[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

مطالعهٔ آزمایشگاهی مقاومت برشی معادل ماسه سست مسلح شده با ستون سنگی

مجید اصلانی؛
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم وتحقیقات، گروه مهندسی عمران
جواد نظری افشار*؛
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهرقدس، گروه مهندسی عمران
نوید گنجیان؛
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم وتحقیقات، گروه مهندسی عمران

تاریخ: دریافت ۹۷/۰٤/۰۳ پذیرش ۹۷/۰٦/۱۱

چکیده

ستون سنگی یکی از روش‌های متداول بهینه‌سازی زمین است. در بارهٔ رفتار ستون‌های سنگی تحت بارهای قائم تحقیقات متعددی انجام شده است لیکن بررسی‌های محدودی در بارهٔ مقاومت برشی خاک‌های مسلح شده با ستون سنگی انجام شده است که اغلب پژوهش‌های انجام شده به‌صورت تحلیلی یا عددی است. در این مقاله به بحث و بررسی آزمایش‌های انجام شده در خصوص مقاومت برشی ستون‌های سنگی در بستر ماسه‌ای سست مسلح شده با ستون سنگی پرداختیم. آزمایش‌ها در دستگاه برش مستقیم با جعبهبرش به ابعاد ۳۰۵×۳۰۵ و عمق ۱۵۲/٤ میلی‌متر در سه تنش قائم شامل ۵۵ و ۷۵ و ۱۰۰ کیلو پاسکال و چهار نسبت ناحیهٔ اصلاح شده برابر با ۸/٤ و ۱۲ و ۱٦/٤ و ۲۵ درصد و سه نوع آرایش قرارگیری ستون سنگی (آرایش منفرد مربعی، مثلثی) بررسی شده است. نتایج بیان‌گر بهبود رفتار و سختی ترکیب خاک-ستون سنگی و افزایش مقاومت برشی بستر ماسه‌ای در حضور ستون سنگی می‌باشد. نتایج حاصل بیان‌گر تأثیر آرایش قرارگیری ستون‌های سنگی در افزایش مقاومت برشی است. بیش‌ترین افزایش مقاومت برشی و افزایش سختی مربوط به آرایش مربع و کم‌ترین آن مربوط به آرایش منفرد است. در ادامهٔ مقاله به بررسی و مقایسه

*نویسنده مسئول j.nazariafshar@qodsiau.ac.ir

مقاومت برشی معادل و پارامترهای مقاومت برشی معادل به‌دست‌آمده از نتایج آزمایش و روابط تحلیلی پرداخته شده است. نتایج بیان‌گر آن است که مقاومت برشی و پارامترهای مقاومت برشی معادل حاصل از نتایج آزمایش‌ها بیش‌تر از مقادیر حاصل از روابط تحلیلی است. بدین‌منظور یک ضریب اصلاحی به‌منظور ارتباط بین نتایج حاصل از آزمایش‌ها و روابط تحلیلی ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: ستون سنگی، مقاومت برشی معادل، ماسه سست، برش مستقیم.

مقدمه

با افزایش جمعیت و توسعهٔ صنایع مشکل کمبود زمین مناسب برای احداث سازه‌های مورد نیاز موجب شده است تا انسان به استفاده از زمین‌های با کیفیت مهندسی پایین‌تر روی آورد. برای احداث یک سازه مناسب باید به‌نوعی کیفیت خاک نامناسب از لحاظ فراسنج‌های مهندسی ارتقا داده شود تا در اثر بارگزاری عملکرد مناسبی داشته باشد. در این بین استفاده از ستونی سنگی به‌عنوان جای‌گزینی مناسب برای به‌سازی خاک، قابلیت‌های خود را به اثبات رسانده است. این روش در ساخت راه‌ها و خاک‌ریزها، پی مخازن و سازه‌های سبک برای به‌سازی محدوده وسیعی از خاک‌های رسی کاربرد دارد [۱]، زمین‌های به‌سازی شده با ستون سنگی به‌صورت یک ترکیب با مقاومت و سختی بیش‌تر نسبت به خاک اولیه عمل می‌کند [۱]، [۲]، [۳]، [٤]، [٥]. هنگامی‌که ستون سنگی تحت بارگذاری قرار می‌گیرند نسبت سختی مؤثر بین ستون‌های سنگی و خاک به‌طور چشم‌گیری به فشار جانبی فراهم شده از سوی خاک پیرامونی بستگی دارد [٦]. ستون‌های سنگی عموماً برای تحمل بارهای قائم وارده به‌وسیلهٔ سازه‌های فوقانی طراحی می‌شوند. ولی در شرایط وجود زمین‌های چسبنده و غیرچسبنده سست امکان سیلان جانبی[1] [۷] در خاک وجود داشته و در نتیجه باعث راندگی جانبی[2] در ستون‌های سنگی می‌شود. به‌دلیل سیلان جانبی فشار همه جانبه وارده به‌وسیلهٔ خاک اطراف به ستون سنگی کاهش یافته و باعث شکم‌دادگی ستون سنگی در اعماق سطحی و درنتیجه نشست سازه‌های فوقانی می‌شود [۸]، [۹]. این سیلان جانبی باعث می‌شود که ستون‌های سنگی تحت حرکت جانبی توده خاک و در نتیجه تحت تنش‌های برشی قرار

1. Lateral flow
2. Lateral thrust

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

بگیرند. تحقیقات زیادی روی ظرفیت باربری قائم ستون‌های سنگی چه در حالت عددی [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]، [۱٤]، [۱۵]، [۱٦]، [۱۷]، [۱۸]، [۱۹] و چه در حالت آزمایشگاهی [۱۹] انجام شده است. نتایج حاکی از آن است که مهم‌ترین عامل در افزایش ظرفیت باربری ستون‌های سنگی نسبت ناحیهٔ اصلاح شده، نوع خاک اطراف ستون سنگی، زاویهٔ اصطکاک مصالح ستون سنگی و طول ستون‌های سنگی است ولی تاکنون بررسی‌های زیادی در بارهٔ بررسی مقاومت برشی زمین‌های به‌سازی با ستون سنگی انجام نشده است.

راجاکوپال و همکاران (۲۰۰۸) [۲۵] تعدادی آزمایش در حالت کرنش مسطح به‌منظور بررسی رفتار ستون‌های سنگی مسلح و غیرمسلح تحت بارگذاری برشی انجام دادند نتایج مؤید آن است که افزایش مقاومت برشی به‌دلیل وجود ستون‌های سنگی غیرمسلح و مسلح در خاک دیده می‌شود. تعدادی آزمایش صحرایی به‌وسیلهٔ اسناید و همکاران (۲۰۱٤) [۲٦] روی ستون‌های سنگی مسلح انجام شد، نتایج مؤید آن بود که به‌دلیل وجود پوشش ژئوسنتتیک فشار افقی خاک در پی‌های مجاور به‌صورت چشم‌گیری کاهش می‌یابد. چن و همکاران (۲۰۱۵) [۱۱] مدل‌سازی ۳ بعدی از یک توده خاک‌ریز قرار گرفته بر زمین به‌سازی شده با ستون سنگی مسلح انجام داد و نتیجه گرفت که ستون سنگی مسلح به‌جای برش در خمش گسیخته می‌شوند.

موهاپاترا و همکاران (۲۰۱٦) [۲۷] تعدادی آزمایش در حالت کرنش مسطح در دستگاه برش مستقیم، به‌منظور بررسی رفتار ستون‌های سنگی مسلح و غیرمسلح تحت بارگذاری برشی انجام دادند و نتایج حاصل نشان داد که استفاده از ستون‌های سنگی مسلح و غیرمسلح باعث افزایش مقاومت برشی در خاک به‌سازی شده با ستون سنگی می‌شود. در ستون سنگی غیرمسلح با افزایش نسبت جای‌گزینی مقاومت برشی افزایش و این افزایش مقاومت در حالت آرایش‌های گروه ستون سنگی نسبت به آرایش منفرد بیش‌تر است.

با توجه به بررسی‌های انجام‌گرفته مشخص است که بیش‌ترین بررسی در خصوص مقاومت برشی زمین‌های به‌سازی با ستون سنگی به‌صورت تحلیل‌های عددی بوده است و بررسی‌های آزمایشگاهی انجام‌گرفته به‌صورت محدود و در نسبت‌های ناحیهٔ اصلاح شده پایین صورت گرفته است و خلأ تحقیقاتی به‌صورت آزمایشگاهی در این زمینه احساس

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

می‌شود. از این‌رو، در این مقاله در ابتدا به بررسی مقاومت برشی ستون سنگی غیرمسلح (OSC[1]) در آرایش‌ها و نسبت‌های ناحیه اصلاح شده مختلف در دستگاه برش مستقیم پرداخته شده است. به‌منظور بررسی تأثیر آرایش و چیدمان ستون‌های سنگی در مقاومت برشی به‌ازای نسبت ناحیهٔ اصلاح شده یک‌سان، آزمایش‌ها در سه آرایش ستون سنگی منفرد و مربع و مثلث با در نظر گرفتن چهار درصد نسبت ناحیه اصلاح شده انجام شده است. در ادامه به بررسی اختلاف بین مقاومت برشی و پارامترهای مقاومت برشی حاصل از نتایج آزمایش و روابط تحلیلی پرداختیم و ضرایب بهینه برای ارتباط بین نتایج آزمایش و روابط تحلیلی ارائه شد. ازآن‌جاکه این روابط پایه طراحی و محاسبه ظرفیت باربری ستون سنگی است، با اصلاح این روابط می‌توان پیش‌بینی مناسب‌تری از مقاومت ستون‌های سنگی در حالت واقعی به‌دست آورد.

مشخصات مصالح استفاده شده برای ساخت بستر سست و ستون سنگی

برای ساخت بستر سست ماسه‌ای از مصالح ماسه ریزدانه با قطر بین ۰/٤۲۵ میلی‌متر تا ۱/۱۸ میلی‌متر و از مصالح سنگی با قطر بین ۲ تا ۸ میلی‌متر به‌عنوان مصالح ستون سنگی، استفاده شد. منحنی دانه‌بندی مصالح استفاده شده در بستر و ستون سنگی در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به تراکم نسبی ۳۲/۵ درصد ماسه خاک بستر در دسته خاک‌های سست و مصالح ستون سنگی استفاده شده با تراکم ۸۰ درصد در دسته خاک‌های متراکم طبقه‌بندی می‌شوند [۲۸].

از دلایل استفاده از مصالح ماسه برای خاک بستر می‌توان به سهولت قرارگیری، سهولت در دست‌یابی به انسجام بین آزمایش‌ها و اطمینان از تکرارپذیری رفتار مقاومتی مصالح در همهٔ آزمایش‌ها نام برد. همان‌گونه که بیان شد ستون‌های سنگی شرایط زهکشی را برای خاک اطراف ستون سنگی فراهم می‌سازد. با توجه به نوع مصالح ماسه و شرایط خشک محیط، امکان ایجاد شرایط تحکیم یافته- زهکشی شده (CD) فراهم است. برای به‌دست آوردن پارامترهای مکانیکی مصالح بستر و ستون سنگی آزمایش‌های استاندارد لازم انجام شده و نتایج آزمایش‌های مربوط به مصالح بستر و ستون سنگی به‌ترتیب در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است. با توجه به این‌که ستون‌های سنگی بررسی شده در این پژوهش دارای قطر کم‌تری

1. Ordinary Stone Column

نسبت به موارد اجرایی واقعی در محل است، بنابراین باید ابعاد دانه‌های استفاده شده در ستون سنگی با یک مقیاس مناسب برای شبیه‌سازی رفتار ستون‌های سنگی، کاهش یابد. بدین‌منظور، موارد زیر در انتخاب قطر مصالح مصرفی مورد توجه قرار داده شد.

۱. قطر ستون سنگی (D) استفاده شده در خاک‌های رسی متوسط برابر ۰/٦ متر و در خاک‌های رسی نرم برابر ۱/۱۰ متر است [۲۹] و قطر مصالح سنگی(K) استفاده شده در ستون‌های سنگی با دانه‌بندی خوب و قطر بین ۲ تا ۷۵ میلی‌متر است. بنابراین نسبت قطر ستون سنگی به قطر مصالح (D/K) بین ۸ تا ۵۵۰ قرار می‌گیرد [۱٤]، [۳۰].
۲. تحقیقات فاکس (۲۰۱۱) [۳۱] و استوبر (۲۰۱۲) [۳۲] نشان می‌دهد حداکثر نسبت قطر مصالح سنگی به قطر ستون سنگی برابر ۱۰ باشد.
۳. طبق استاندارد ASTM-D-4767 برای نمونه‌های آزمایش سه‌محوری، حداکثر نسبت قطر مصالح سنگی به قطر نمونه آزمایش برابر ۱/٦ است.
٤. نایاک (۱۹۸۳) [۳۳] و فتاح و همکاران (۲۰۱۰) [۳٤] نسبت قطر مصالح به قطر ستون سنگی را بین۱/٦ تا ۱/۷ بیان کردند.
۵. در استاندارد ASTM-D-3080 [۳۵] حداقل و حداکثر قطر مصالح سنگی که می‌توان در دستگاه برش مستقیم تحت آزمایش قرارداد بیان شده است. بر این اساس حداکثر قطر دانه‌های مصرفی باید حداکثر برابر حدایل یک‌دهم ابعاد طولی دستگاه و یک ششم ارتفاع داخلی قالب باشد.

با توجه موارد مذکور، قطر مصالح سنگی انتخاب شده در محدودهٔ ۲ تا ۸ میلی‌متر مورد تأئید است.

منحنی دانه‌بندی مصالحی که به‌عنوان پرکننده در حین تراکم استفاده می‌شوند عامل مهمی در کنترل سرعت تراکم است. براون (۱۹۷۷) [۳٦] کمیتی به‌نام عدد تناسب (SN[1]) برای مصالح پرکننده به‌صورت رابطه ۱ پیشنهاد کرد. هر چقدر مقدار این کمیت کوچک‌تر باشد، مصالح پرکننده از نظر اجرایی مناسب‌ترند. عدد تناسب بین محدوده ۰ تا ۱۰ در محدودهٔ عالی قرار دارد. مقدار عدد تناسب برای مصالح شن و ماسه استفاده شده به‌ترتیب برابر ۱/۵ و ۷/۲۸ است.

$$SN = 1.7\sqrt{\frac{3}{{D_{50}}^2} + \frac{1}{{D_{20}}^2} + \frac{1}{{D_{10}}^2}} \qquad (۱)$$

1. Suitability number

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

انجام آزمایش‌ها

دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس LDST[1]

در پژوهش حاضر برای بررسی مقاومت برشی و پارامترهای مقاومت برشی معادل در بستر ماسه‌ای سست به‌سازی شده با ستون سنگی از دستگاه برش مستقیم بزرگ[2] (LDST) با جعبه برش به ابعاد ۳۰۵×۳۰۵ میلی‌متر در صفحه و عمق ۱۵۲/٤ میلی‌متر استفاده شده است. بررسی انجام‌شده به‌وسیلهٔ راجاکوپال و همکاران (۲۰۰۸) [۲۵] و موهاپاترا و همکاران (۲۰۱٦) [۲۷] در خصوص بررسی مقاومت برشی خاک‌های به‌سازی شده با ستون سنگی در دستگاه برش مستقیم بیان‌گر آن است که، با توجه به کوچک بودن ابعاد جعبه آزمایش نسبت به ابعاد واقعی ستون سنگی به‌منظور نزدیک بودن جواب آزمایش‌ها با نتایج واقعی استفاده شده در محل، باید تنش‌های قائم استفاده شده در آزمایش‌های برش مستقیم بر اساس سطح تنش‌های قائم واقعی وارد روی ستون سنگی در محل، محاسبه و اعمال شود. با توجه با این موضوع ۳ تنش قائم مختلف برابر با ۵۵ و۷۵ و۱۰۰ کیلوپاسکال برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شد که این مقادیر بر اساس بارگذاری تودهٔ خاکریزی به ارتفاع ۲/۷۵ تا ۵ متر در شرایط واقعی محل انتخاب شده است. همهٔ آزمایش‌ها در شرایط خشک انجام شد.

جدول ۱. مشخصات مصالح ماسه ریزدانه (S) استفاده شده برای ساخت بستر

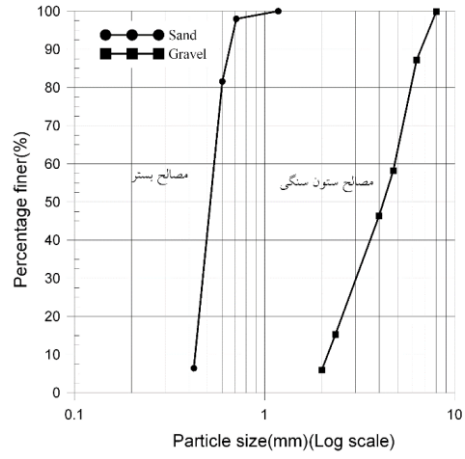
پارامتر	مقادیر
چگالی ویژه	۲/٦٦
وزن مخصوص خشک حداکثر (kN/m^3)	۱۷/۵
وزن مخصوص خشک حداقل (kN/m^3)	۱۵/٤
وزن مخصوص خشک در تراکم نسبی ۳۲/۵٪ (kN/m^3)	۱٦
زاویهٔ اصطکاک در حالت حداکثر و تراکم نسبی ۳۲/۵٪(درجه)	۳۳
زاویهٔ اصطکاک در جابه‌جایی ۳۰/۵ میلی‌متر و تراکم نسبی ۳۲/۵٪(درجه)	۳۰
ضریب یک‌نواختی	۱/۲۸
ضریب دانه‌بندی	۰/۹۳
طبقه‌بندی بر اساس سیستم متحد	SP
عدد تناسب	۷/۲۳

1. Large Direct Shear Test(305mm*305mm)
2. Large Direct Shear Test

جدول۲. مشخصات مصالح ستون سنگی (G) استفاده‌شده برای ستون سنگی

مقادیر	پارامتر
چگالی ویژه	۲/۷۰
وزن مخصوص خشک حداکثر (kN/m^3)	۱۷
وزن مخصوص خشک حداقل (kN/m^3)	۱٤/۷
وزن مخصوص خشک در تراکم نسبی ۸۰٪ (kN/m^3)	۱٦/٥
زاویه اصطکاک در حالت حداکثر و تراکم نسبی ۸۰٪(درجه)	٤٥
زاویه اصطکاک در جابه‌جایی ۳۰/۵ میلی‌متر و تراکم نسبی ۸۰٪(درجه)	۳٥
ضریب یکنواختی	۲/۱۸
ضریب دانه‌بندی	۰/۸٥
طبقه‌بندی بر اساس سیستم متحد	GP
عدد تناسب	۱/٥

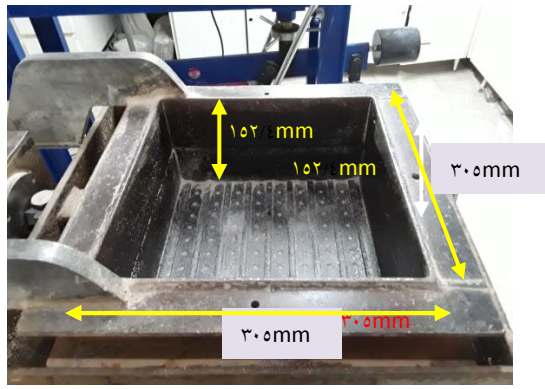
از آن‌جاکه ثابت ماندن نیروی عمودی روی جعبه در طول انجام آزمایش بسیار مهم است با استفاده از لودسل ثابت بودن بار قائم در طول آزمایش کنترل می‌شد و در صورت تغییر نیروی قائم، به‌وسیلهٔ جک مخصوص زیر دستگاه با بالا یا پایین بردن اهرم انتقال، مقدار نیروی قائم کاهش یا افزایش داده می‌شد (شکل ۳). تمام نمونه‌های آزمایش شده در نرخ جابه‌جایی افقی یک‌نواخت معادل ۱ میلی‌متر در دقیقه تحت برش قرار گرفتند.



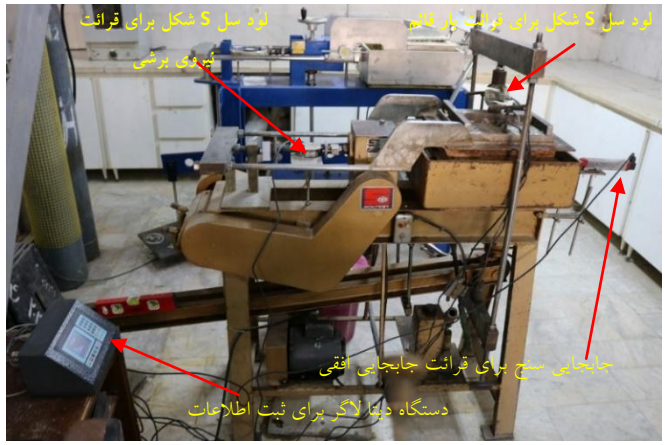
شکل۱. منحنی دانه‌بندی مصالح بستر(S) و ستون سنگی(G)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]



شکل ۲. مشخصات ابعادی دستگاه برش مستقیم



شکل ۳. دستگاه برش مستقیم و تجهیزات نصب‌شده بر روی آن

برنامه آزمایش‌ها

از اهداف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر نسبت ناحیهٔ اصلاح‌شده و آرایش ستون‌های سنگی بر مقاومت برشی و پارامترهای مقاومت برشی معادل در خاک‌های به‌سازی شده با ستون سنگی است. از این‌رو، با توجه به اهداف پژوهش، برنامه آزمایش‌ها مطابق جدول ۳ تهیه شد. آزمایش‌ها در چهار درصد نسبت ناحیهٔ اصلاح شده A_r[1] ۸/٤ و ۱۲ و ۱٦/٤ و ۲۵

1. Area Replacement Ratio

درصد برای ستون سنگی منفرد و نسبت‌های ۸/٤ و ۱۲ و ۱٦/٤ درصد برای آرایش‌های مربعی و مثلثی انجام شد. نسبت ناحیهٔ اصلاح‌شده، نسبت سطح ستون سنگی به سطح کل دستگاه است. آرایش و محل جای‌گذاری ستون‌های سنگی در شکل‌های ٤ الی ٦ ارائه شده است. در شکل ٤ آرایش ستون سنگی منفرد، در شکل ۵ آرایش مربع و در شکل ٦ آرایش مثلثی نشان داده شده است. در این پژوهش تعداد ۱۲ سری آزمایش انجام شده است. دراین آزمایش‌ها حرف اول نشان‌دهندهٔ مصالح خاک بستر و حرف دوم نشان‌دهندهٔ مصالح ستون سنگی و حرف سوم نشان‌دهندهٔ نحوهٔ آرایش ستون سنگی و عدد آخر نشان‌دهندهٔ نسبت ناحیهٔ اصلاح شده است. تعداد ٤ عدد آزمایش به‌منظور کنترل تکرارپذیری نتایج آزمایش‌ها انجام شد و نتایج حاصل بیان‌گر تطابق بسیار خوب بین آزمایش‌های انجام شده بود.

ستون‌های سنگی منفرد از لحاظ موقعیت قرارگیری در مرکز دستگاه و فاصله مرکز به مرکز ستون‌های سنگی در آرایش مربع و مثلث برابر 2D (D برابر قطر ستون سنگی است) در نظر گرفته شد. تحقیقات گذشته در خصوص تعیین فواصل بین ستون‌های سنگی نشان می‌دهد که نسبت $S/D \leq 2.5$ (S فاصله مرکز تا مرکز ستون سنگی) از نظر اجرایی قابل انجام نیست و $S/D \geq 5$ هیچ‌گونه تأثیری در کاهش میزان نشست ندارد [۳۷].

مطابق با استاندارد انجام آزمایش مقاومت برشی در دستگاه برش مستقیم ASTM-D-3080، گسیختگی برشی خاک در حداکثر تنش برشی یا در تنش برشی متناظر با ۱۰ درصد جابه‌جایی نسبی اتفاق می‌افتد. از این‌رو، ستون‌های سنگی برای دور بودن از اثرات مرزی حداقل باید به‌میزان ۳۰/۵ میلی‌متر از لبه‌های جعبه‌های دستگاه برش مستقیم فاصله داشته باشد. برای اطمینان از فاصلهٔ کافی، فاصله ستون سنگی با جدار دستگاه در جهت برش برابر ٤۲/۵ میلی‌متر انتخاب شد (شکل ۷). با توجه به این محدودیت امکان اجرای آزمایش‌ها در آرایش‌های مربع و مثلث در نسبت ناحیهٔ اصلاح‌شده ۲۵ درصد وجود نداشت و در نسبت ناحیهٔ اصلاح‌شده ۲۵ درصد فقط آزمایش در آرایش ستون سنگی منفرد انجام‌شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

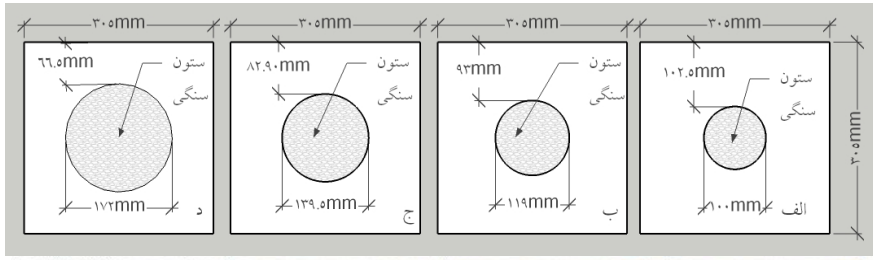
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

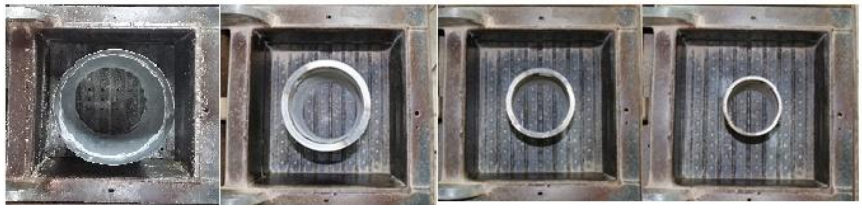
جدول ۳. لیست انجام آزمایش‌ها در دستگاه برش مستقیم

نام‌گذاری آزمایش	نسبت ناحیهٔ اصلاح‌شده (درصد)	مشخصه آزمایش	آرایش قرارگیری	تنش قائم (کیلو پاسکال)	شمارهٔ آزمایش
S	۰	S	بستر ماسه‌ای سست	۵۵	۱
				۷۵	۲
				۱۰۰	۳
S-G-C-۲۵٪	۲۵	C۲۵٪	بستر ماسه‌ای با ستون سنگی منفرد – قطر ۱۷۲ میلی‌متر	۵۵	٤
				۷۵	۵
				۱۰۰	٦
S-G-C-۱٦/٤٪	۱٦/٤	C۱٦/٤٪	بستر ماسه‌ای با ستون سنگی منفرد - قطر ۱۳۹/۵ میلی‌متر	۵۵	۷
				۷۵	۸
				۱۰۰	۹
S-G-C-٪۱۲	۱۲	C٪۱۲	بستر ماسه‌ای با ستون سنگی منفرد– قطر ۱۱۹ میلی‌متر	۵۵	۱۰
				۷۵	۱۱
				۱۰۰	۱۲
S-G-C-۸/٤٪	۸/٤	C۸/٤٪	بستر ماسه‌ای با ستون سنگی منفرد – قطر ۱۰۰ میلی‌متر	۵۵	۱۳
				۷۵	۱٤
				۱۰۰	۱۵
S-G-SQ-۱٦/٤٪	۱٦/٤	SQ۱٦/٤٪	بستر ماسه‌ای با ستون سنگی با آرایش مربعی- قطر ۷۰ میلی‌متر	۵۵	۱٦
				۷۵	۱۷
				۱۰۰	۱۸
S-G-SQ-٪۱۲	۱۲	SQ٪۱۲	بستر ماسه‌ای با ستون سنگی با آرایش مربعی- قطر ٦۰ میلی‌متر	۵۵	۱۹
				۷۵	۲۰
				۱۰۰	۲۱
S-G-SQ-۸/٤٪	۸/٤	SQ۸/٤٪	بستر ماسه‌ای با ستون سنگی با آرایش مربعی - قطر ۵۰ میلی‌متر	۵۵	۲۲
				۷۵	۲۳
				۱۰۰	۲٤
S-G-TR-۱٦/٤٪	۱٦/٤	TR۱٦/٤٪	بستر ماسه‌ای با ستون سنگی با آرایش مثلثی- قطر ۸۰/۵ میلی‌متر	۵۵	۲۵
				۷۵	۲٦
				۱۰۰	۲۷
S-G-TR-٪۱۲	۱۲	TR٪۱۲	بستر ماسه‌ای با ستون سنگی با آرایش مثلثی- قطر ٦۸/۷ میلی‌متر	۵۵	۲۸
				۷۵	۲۹
				۱۰۰	۳۰
S-G-TR-۸/٤٪	۸/٤	TR۸/٤٪	بستر ماسه‌ای با ستون سنگی با آرایش مثلثی- قطر ۵۷/۷ میلی‌متر	۵۵	۳۱
				۷۵	۳۲
				۱۰۰	۳۳
G	۱۰۰	G	مصالح سنگی	۵۵	۳٤
				۷۵	۳۵
				۱۰۰	۳٦

آرایش منفرد=C، آرایش مثلثی=TR، آرایش مربعی=SQ

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

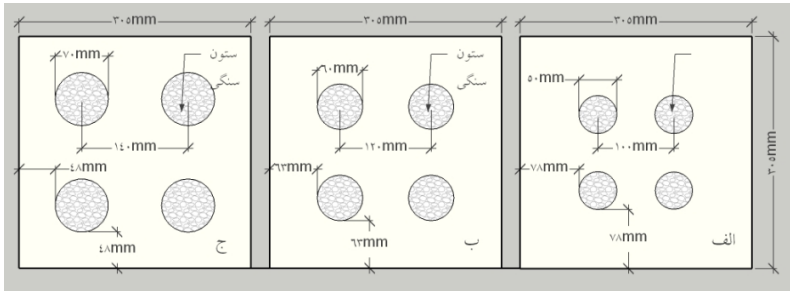




د **ج** **ب** **الف**



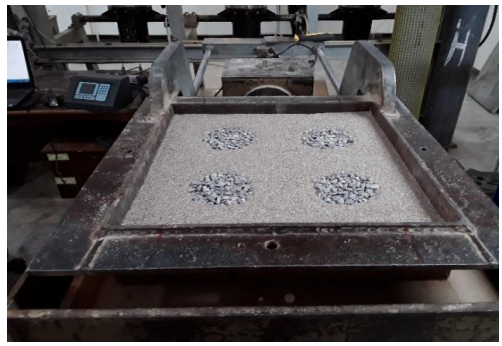
شکل ٤. آرایش قرارگیری ستون‌های سنگی منفرد الف)۸/٤٪، ب)۱۲٪، ج)۱٦/٤٪، د)۲۵٪



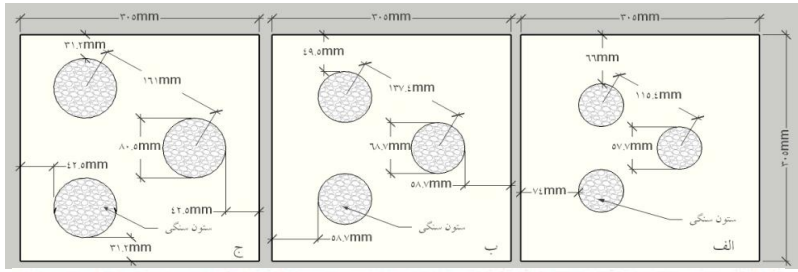
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]



الف ب ج د

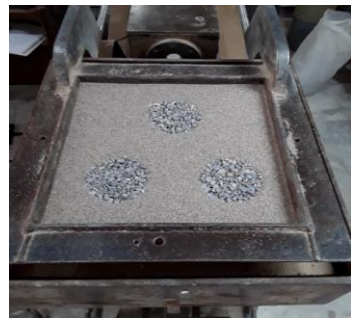


شکل ۵. آرایش قرارگیری ستون‌های سنگی در آرایش مربعی الف)۸/٤٪، ب)۱۲٪، ج)۱٦/٤٪

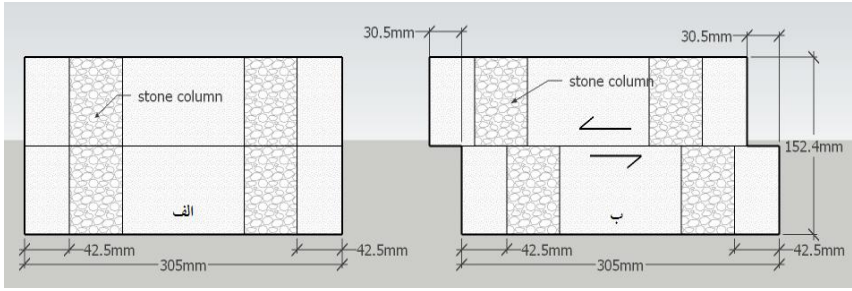




الف ب ج د



شکل ٦. آرایش قرارگیری ستون‌های سنگی در آرایش مثلثی الف)٨/٤٪، ب)١٢٪، ج)١٦/٤٪



شکل ۷. حداکثر فاصله ستون سنگی از جداره در آرایش مربع و مثلثی و حداکثر جابه‌جایی در دستگاه برش مستقیم الف) قبل از انجام آزمایش، ب) بعد از انجام آزمایش

آماده‌سازی نمونه‌ها

برای ساخت ستون‌های سنگی از لوله‌های فلزی و PVC توخالی با قطر داخلی معادل با قطر ستون سنگی و ضخامت لوله برابر ۲ میلی‌متر استفاده شد. برای ساخت نمونه‌ها در ابتدا لوله‌های تهیه شده، مطابق با آرایش مورد نظر در داخل جعبه خالی دستگاه برش مستقیم قرارگرفته شد. در هر آزمایش ماسه خشک از پیش وزن شده بر اساس وزن مخصوص ١٦ کیلو نیوتن بر مترمکعب و به ۵ قسمت مساوی تقسیم و در لایه‌های به ضخامت ۳ سانتی‌متر در داخل جعبه دستگاه برش مستقیم در اطراف لوله‌ها قرار گرفت (شکل ۸ الف) و (شکل ۹ الف). با توجه به این‌که هدف این پژوهش بررسی مقاومت برشی در زمین‌های سست است در نتیجه روی مصالح بستر هیچ‌گونه عملیات تراکمی انجام نمی‌شد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

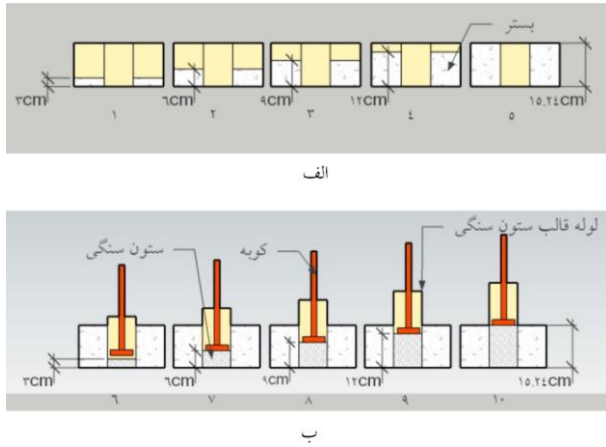
پس از اجرای بستر ماسه‌ای، وزن مصالح ستون سنگی از جنس شن با توجه به حجم مورد نیاز (بر اساس قطر داخلی لوله‌های نصب شده) و وزن مخصوص ۱۶/۵ کیلو نیوتن بر مکعب محاسبه و وزن شده و مصالح مورد نیاز برای هر آزمایش به ۵ قسمت تقسیم و در داخل لوله‌ها در هر مرحله به ارتفاع ۳ سانتی‌متر ریخته و متراکم شد. (شکل ۸ ب و شکل ۹ ب).

با توجه به سست بودن مصالح بستر امکان خارج کردن کامل لوله و ساخت ستون سنگی در بستر میسر نبود. زیرا به محض بیرون آوردن کامل لوله ریزش مصالح سست بستر موجب بسته شدن حفره محل ستون سنگی است. برای تماس مناسب بین مصالح بستر و ستون سنگی، در هر مرحله ساخت ستون سنگی وزن مصالح متناسب با ساخت ستون سنگی به ضخامت ۳ سانتی‌متر در داخل لوله ریخته و کوبیده شد. سپس لوله به ارتفاع ۲/۵ سانتی‌متر به آرامی به طرف بالا جابه‌جا شده تا در هر مرحله ساخت ستون سنگی حداقل ۰/۵ سانتی‌متر از طول لوله با لایهٔ قبلی ستون سنگی در ارتباط باشد. این ارتباط از انبساط جانبی ستون سنگی هنگام کوبش و هم‌چنین ورود مصالح بستر به داخل حفره ستون سنگی در مراحل ساخت جلوگیری کرده و باعث شکل‌گیری ستون سنگی با قطر یک‌سان در طول مورد نظر می‌شود. عملیات ساخت و تراکم ستون سنگی با همین روش تا پایان خارج شدن لوله از بستر ماسه‌ای انجام شد. در شکل ۸ ب و شکل ۹ ب مراحل ساخت ستون سنگی نشان داده شده است. مراحل ۱ تا ۵ مربوط به ساخت بستر و مراحل ٦ تا ۱۰ مربوط به ساخت ستون سنگی است.

لازم به ذکر است برای ساخت ستون سنگی با وزن مخصوص یک‌سان در کل طول ستون سنگی، لازم است که انرژی کوبشی یک‌سانی در مصالح وارد شود. در این آزمایش میزان انرژی تراکم در کل آزمایش‌ها به‌صورت یک‌سان و برابر با ٦۷ کیلوژول بر مترمکعب در نظر گرفته شد. مقدار انرژی کوبشی حاصل از اعمال ۲۵ ضربه کوبشی ناشی از افتادن وزنه ۲/۵ کیلوگرمی از ارتفاع ۵ سانتی‌متری در ستون سنگی آرایش منفرد با قطر ۱۳۹/۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۲/٤ میلی‌متر در ۵ لایه است. و میزان انرژی استفاده شده در این آزمایش برابر ٦۷ کیلوژول بر مترمکعب است که معادل ۱۱/٤درصد آزمایش پروکتور استاندارد است. در کوبش ستون سنگی نباید انرژی کوبشی زیاد باشد چون در اثر کوبش زیاد ستون سنگی

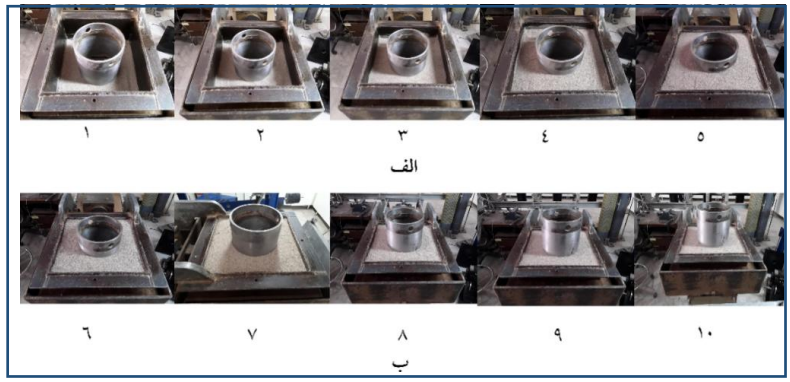
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

دچار انبساط جانبی شده و خاک اطراف دچار دست‌خوردگی می‌شود. برای اطمینان از عدم انبساط جانبی ستون‌های سنگی هنگام کوبش، در داخل ستون‌های سنگی دوغاب سیمان ریخته شد. پس از گذشت ۲٤ ساعت و محکم شدن دوغاب سیمان مصالح بستر اطراف ستون سنگی به‌آرامی جدا شده و تغییر شکل‌های جانبی آن بررسی شد که نتایج نشان‌دهندهٔ عدم انبساط جانبی به‌وسیلهٔ کوبش است. با توجه به قطرهای مختلف ستون سنگی استفاده است در آرایش‌های مختلف برای انجام عمل تراکم، کوبه متناظر با قطر ستون سنگی مطابق با شکل ۱۰ تهیه شد. بر اساس استاندارد ASTM-D-3080 سطح کوبه استفاده شده برای تراکم مصالح باید دارای سطح تماس برابر یا کم‌تر از نصف مساحت جعبه برش باشد. در این پژوهش برای تراکم مصالح ستون سنگی، نسبت سطح کوبه به سطح ستون‌های سنگی در آرایش‌های مختلف برابر با ۰/۵ یا کم‌تر در نظر گرفته شده است.

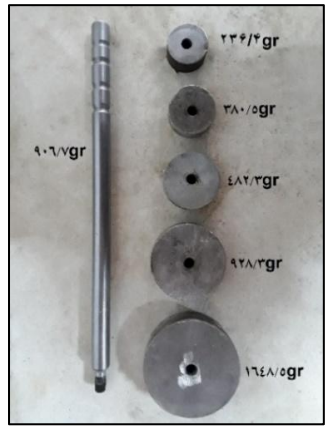


شکل ۸. شکل شماتیک مراحل انجام آزمایش در دستگاه برش مستقیم الف) مراحل ساخت بستر، ب) مراحل ساخت ستون سنگی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]



شکل ۹. مراحل انجام آزمایش‌ها در دستگاه برش مستقیم الف)مراحل ساخت بستر، ب)مراحل ساخت ستون سنگی



شکل ۱۰. مشخصات کوبه‌های استفاده شده برای تراکم

نتایج

افزایش مقاومت برشی

نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش بیان‌گر افزایش مقاومت برشی بستر ماسه‌ای با وجود ستون سنگی به‌دلیل مقاومت برشی بالای ترکیب خاک-ستون سنگی است (شکل‌های ۱۱ تا ۱٤). ترکیب خاک و ستون سنگی به‌صورت یک جسم مرکب عمل کرده و باعث افزایش مقاومت برشی نسبت به حالت بستر ماسه‌ای سست می‌شود. با افزایش

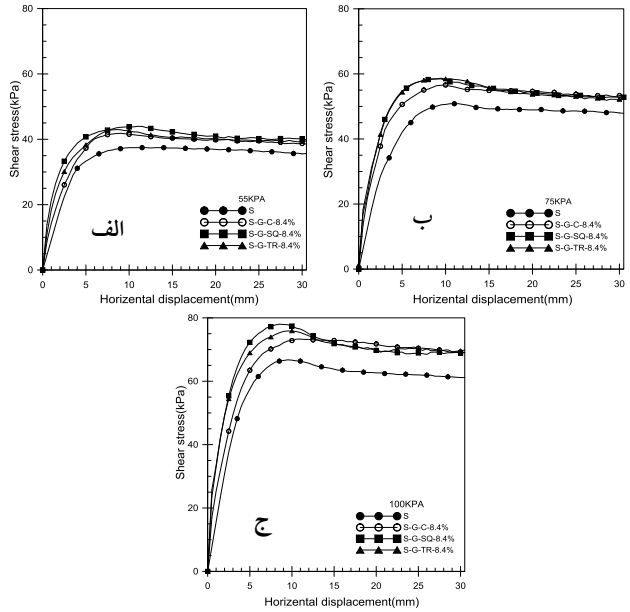
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

نسبت ناحیهٔ اصلاح شده مقاومت برشی افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش سطح تأثیر ستون سنگی در صفحه برش است. نتایج بیان‌گر آن است که افزایش مقاومت برشی حداکثر به‌ازای نسبت ناحیهٔ اصلاح شده یک‌سان در حالت آرایش مربع و مثلثی بیش‌تر از آرایش منفرد است و بیش‌ترین آن در آرایش مربع است که این بیان‌گر تأثیر هندسه آرایش قرارگیری ستون سنگی به‌ازای یک ناحیه اصلاح شده یک‌سان است. یکی از دلایل افزایش مقاومت برشی در آرایش مربع و مثلث، افزایش فشار محدود کننده به‌وسیلهٔ ستون‌های سنگی در خاک مقید شده در بین ستون‌های سنگی است که باعث افزایش مقاومت در این خاک می‌شود [۲۷]. از دلایل دیگر می‌توان به افزایش سطح جانبی ستون‌های سنگی با تغییر آرایش از حالت منفرد به مثلث و مربع است که این افزایش سطح جانبی باعث وارد شدن نیروی جانبی بیش‌تر به مصالح ستون سنگی‌شده، در نتیجه باعث بسیج شدن بیش‌تر مقاومت برشی مصالح ستون سنگی می‌شود. در شکل‌های ۱۱ تا ۱٤ نمودارهای تنش برشی در برابر جابه‌جایی در آرایش‌ها و نسبت‌های ناحیه اصلاح شده مختلف در تنش‌های قائم ۵۵ و ۷۵ و ۱۰۰ کیلو پاسکال نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت برشی با افزایش کمی در نسبت‌های ناحیهٔ اصلاح شده زیر ۱۵ درصد همراه است و در نسبت‌های ناحیه اصلاح شده بالای ۱۵ درصد افزایش بیش‌تری نشان می‌دهد. هم‌چنین با توجه به شکل‌های ۱۱ تا ۱٤ مشاهده می‌شود که شیب نمودارهای تنش برشی- جابه‌جایی افقی افزایش‌یافته است که نشان‌دهندهٔ افزایش سختی مصالح به‌دلیل حضور ستون سنگی است.

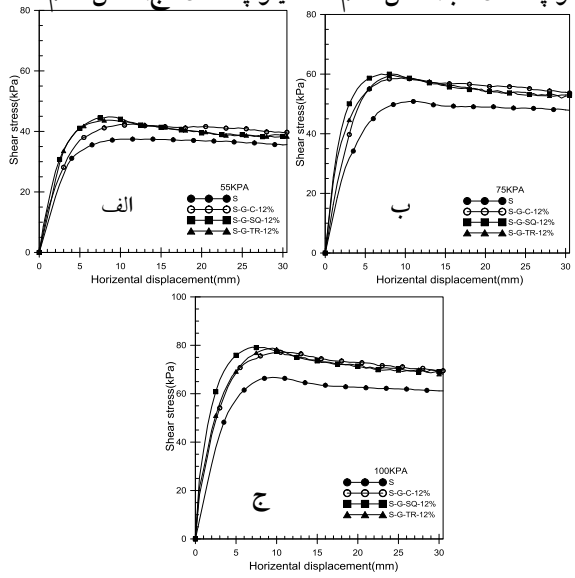
شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ نسبت ناحیهٔ اصلاح شده را در برابر تنش برشی در آرایش‌ها و تنش‌های قائم مختلف نشان می‌دهد. شکل ۱۵، ۱٦ و ۱۷ به‌ترتیب مربوط به آرایش منفرد، آرایش مثلث و آرایش مربع است. چنان‌که نتایج نشان می‌دهد، مقدار افزایش تنش برشی حداکثر با افزایش تنش قائم و نسبت ناحیهٔ اصلاح شده روند افزایشی داشته است. چنان‌که مشخص است میزان تنش برشی در حالت حداکثر در تنش‌های قائم پایین تقریباً به‌صورت یکنواخت و در تنش‌های قائم بزرگ‌تر، میزان تنش برشی با افزایش نسبت ناحیهٔ اصلاح شده افزایش می‌یابد. روند تغییرات تنش برشی در حالت متناظر با ۱۰ درصد جابه‌جایی همانند میزان تنش برشی در حالت حداکثر است. چنان‌که شکل‌های ۱۵ الی ۱۷ نشان می‌دهد افزایش مقاومت برشی حداکثر در حالت آرایش مربع و مثلثی بیش‌تر از آرایش منفرد است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

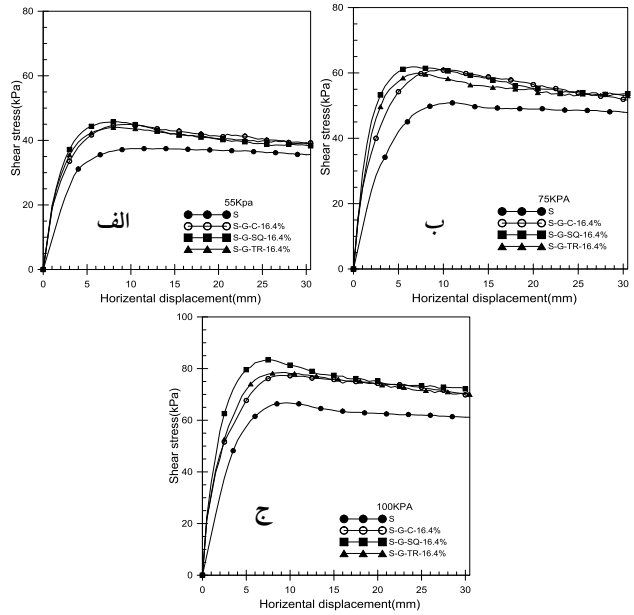
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]



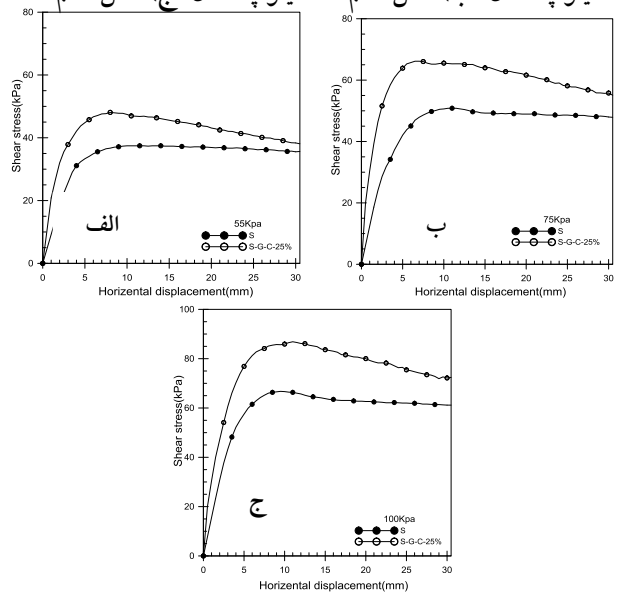
شکل ۱۱. نمودار جابه‌جایی افقی- تنش برشی در نسبت ناحیهٔ اصلاح شده ۸/٤ درصد الف) تنش قائم ۵۵ کیلو پاسکال، ب) تنش قائم ۷۵ کیلو پاسکال، ج) تنش قائم ۱۰۰کیلو پاسکال



شکل ۱۲. نمودار جابه‌جایی افقی- تنش برشی در نسبت ناحیهٔ اصلاح‌شده ۱۲ درصد الف) تنش قائم ۵۵ کیلو پاسکال، ب) تنش قائم ۷۵ کیلو پاسکال، ج) تنش قائم ۱۰۰کیلو پاسکال

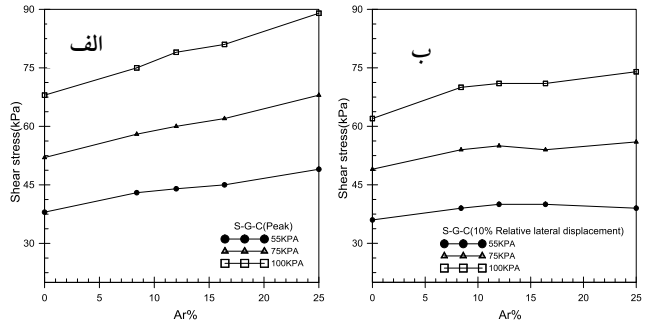


شکل ۱۳. نمودار جابه‌جایی افقی- تنش برشی در نسبت ناحیهٔ اصلاح شده ۱۶/٤ درصد الف) تنش قائم ۵۵ کیلو پاسکال، ب) تنش قائم ۷۵ کیلو پاسکال، ج) تنش قائم ۱۰۰کیلو پاسکال

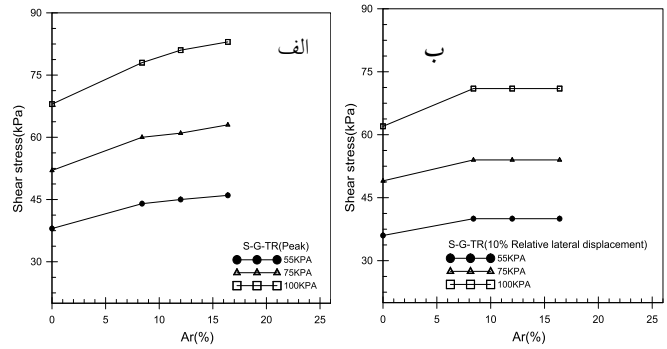


شکل ۱٤. نمودار جابه‌جایی افقی- تنش برشی در نسبت ناحیهٔ اصلاح شده ۲۵ درصد الف) تنش قائم ۵۵ کیلو پاسکال، ب) تنش قائم ۷۵ کیلو پاسکال، ج) تنش قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]



شکل ۱۵. تغییر تنش برشی در تنش‌های قائم مختلف برای آزمایش S-G-C به‌ازای نسبت ناحیهٔ اصلاح شده مختلف الف) حالت حداکثر، ب) حالت متناظر با جابه‌جایی افقی ۱۰ درصد



شکل ۱۷. تغییر تنش برشی در تنش‌های قائم مختلف برای آزمایش S-G-TR به‌ازای نسبت ناحیهٔ اصلاح شده مختلف الف) حالت حداکثر، ب)حالت متناظر با جابه‌جایی افقی ۱۰ درصد

بهبود پارامترهای مقاومت برشی

پارامترهای مقاومت برشی حاصل از نتایج آزمایش‌های بستر مسلح شده با ستون سنگی برای آرایش و نسبت‌های ناحیهٔ اصلاح شده مختلف مقایسه با بستر سست ماسه‌ای در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج حاصل بیان‌گر افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک مسلح شده است. با توجه به نتایج جدول ٤ قابل‌مشاهده است که بیش‌ترین مقدار افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی مربوط به حالت آرایش مربع و پس از آن آرایش مثلثی است و آرایش ستون سنگی منفرد دارای کم‌ترین مقدار افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

در حالت حداکثر مقدار زاویهٔ اصطکاک داخلی از مقدار ۳۳ درجه برای بستر سست به مقدار ٤۲ درجه برای بستر مسلح شده با ستون سنگی افزایش کرده است. مقدار افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی روند افزایشی با نسبت ناحیهٔ اصلاح‌شده دارد و این روند افزایشی در نسبت ناحیهٔ اصلاح شده زیر۱۵درصد کم و در نسبتهای بالای ۱۵ درصد نمود پیدا می‌کند. در حالت متناظر با جابه‌جایی۱۰ درصد، زاویهٔ اصطکاک داخلی مقدار۳۰ درجه در حالت بستر سست به ۳٤ درجه در حالت بستر مسلح شده با ستون سنگی افزایش پیدا کرده است. در این حالت نیز مقدار زاویهٔ اصطکاک داخلی روند افزایشی با افزایش نسبت ناحیهٔ اصلاح شده دارد. در هر دو حالت مقاومت برشی حداکثر و حالت متناظر با جابه‌جایی افقی ۱۰ درصد تغییرات چشمگیری در مقدار چسبندگی دیده نمی‌شود.

جدول ٤. پارامترهای مقاومت برشی معادل به‌دست‌آمده از آزمایش‌های مختلف

شمارهٔ آزمایش	مشخصه آزمایش	نسبت ناحیهٔ اصلاح‌شده	پارامترهای حالت حداکثر		پارامترهای متناظر با ۱۰ درصد جابه‌جایی	
			چسبندگی معادل (کیلو پاسکال)	زاویهٔ اصطکاک معادل داخلی (درجه)	چسبندگی معادل (کیلو پاسکال)	زاویهٔ اصطکاک معادل داخلی (درجه)
۱	S	۰	۲	۳۳	۵	۳۰
۲	S-G-C-۲۵٪	۲۵	۱	٤۲	۰	۳٤
۳	S-G-C-۱٦/٤٪	۱٦/٤	۲	۳۹	۱	۳۲
٤	S-G-C-۱۲٪	۱۲	۰	۳۸	۳	۳۱
۵	S-G-C-۸/٤٪	۸/٤	۳	۳٦	۳	۳۱
٦	S-G-SQ-۱٦/٤٪	۱٦/٤	۰	٤۰	۳	۳۲
۷	S-G-SQ-٪۱۲	۱۲	۲	۳۹	۲	۳۱
۸	S-G-SQ-۸/٤٪	۸/٤	۲	۳۸	٤	۳۱
۹	S-G-TR-۱٦/٤٪	۱٦/٤	۲	۳۹/۵	۱	۳۲
۱۰	S-G-TR-٪۱۲	۱۲	۲	۳۸/۵	۲	۳۱
۱۱	S-G-TR-۸/٤٪	۸/٤	٤	۳۷	٤	۳۱
۱۲	G	۱۰۰	۱٦	٤۵	۱۲	۳۵

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

چسبندگی موجود در مصالح بستر و ستون سنگی (آزمایش‌های ۱ و ۱۲ در جدول ۳) به‌دلیل چسبندگی ظاهری ناشی از قفل شدگی دانه‌های خاک است. پارامترهای مؤثر در چسبندگی ظاهری میزان تراکم خاک و هم‌چنین ابعاد دستگاه است که در دستگاه برش مستقیم با ابعاد بزرگ میزان چسبندگی ظاهری دارای مقدار بزرگ‌تر است [۳۸-٤۰].

مقاومت برشی معادل

برای اهدافی مانند تحلیل ظرفیت باربری، نشست و پایداری در زمین‌های به‌سازی شده با ستون سنگی می‌توان سطح خاک پیرامون هر ستون سنگی به‌همراه ستون به‌صورت یک‌پارچه مطابق شکل ۱۸ الف در نظر گرفت. سطح پیرامونی و ستون سنگی را با دایره معادل تقریب زد. که این استوانه در نظر گرفته شده به‌عنوان یک سلول واحد (شکل ۱۸ ب) شناخته می‌شود. برای محاسبات پارامترهای مذکور در خصوص ستون‌های سنگی، می‌توان به‌جای مدل نمودن کل ستون‌های سنگی، رفتار یک سلول واحد به‌صورت غیرهمگن را بررسی کرد روش دیگر استفاده از سلول واحد به‌صورت همگن است که در این روش به‌جای در نظر گرفتن محیط به‌صورت غیرهمگن یا هتروژن، محیط شامل ستون سنگی و خاک اطراف به‌صورت همگن یا هموژن در می‌آید. در عمل همگن‌سازی خاک دانه‌ای و خاک ریزدانه داخل سلول واحد به‌کمک یک رابطه خطی انجام می‌شود. پارامترهای معادل در این روش به نسبت وزنی معادل‌گیری می‌شوند و استفاده از این روش به‌عنوان روشی متداول در برآورد ظرفیت باربری، نشست و به‌ویژه در پایداری شیب‌ها است. مقاومت برشی معادل τ_{ave} درون سلول واحد از رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۷].

$$\tau_{ave} = A_r\tau_c + (1-A_r)\tau_s \qquad (۲)$$

که در این رابطه τ_{ave} = مقاومت برشی معادل، A_r = نسبت ناحیه اصلاح‌شده و τ_c = تنش برشی مصالح ستون سنگی، τ_s = تنش برشی مصالح بستر هستند.

میانگین وزنی وزن واحد حجم خاک مسلح شده از رابطهٔ (۳) محاسبه می‌شود [۷].

$$\gamma_{ave} = A_r\gamma_c + (1-A_r)\gamma_s \qquad (۳)$$

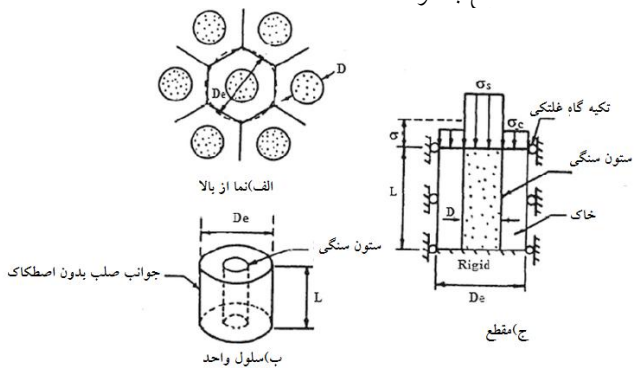
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

در این رابطه γ_{ave} =وزن واحد حجم معادل و γ_c =وزن واحد حجم مصالح ستون سنگی، γ_s =وزن واحد حجم مصالح بسترند.

برای محاسبهٔ زاویهٔ اصطکاک معادل از رابطهٔ (٤) استفاده می‌شود [۷].

$$[\tan\varphi]_{ave} = \frac{\gamma_c.A_r.\tan\varphi_c + \gamma_s.(1-A_r).\tan\varphi_s}{\gamma_{ave}} \qquad (٤)$$

در این رابطه φ_{av} =زاویهٔ اصطکاک معادل φ_C =زاویهٔ اصطکاک مصالح ستون سنگی و φ_S = زاویهٔ اصطکاک مصالح بستر هستند.



شکل ۱۸. مفهوم سلول واحد [۷]

در جدول ٦ و ۷ پارامترهای گسیختگی موهر-کولمب برای مصالح بستر ماسه‌ای سست و ماسه سست مسلح شده با ستون سنگی برای آرایش‌های مختلف در حالات حداکثر و متناظر با جابه‌جایی افقی ۱۰ درصد ارائه شده است. نتایج بیان‌گر افزایش مقاومت برشی با افزایش تنش قائم و نسبت ناحیهٔ اصلاح شده در حالت حداکثر و متناظر با جابه‌جایی افقی ۱۰ درصد است. هم‌چنین نتایج بیان‌گر آن است که افزایش مقاومت برشی در حالت حداکثر نسبت به‌حالت معادل با ۱۰ درصد جابه‌جایی بیش‌تر است. افزایش مقاومت برشی در آرایش مربع بیش‌ترین مقدار و در آرایش منفرد کم‌ترین مقدار است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت مقاومت برشی حداکثر و حالت مقاومت برشی متناظر جابه‌جایی افقی ۱۰ درصد در همه آرایش‌های قرارگیری، مقاومت برشی حاصل از نتایج آزمایش‌ها بیش‌تر از مقاومت برشی حاصل از روابط تحلیلی (رابطه ۲) است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

جدول ٦. پارامترهای مقاومت برشی به‌دست‌آمده از آزمایش‌های مختلف در حالت حداکثر

درصد اختلاف نتایج آزمایش و روابط تحلیلی	زاویهٔ اصطکاک داخلی معادل (درجه)		نسبت ناحیهٔ اصلاح شده (درصد)	مشخصه آزمایش	شمارهٔ آزمایش
	معادلهٔ ٤	نتایج آزمایش			
–	–	۳۳	۰	S	۱
۱٦/۷٪	۳٦	٤۲	۲٥	S-G-C-۲٥٪	۲
۱۱/٤٪	۳٥	۳۹	۱٦/٤	S-G-C-۱٦/٤٪	۳
۸/٦٪	۳٥	۳۸	۱۲	S-G-C-۱۲٪	٤
۲/۹٪	۳٤	۳٦	۸/٤	S-G-C-۸/٤٪	٥
۱٤/۳٪	۳٥	٤۰	۱٦/٤	S-G-SQ-۱٦/٤٪	٦
۱۱/٤٪	۳٥	۳۹	۱۲	S-G-SQ-٪۱۲	۷
۱۱/۸٪	۳٤	۳۸	۸/٤	S-G-SQ-۸/٤٪	۸
۱۱/٤٪	۳٥	۳۹	۱٦/٤	S-G-TR-۱٦/٤٪	۹
۸/٦٪	۳٥	۳۸	۱۲	S-G-TR-٪۱۲	۱۰
٥/۹٪	۳٤	۳٦	۸/٤	S-G-TR-۸/٤٪	۱۱
–	-	٤٥	۱۰۰	G	۱۲

جدول ۷. پارامترهای مقاومت برشی به‌دست آمده از آزمایش‌ها مختلف در حالت متناظر با ۱۰ درصد جابه‌جایی

درصد اختلاف نتایج آزمایش و روابط تحلیلی	زاویهٔ اصطکاک داخلی معادل (درجه)		نسبت ناحیهٔ اصلاح شده (درصد)	مشخصه آزمایش	شمارهٔ آزمایش
	معادلهٔ ٤	نتایج آزمایش			
–	–	۳۰	۰	S	۱
۸/٦٪	۳۱/۳	۳٤	۲٥	S-G-C-۲٥٪	۲
۳/٦٪	۳۰/۹	۳۲	۱٦/٤	S-G-C-۱٦/٤٪	۳
۱/۳٪	۳۰/٦	۳۱	۱۲	S-G-C-۱۲٪	٤
۱/٦٪	۳۰/٥	۳۱	۸/٤	S-G-C-۸/٤٪	٥
۳/٦٪	۳۰/۹	۳۲	۱٦/٤	S-G-SQ-۱٦/٤٪	٦
۱/۳٪	۳۰/٦	۳۱	۱۲	S-G-SQ-٪۱۲	۷
۱/٦٪	۳۰/٤٥	۳۱	۸/٤	S-G-SQ-۸/٤٪	۸
۳/٦٪	۳۰/۹	۳۲	۱٦/٤	S-G-TR-۱٦/٤٪	۹
٤/٦٪	۳۰/٦	۳۱	۱۲	S-G-TR-٪۱۲	۱۰
۱/٦٪	۳۰/٤٥	۳۱	۸/٤	S-G-TR-۸/٤٪	۱۱
–	-	۳٥	۱۰۰	G	۱۲

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

جدول ۸. ضرایب اصلاح مقاومت برشی در آرایش و نسبت‌های ناحیهٔ اصلاح شده

وضعیت	حالت حداکثر								
آرایش	S-G-C			S-G-SQ			S-G-TR		
تنش قائم (kPa)	۵۵	۷۵	۱۰۰	۵۵	۷۵	۱۰۰	۵۵	۷۵	۱۰۰
A_r	ضریب α								
۸/٤٪	۱/۳	۱/٤	۱/۳	۱/٦	۱/۸	۱/۸	۱/٤	۱/٦	۱/۵
۱۲٪	۱/۲	۱/۳	۱/٤	۱/٤	۱/۵	۱/٦	۱/۳	۱/٤	۱/۵
۱٦/٤٪	۱/۱	۱/۳	۱/۲	۱/۳	۱/٤	۱/٤	۱/۲	۱/۳	۱/۳
۲۵٪	۱/۱	۱/۳	۱/۳						
وضعیت	حالت متناظر با جابه‌جایی افقی ۱۰ درصد								
آرایش	S-G-C			S-G-SQ			S-G-TR		
تنش قائم (kPa)	۵۵	۷۵	۱۰۰	۵۵	۷۵	۱۰۰	۵۵	۷۵	۱۰۰
A_r	ضریب α								
۸/٤٪	۱/۳	۱/۸	۱/۸	۱/۷	۱/۸	۱/۸	۱/۵	۱/٦	۱/۸
۱۲٪	۱/۳	۱/٦	۱/٦	۱/۱	۱/۵	۱/۵	۱/۱	۱/۵	۱/٦
۱٦/٤٪	۱/۱	۱/۳	۱/٤	۱	۱/٤	۱/٤	۱	۱/۳	۱/٤
۲۵٪	۱	۱/۲	۱/۳						

نتایج

در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی رفتار ستون‌های سنگی تحت بارگذاری برشی پرداخته شده است. رفتار ستون سنگی در دستگاه برش مستقیم بزرگ در چهار نسبت ناحیه اصلاح شده ۸/٤ و ۱۲ و ۱٦/٤ و ۲۵ درصد و ۳ آرایش منفرد و مربع و مثلث در تنش‌های سربار قائم ۵۵ و ۷۵ و ۱۰۰ کیلو پاسکال بررسی شده و بر اساس داده‌های دریافت شده نتایج زیر حاصل شده است.

با افزایش نسبت ناحیهٔ اصلاح‌شده افزایش مقاومت برشی در تمام آرایش‌ها به‌وجود می‌آید. متوسط درصد افزایش مقاومت برشی در حالت حداکثر برای ناحیهٔ اصلاح‌شده ۸/٤ و ۱۲ و ۱٦/٤ و ۲۵ درصد برای آرایش منفرد برابر ۱۱ و ۱۵/۳ و ۱۸/۳ و ۲۹/۳ درصد و برای آرایش مربع برابر ۱۷ و ۲۰/۳ و ۲۳/۳ درصد و برای آرایش مثلث ۱٤/٦ و ۱۷/٦ و ۲۱ درصد است. متوسط درصد افزایش مقاومت برشی در حالت جابه‌جایی افقی معادل ۱۰ درصد برای

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

ناحیهٔ اصلاح‌شده ۸/٤ و ۱۲ و ۱٦/٤ و ۲۵ درصد برای آرایش منفرد ۱۰ و ۱۲/۳ و ۱۱/٦ و ۱٤/٦ درصد و برای آرایش مربع ۱۲ و ۱۰ و ۱۱/۳ درصد و برای آرایش مثلث ۱۰/٦ و ۱۰/٦ و ۱۱/٦ درصد است. افزایش مقاومت برشی در نسبت‌های ناحیه اصلاح‌شده کم‌تر از ۱۵ درصد رشد کم‌تری داشته و در نسبت‌های بالای ۱۵ درصد رشد بیش‌تری دارد.

۱. در حالت آرایش‌های مثلث و مربع گروه ستون سنگی به‌ازای نسبت‌های ناحیهٔ اصلاح‌شده برابر مقاومت برشی بسیج شده بیش‌تری نسبت به ستون سنگی منفرد حاصل شده است. در میان آرایش‌های بررسی شده به‌ازای یک نسبت ناحیهٔ اصلاح‌شده یک‌سان، مقاومت برشی در آرایش مربعی بیش‌ترین مقدار و در آرایش منفرد کم‌ترین مقدار را دارد. دلیل افزایش مقاومت برشی در گروه ستون سنگی فشار محدودکننده وارد از طرف ستون‌های سنگی بر خاک قرار گرفته در بین ستون‌های سنگی و افزایش سطح جانبی ستون‌های سنگی از آرایش منفرد به آرایش مربع است و این موضوع باید در ملاحظات طراحی مدنظر قرار گیرد.

۲. افزایش شیب نمودارهای مقاومت برشی در برابر جابه‌جایی افقی نشان می‌دهد که ترکیب خاک- ستون سنگی دارای سختی بیش‌تری نسبت به خاک بستر سست ماسه‌ای است و این سختی با توجه به نسبت ناحیهٔ اصلاح‌شده و هم‌چنین آرایش قرارگیری تغییر می‌کند که بیش‌ترین سختی مربوط به آرایش مربع و کم‌ترین مربوط به آرایش منفرد است.

۳. مقادیر مقاومت برشی معادل حاصل از انجام آزمایش‌ها از مقادیر مقاومت برشی معادل حاصل از روابط تحلیلی بیش‌تر است؛ بنابراین استفاده از روابط تحلیلی در محاسبه مقاومت‌های برشی محافظه‌کارانه است. لازم به توضیح است که روابط استفاده شده با در نظر گرفتن ضرایب تمرکز تنش برابر با یک است. در نتیجه نتایج مشخص می‌سازد که در محاسبات مقاومت برشی باید ضریب تمرکز تنش به طرز صحیح محاسبه و در روابط اعمال شود.

٤. با توجه به تفاوت نتایج آزمایش و روابط تحلیلی، ضرایب بهینه برای اصلاح روابط تحلیلی ارائه شد. این ضریب با توجه به نوع آرایش‌های منفرد و مثلث و مربع و نسبت‌های ناحیه اصلاح‌شده و هم‌چنین تنش‌های قائم اعمالی محاسبه و ارائه شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

منابع

1. Murugesan S., Rajagopal K., "Studies on the behavior of single and group of geosynthetic encased granular columns", Geotech, Geoenvironmental Eng. (2010) 136 (1) 129-139.
2. Murugesan S., Rajagopal K., "Model tests on geosynthetic encased granular columns", Geosynth, Int., (2007) 14 (6) 346-354.
3. Murugesan S. K. R., "Performance of encased stone columns and design guidelines for construction on soft clay soils", Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics (2008).
4. Miranda M., Da Costa A., "Laboratory analysis of encased stone columns". Geotextiles and Geomembranes, 44 (2016) 26-36.
5. Alamgir M., Miura N., Poorooshasbh H. B., Madhav M. R., "Deformation analysis of soft ground columnar inclusions", Comput, Geotech (1996) 18 (4) 261-290.
6. Hughes J. M. O., Withers N. J., "reinforced of soft cohesive soils with stone columns", Ground Engineering, (1974) 42-49.
7. Barksdale R. D., Bachus R. C., "Design and Construction of Stone Column" (1983) 1.
8. Black J. A. S. V., McKinley J. D., "Performance of clay samples reinforced with vertical granular columns", Can Geotech J. (2007) M 44 (1) 89-95.
9. Murugesan S., Rajagopal K., "Geosynthetic-encased stone columns: Numerical evaluation". Geotextiles and Geomembranes, (2006) 24 (6) 349-358.
10. Castro J., "Groups of encased stone columns: Influence of column length and arrangement", Geotextiles and Geomembranes, (2017) 45 (2) 68-80.
11. Chen JF L. L., Xue J. F., Feng S. Z, "Failure mechanism of geosynthetic-encased stone columns in soft soils under embankment", Geotextiles and Geomembranes, (2015) 43 (5) 424-431.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

12. Choobbasti A., Pichka H., "Improvement of soft clay using installation of geosynthetic-encased stone columns: numerical study", Arab J Geosci, (2012) 133(9) 1154-1161.
13. Choobbasti A. J., Zahmatkesh A., Noorzad R., "Performance of Stone Columns in Soft Clay: Numerical Evaluation", Geotechnical and Geological Engineering, 29 (2011) 675-684.
14. Hasan M., Samadhiya N. K., "Experimental and Numerical Analysis of Geosynthetic-Reinforced Floating Granular Piles in Soft Clays", Int. J. of Geosynth. and Ground Eng. (2016) 2 (22) 1-13.
15. Hosseinpour I., Riccio M., Almeida M. S. S., "Numerical evolution of a granular column reinforced by geosynthetics using encasement and laminated disks", Geomembr, 42 (2014) 363-373.
16. Kousik Deb., "Modeling of granular bed-stone column-improved soft soil", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics (2008) 1267-1288.
17. Nazari Afshar J., Ghazavi M., "A simple analytical method for calculation of bearing capacity of stone column", International Journal of Civil Engineering, 12 (1) (2012) 15.
18. Six V., Mroueh H., Shahrour I., Bouassida M., "Numerical Analysis of Elastoplastic Behavior of Stone Column Foundation", Geotech Geol Eng, 30 (2012) 813-825.
19. Zhang L., Zhao M., Shi C., Zhao H., "Settlement Calculation of Composite Foundation Reinforced with Stone Columns", International Journal of Geomechanics, 13 (3) (2013) 248-256.
20. Deb K., Samadhiya N. K., Namdeo J. B., "Laboratory model studies on unreinforced and geogrid-reinforced sand bed over stone column-improved soft clay", Geotextiles and Geomembranes, 29 (2), (2011) 190-196.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

21. Fattah M. Y., A.-N., M., Al-Suhaily A. S., "Estimation of bearing capacity of floating group of stone columns", Engineering Science and Technology, an International Journal, 20 (3) (2017) 1166-1172.
22. Vekli M., Aytekin M., I˙kizler B., Calik U., "Experimental and numerical investigation of slope stabilization by stone columns". Nat Hazards, 64 (1) (2012) 797-820
23. Ghazavi M., Nazari Afshar J., "Bearing capacity of geosynthetic encased stone columns", Geotextiles and Geomembranes, 38 (2013) 26-36.
24. Nazari afshar J., Mehrannia N., Kalantary F., Ganjian N., "Bearing Capacity of Group of Stone Columns with Granular Blankets", International Journal of Civil Engineering (2017).
25. Murugesan S., Rajagopal K.,."Shear load tests on granular columns with and without geosynthetic encasement", Geotech. Test. J, 32 (1) (2008) 35-44.
26. Schnaid F., Winter D., Silva A. E. F., Alexiew D., Kuster V., Hebmuller A., "Geotextile encased columns (GEC) under bridge approaches as a pressure-relief system: concept, experience and measurements", in 10th International Conference on Geosynthetics, (2014) Berlin, Germany.
27. Sunil Ranjan Mohapatra K. R., Jitendra Shar, "Direct shear tests on geosynthetic-encased granular columns", Geotextiles and Geomembranes 44 (3) (2016) 396-405.
28. Braja M., Das K. S., "Principles of Geotechnical Engineering", USA: GlobalEngineering (2014).
29. Ranjan G., "Ground treated with granular piles and its response under load", Indian Geotech, 19 (1) (1989) 1-22.
30. Institution I. S., "Indian standard code of practice for design and construction for ground improvement-guidelines, New Delhi (2003).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.8.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.365]

31. Fox Z., "Critical State, Dilatancy and Particle Breakage of Mine Waste Rock"., colorado state university: Fort collins,USA (2011).
32. Stoeber J. N., "Effects of Maximum Particle Size and Sample Scaling on the Mechanical Behavior of Mine Waste Rock; a Critical State Approach", Colorado stste univerity: Fort Collins, USA. (2012).
33. Nayak N. V., "Recent Advances in Ground Improvements by Stone Column", in In: Proceedings of Indian Geotechnical Conference, Madras (1983) India.
34. Fattah M. Y., T. S. K., Al-Waily M. J. K., "Stress Concentration Ratio of Model Stone Columns in Soft Clays", Geotechnical Testing Journal, 34 (1) (2010).
35. ASTM-D3080, "Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions", in ASTM International West Conshohocken, United States (2011).
36. Brown R., "Vibroflotation Compaction of Cohesionless Soils", Journal of the Geo technical Engineering Division, ASCE, 103 (12) (1977) 1437-1451.
37. James K., Mitchell F., Timothy R., Huber M., "Performance of a Ston Column Foundation", Journal of Geotechnical Engineering, 111 (2) (1985) 205-223.
38. Liu S. H., "Simulating a direct shear box test by DEM", Can. Geotech, 43 (2) (2006) 155-168.
39. Bareither C. A., Benson C. H., Edil T. B., "Comparison of shear strength of sand backfills measured in small-scale and large-scale direct shear tests", Can. Geotech, 45 (9) (2008) 1224-1236.
40. Dadkhah R., Ghafoori M., Ajalloeian R., Lashkaripour G. R., "The Effect of Scale Direct Shear Test on the Strength Parameters of Clayey Sand in Isfahan City, Iran", Journal of Applied Sciences, 10 (2010) 2027-2033.