization of Iran, Guidelines for the Stabilization of Embankment and Pavement Layers (Publication No. 268) , 2003.

[2] S. Tabarsaz and A. Soroush, "Numerical Analysis of Ground Reinforced with a Stone Column Group," Modares Civil Engineering Journal (MCEJ) , vol. 10, no. 2, pp. 27–37, 2010.

[3] M. R. Malekpoor and Gh. R. Poorebrahimi, "Experimental and Numerical

- [14] A. Hamzhi, H. Mohamad, and M. F. Bin Yusof, "The Effect of Stone Column Geometry on Soft Soil Bearing Capacity," *Int. J. Geotechnical Engineering*, vol. 16, no. 2, pp. 200–210, 2019. doi: 10.1080/19386362.2019.1666557.
- [15] M. J. M. Al-Waily, M. Y. Fattah, and M. S. Al-Qaisi, "Experimental and Statistical Study on Single and Groups of Stone Columns," *Key Engineering Materials*, vol. 857, pp. 399–408, 2020. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.857.399.
- [16] N. Hataf, N. Nabipour, and A. Sadr, "Experimental and Numerical Study on the Bearing Capacity of Encased Stone Columns," *Int. J. Geo-Engineering*, vol. 11, no. 1, 2020. doi: 10.1186/s40703-020-00111-6.
- [17] J. Nazariafshar, M. Aslani, and N. Mehrannia, "Experimental Study on Equivalent Shear Strength of Cohesive Soils Improved with Stone Columns by Triaxial Testing," *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, vol. 52, no. 9, pp. 2191–2210, 2020. [Online]. Available: <https://sid.ir/paper/1036857/en>
- [18] A. Haddad and M. Shahverdi, "Experimental Study of the Performance of Floating Stone Columns Filled with Recycled Materials," *Sharif J. Civil Eng.*, vol. 36.2, no. 3.1, pp. 131–139, 2020. doi: 10.24200/j30.2019.51702.2429.
- [19] F. Xu, H. Moayedi, L. K. Foong, M. Jamali Moghadam, and M. Zangeneh, "Laboratory and Numerical Analysis of Geogrid Encased Stone Columns," *Measurement*, vol. 169, 2021. doi: 10.1016/j.measurement.2020.108369.
- [20] S. Saxena and L. B. Roy, "The Effect of Geometric Parameters on the Strength of Stone Columns," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 12, no. 4, pp. 9028–9033, 2022. doi: 10.48084/etasr.5138.
- [21] M. Kazemzadeh, A. Zad, and M. Yazdi, "Numerical Modeling of Improvement of Soft Soil with Stone Columns under High-Speed Train Crossing," *Civil Infrastructure Researches*, vol. 7, no. 2, pp. 157–168, 2022. doi: 10.22091/cer.2021.7397.1304.
- [6] S. Ghaffarpour Jahromi, S. Gharbanbeygi, and M. Yaghoubi, "Evaluation of Distinct Factor Affecting the Bearing Capacity in Ground Improvement with Stone Column Group," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 137–150, 2019. doi: 10.22067/civil.v32i1.61713.
- [7] R. Aza-Gnandji and D. Kalumba, "Experimental and Numerical Analyses of the Behavior of Rammed Stone Columns Installed in a South African Soft Soil," *Int. J. Eng. Sci. Innov. Technol.*, vol. 3, no. 6, pp. 477–499, 2014.
- [8] A. Fouladi, "The Effect of Stone Columns on Bearing Capacity of Soil," M.Sc. thesis, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran, 2013.
- [9] M. Mokhtari, "Numerical Analysis of the Effect of Stone Column Groups on Bearing Capacity of Clay Soils in Hormozgan Province," M.Sc. thesis, University of Hormozgan, Iran, 2014.
- [10] D. Moradi Kholaki, "Determining the Effect of Diameter and Arrangement of Stone Columns on Mechanical Parameters of Clay Reinforced with Stone Column Groups," M.Sc. thesis, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, 2016.
- [11] H. Kardgar, "Investigation of the Bearing Capacity of Foundations on Encased Stone Columns Using Finite Element Method," *Int. J. Integrated Eng.*, vol. 10, no. 1, 2018. [Online]. Available: <https://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie/article/view/1970>
- [12] A. Hanna, M. Khalifa, and M. Abdel Rahman, "Experimental Investigation on Stone Columns in Cohesive Soil," in *Proc. 2nd GeoMEast Int. Congress and Exhibition on Sustainable Civil Infrastructures*, Egypt, 2018.
- [13] M. Aslani, J. Nazariafshar, and N. Ganjian, "Experimental Investigation of Equivalent Shear Strength of Loose Sand Reinforced with Stone Column," *Journal of Engineering Geology*, vol. 13, no. 3, pp. 1–5, 2019. doi: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365.

[32] Ministry of Roads and Urban Development, National Building Code of Iran, Part 7: Foundation , Iran Development Publisher, Tehran, 2013.

[33] S. F. Kwa, E. S. Kolosov, and M. Y. Fattah, "Ground Improvement Using Stone Column Construction Encased with Geogrid," Construction of Unique Buildings and Structures , no. 3(66), pp. 49–59, 2018. doi: 10.18720/CUBS.66.5.

[34] A. Shakibi Nezhad, S. Gholipour, and M. Makarchian, "Investigation of Shear Behavior of Stone Columns in Sandy Bed," Ferdowsi Civil Engineering , 2024. doi: 10.22067/jfcei.2024.90055.1323.

[35] M. Hajiazizi and M. Nasiri, "Experimental and Numerical Investigation on Stability of Reinforced Sandy Slope Using Reinforced Stone Column with Horizontally Laminated Geotextile Disks," Ferdowsi Civil Engineering , vol. 32, no. 1, pp. 55–72, 2019. doi: 10.22067/civil.v32i1.62412.

[36] N. Pishvaei, M. Jiryaee Sharahi, and M. Amelsakhi, "Laboratory Investigation on Stabilization of Clay with Calcium Lignosulfonate and Polyethylene Fibers under Wetting and Drying Cycles," Ferdowsi Civil Engineering , vol. 36, no. 1, pp. 85–96, 2023. doi: 10.22067/jfcei.2023.74674.1112.

[37] A. Negahdar, S. Yadegari, and S. Houshmandi, "Investigation of Creep Behavior of the Clay Soil in the Laboratory Condition," Ferdowsi Civil Engineering , vol. 28, no. 1, pp. 1–12, 2016. doi: 10.22067/civil.v28i1.34947.

[38] K. Mehrshahi and H. Alielahi, "Estimating the Geotechnical Design Parameters of Improved Soil by Preloading Method Using Instrumentation Results and Numerical Approach – A Case Study," Ferdowsi Civil Engineering , vol. 30, no. 1, pp. 13–30, 2018. doi: 10.22067/civil.v1i30.52137.

[39] N. Mehrannia, J. Nazariafshar, and F. Kalantary, "Experimental Investigation on the Effect of Geometry and Reinforced Floating Stone Columns on Bearing Capacity," Ferdowsi Civil Engineering , vol. 31, no. 2, pp. 74–88, 2018. doi: 10.22067/civil.v31i2.57449.

[22] N. Bazazzadegan, N. Ganjian, and J. Nazariafshar, "Effect of Soft Lens on the Behavior of Ordinary and Reinforced Stone Columns Located in Saturated Sandy Bed," Amirkabir J. Civil Eng. , vol. 55, no. 2, pp. 11–11, 2023. doi: 10.22060/ceej.2023.21390.7711.

[23] S. Amirafshari and A. Ghanbari, "A Geotechnical Centrifuge Study on the Bearing Capacity of Ring Foundations Reinforced by Stone Columns," Int. J. Geomechanics , vol. 25, no. 1, 2025. doi: 10.1061/IJGNALGMENG-994.

[24] G. Fan, M. Nasiri, and E. Amiri, "Stabilized Slope Using Stone Columns Reinforced with Geotextile Encasement and Laminated Coatings: A Case Study," Natural Hazards Review , vol. 26, no. 2, 2025. doi: 10.1061/NHREFO.NHENG-2143.

[25] ASTM-D3080, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions , ASTM Int., West Conshohocken, PA, 2004.

[26] ASTM-D422, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils , ASTM Int., West Conshohocken, PA, 2007.

[27] ASTM-D4318, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils , ASTM Int., West Conshohocken, PA, 2010.

[28] ASTM-D2216, Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass , ASTM Int., West Conshohocken, PA, 2010.

[29] ASTM-D854, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer , ASTM Int., West Conshohocken, PA, 2014.

[30] ASTM-D698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort , ASTM Int., West Conshohocken, PA, 2012.

[31] ASTM-D2487, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) , ASTM Int., West Conshohocken, PA, 2010.

[40] J. Bolouri-Bazaz, A. Mollahasani, and S. M. Hosseini, "A Comparative Study on Determination Soil Deformation Modulus Using In-Situ and Laboratory Plate Load Tests," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 22, no. 1, pp. 45–62, 2011. doi: 10.22067/civil.v22i1.9033.

نسخه
پیش
انتشار

Large-scale direct shear apparatus	:	دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس
Fast method	:	روش سریع
CL and CH soils	:	CH و CL خاک‌های
SM soil	:	SM خاک ماسه‌ای از طبقه‌ی
UU test method	:	UU روش
Unified Soil Classification System	:	سیستم طبقه‌بندی متحد
Liquid Limit (LL)	:	حد روانی LL
Plastic Limit (PL)	:	حد خمیری PL
Plasticity Index (PI)	:	شاخص خمیری PI
Moisture content (ω)	:	درصد رطوبت نمونه سازی ω
Specific gravity (Gs)	:	چگالی ویژه Gs
Maximum dry unit weight (γ_{dmax})	:	وزن مخصوص خشک حداکثر γ_{dmax}
Optimum moisture content (ω_{opt})	:	درصد رطوبت بهینه ω_{opt}
Normal stress	:	تنش نرمال
Shear stress	:	تنش برشی
Cohesion	:	چسبندگی
Internal friction angle	:	زاویه اصطکاک داخلی
Ultimate bearing capacity (q_u)	:	ظرفیت باربری نهایی
Bearing capacity factors	:	ضرایب ظرفیت باربری

Laboratory Investigation of the Equivalent Bearing Capacity of Clay Bed Improved with Stone Columns

Abstract

Over the past few decades, construction on loose and problematic soils has posed significant challenges for geotechnical engineers. Among the methods to improve these soils, stone columns are notable, involving the replacement of weak soil portions with granular columns. This research investigates the enhancement of loose clay beds of classes CL and CH using sand columns.

Unreinforced soil samples and those improved with a group of seven stone columns (30 mm diameter, arranged in a triangular pattern) were tested using a large-scale direct shear apparatus. Equivalent shear strength parameters were determined, and bearing capacity values were calculated. The shear tests employed the Fast method.

The effects of variables such as the type of surrounding soil, the number of layers in stone column construction, and the orientation of the limited stone columns (apex/base in triangular arrangement) on shear strength parameters and bearing capacity were evaluated. Results indicated that improving clay soils with stone columns significantly increased the bearing capacity of loose soils. The experimental findings showed that the execution method of stone columns greatly influences their load-bearing capacity. Moreover, improving CL clay soil with stone columns enhanced the bearing capacity more effectively than CH clay soil, indicating higher efficiency of this method in stiffer clay soils.

Keywords: Clayey bed; Sand column; Large-scale direct shear Test; Shear strength parameters; Bearing capacity.