



Semnan University



Research Article

## Effects of Simultaneous Use of Crumb Tires and Fly Ash on the Shear Behavior of Encased Stone Columns: A Laboratory Study

Saeed Negari<sup>a</sup>, Maryam Mokhtari<sup>b\*</sup> 

<sup>a</sup> MSc. of Geotechnique, Faculty of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, I. R. Iran.

<sup>b</sup> Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, I. R. Iran.

### PAPER INFO

#### **Paper history:**

Received: 2024-05-05

Revised: 2024-05-26

Accepted: 2024-05-29

#### **Keywords:**

Fly ash;

Crumb tire;

Geotextile;

Stone column;

Shear strength.

### ABSTRACT

Applying stone columns (SCs) is an economical method to improve loose soil. This laboratory study is conducted on the effects of simultaneous use of crumb tire (CT) and fly ash (FA) on the shear behavior of SCs encased with geotextile and fiber-reinforced polymer (FRP) in soft clay. A large-scale direct shear device was utilized to do the desired tests. The samples were exposed to normal stress values of 20, 40, and 70 kPa. First, optimal percentages of CT and FA were determined to be used with granular materials in the SCs. The impact of installing ordinary reinforced and unreinforced SCs on the shear behavior of the assembly was examined. Installing the SCs in soft clay bed and adding the CT-FA composite to the SC materials increased the shear strength. Supplementing the CT-FA composite to the SC materials increased shear strength of the assembly to 4.6%-10%. The shear strength rose more than twice when the normal stress increased from 20 kPa to 70 kPa and it was mobilized more since CT-FA composite is present. It increased due to a rise in the replacement ratio of the SCs in the assembly. By installing the ordinary composite SCs in clay bed under the normal stresses of 20 kPa and 70 kPa, the shear strength increased to 34% and 41.7% and it would rise in the encased mode more than in the ordinary mode. Furthermore, the FRP-based reinforcement enhanced the shear strength more than the geotextile reinforcement did.

\* Corresponding author.

E-mail address: [mokhtari@yazd.ac.ir](mailto:mokhtari@yazd.ac.ir)

**How to cite this article:** Negari, S., & Mokhtari, M. (2024). Effects of the simultaneous use of crumb tires and fly ash on the shear behavior of encased stone columns: A laboratory study. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 10(1), 63-80. <https://doi.org/10.22075/jtie.2024.34022.1671>



مقاله پژوهشی

## مطالعه آزمایشگاهی تأثیر استفاده هم‌زمان خرده لاستیک و خاکستر بادی بر عملکرد برشی ستون‌های سنگی محصورشده

سعید نگاری<sup>۱</sup>، مریم مختاری<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

### چکیده

ستون سنگی یکی از روش‌های مناسب و اقتصادی است که به وسیله آن می‌توان خاک سست را بهسازی کرد. در این پژوهش، به مطالعه آزمایشگاهی تأثیر استفاده هم‌زمان خرده لاستیک و خاکستر بادی بر عملکرد برشی ستون‌های سنگی محصورشده به ژئوتکستایل و کامپوزیت مسلح‌شده پلیمری (FRP) در خاک رس نرم پرداخته شده است. جهت انجام آزمایش‌ها از دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس استفاده شد و نمونه‌ها تحت تنش‌های نرمال ۲۰، ۴۰ و ۷۰ کیلوپاسکال قرار گرفتند. در ابتدا، درصد بهینه خرده لاستیک و خاکستر بادی جهت استفاده هم‌زمان به همراه مصالح دانه‌ای در ستون‌های سنگی تعیین شد. سپس به بررسی تأثیر نصب ستون‌های سنگی مسلح‌شده و مسلح‌نشده بر رفتار برشی مجموعه پرداخته شد. نتایج نشان داد که با نصب ستون‌های سنگی در بستر رسی نرم، مقاومت برشی افزایش یافت و همچنین اضافه شدن خرده لاستیک و خاکستر بادی به مصالح ستون سنگی سبب افزایش مقاومت برشی گردید. با اضافه شدن خرده لاستیک و خاکستر بادی به مصالح ستون، مقاومت برشی مجموعه ۴/۶ الی ۱۰ درصد نسبت به حالتی که این مصالح به مصالح ستون اضافه نشده‌اند، افزایش یافت. با افزایش یافتن تنش نرمال از ۲۰ کیلوپاسکال به ۷۰ کیلوپاسکال، مقاومت برشی بیش از دو برابر افزایش یافت و در حالت گروه، مقاومت برشی بیشتری در مجموعه بسیج شد و همچنین با افزایش نسبت جانشینی ستون‌های سنگی در مجموعه، مقاومت برشی افزایش یافت. با نصب ستون‌های سنگی مرکب محصورنشده در بستر رسی تحت تنش نرمال ۲۰ کیلوپاسکال، مقاومت برشی تا ۳۴ درصد و در تنش نرمال ۷۰ کیلوپاسکال مقاومت برشی تا ۴۱/۷ درصد افزایش یافت. همچنین، مشاهده گردید که مقاومت برشی در حالت محصورشده به علت حفظ بافت متراکم ستون و مقاومت محصورکننده، نسبت به حالت محصورنشده، به میزان بیشتری افزایش یافت و مسلح‌کننده از جنس FRP نسبت به مسلح‌کننده از جنس ژئوتکستایل، مقاومت برشی را به میزان بیشتری افزایش داد.

### اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۹

### واژگان کلیدی:

خاکستر بادی،

خرده لاستیک،

ژئوتکستایل،

ستون سنگی،

مقاومت برشی

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [mokhtari@yazd.ac.ir](mailto:mokhtari@yazd.ac.ir)

استناد به این مقاله: نگاری، سعید & مختاری، مریم. (۱۴۰۳). مطالعه آزمایشگاهی تأثیر استفاده هم‌زمان خرده لاستیک و خاکستر بادی بر عملکرد برشی ستون‌های سنگی محصورشده. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۰(۱)، ۶۳-۸۰. <https://doi.org/10.22075/jtie.2024.34022.1671>

## ۱. مقدمه

امروزه، با افزایش جمعیت و در پی آن افزایش نیاز به زیرساخت‌های عمرانی، از جمله راه‌ها، تکنیک‌های بهسازی خاک بستر راه‌ها به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد (عباس، ۲۰۲۰). ستون سنگی، یکی از روش‌های اقتصادی برای تقویت و مقاوم‌سازی زمین‌های سست، از جمله تقویت خاک بستر راه‌ها است که با استفاده از مصالح دانه‌ای، سنگ‌های خردشده یا بتن بازیافتی و تراکم آن‌ها در چاله‌های از پیش حفرشده توسط دستگاه لرزاننده مخصوص، ساخته می‌شوند. مصالح مورد استفاده در ستون سنگی معمولاً از خاک محل مستحکم‌تر و مقاوم‌تر بوده و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست را در پی خواهد داشت (کرش و کرش، ۲۰۱۷).

ستون سنگی کاربردهای گوناگونی دارد و می‌توان از آن برای کاهش پتانسیل روانگرایی و مستهلک ساختن اضافه فشار آب حفره‌ای ایجادشده در خاک و حتی بهبود مقاومت خاک بستر جاده‌ها استفاده کرد. از این‌رو، پژوهش‌های متعددی در خصوص بهبود خواص خاک در اثر اجرای ستون سنگی شامل مطالعات آزمایشگاهی (دونگکا و همکاران، ۲۰۰۶؛ جوئینارونگریث و اشفورد، ۲۰۰۶؛ ژو و همکاران، ۲۰۲۱) و مطالعات عددی (رولینز و همکاران، ۲۰۰۵؛ جوئینارونگریث و اشفورد، ۲۰۰۶) انجام شده است. حاجی عزیزی و نصیری (۱۳۹۴) در مطالعه‌ای به بررسی کاربرد ستون سنگی در مقاوم‌سازی و افزایش ظرفیت باربری جاده‌ها پرداختند و دریافتند که یکی از روش‌های مناسب و سازگار با محیط‌زیست برای مسلح کردن خاک بستر جاده‌ها، استفاده از ستون‌های سنگی است، چرا که ستون‌های سنگی به‌عنوان یکی از روش‌های پایدارسازی، افزایش مقاومت و بهبود ظرفیت باربری مطرح می‌شود که علاوه بر سادگی و راحتی اجرا، از نقطه‌نظر اقتصادی نیز نسبت به سایر روش‌های موجود مقرون‌به‌صرفه‌تر است. سید و بوکر (۱۹۷۷) برای اولین

بار، اثر ستون سنگی بر کاهش پتانسیل روانگرایی را مورد بررسی قرار دادند. برای بررسی تأثیر ستون سنگی در کاهش پتانسیل روانگرایی در مطالعات آزمایشگاهی، بیشتر از آزمایش‌های میز لرزان و مدل سانتریفیوژ استفاده می‌شود. استفاده از ستون سنگی باعث کاهش تغییر مکان جانبی و کاهش فشار آب حفره‌ای در حین ارتعاش می‌گردد. آدالیر و الجمال (۲۰۰۴) با انجام آزمایش سانتریفیوژ، به بررسی فشار آب حفره‌ای و نشست در خاک سست پرداختند و مشاهده کردند که با اضافه شدن ستون سنگی به خاک سست، فشار آب حفره‌ای و نشست کاهش می‌یابد. برنان و مادابوشی (۲۰۰۶) با انجام آزمایش سانتریفیوژ، به بررسی تأثیر اجرای ستون سنگی در عمق‌های مختلف یک لایه خاک روانگرا پرداختند. با توجه به نتایج آن‌ها، اجرای ستون سنگی در کل ضخامت لایه روانگرا کارایی بهتری دارد.

تحقیقات عددی و آزمایشگاهی زیادی در زمینه ظرفیت باربری ستون‌های سنگی صورت گرفته است. ستون سنگی، ظرفیت باربری خاک سست را افزایش و نشست را کاهش می‌دهد (اسماعیلی و همکاران، ۲۰۱۷؛ هاشمی نژاد و بهادری، ۲۰۱۹). استفاده از ستون‌های سنگی در خاک سست می‌تواند ظرفیت باربری را تا چهار برابر افزایش دهد (برگادو و همکاران، ۱۹۹۰). ظرفیت باربری ستون‌های سنگی از خاک احاطه‌کننده آن تأمین می‌شود (هوگز و ویدرز، ۱۹۷۴؛ هوگز و همکاران، ۱۹۷۵). جهت محاسبه ظرفیت باربری و نشست ستون‌های سنگی، یک ستون به همراه خاک احاطه‌کننده آن به‌عنوان یک سلول واحد در نظر گرفته می‌شود (بارکسدیل و باچوس، ۱۹۸۳؛ برگادو و لام، ۱۹۸۷). قضاوی و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی تأثیر مسلح‌سازی بر ستون‌های سنگی پرداختند. آن‌ها از ستون سنگی معمولی و ستون سنگی محصورشده استفاده کردند که محصورکننده به‌صورت قائم و به‌صورت لایه‌های افقی نصب شد. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده افزایش ظرفیت باربری

به دلیل استفاده از مسلح کننده در لایه های افقی است و همچنین ظرفیت باربری به دلیل افزایش تعداد لایه های مسلح کننده و کم کردن فضای بین لایه ها افزایش می یابد. جمشیدی چناری و همکاران (۲۰۱۹) با انجام آزمایش های آزمایشگاهی، به بررسی تغییرات ضریب کاهش نشست (SRF) و نسبت ظرفیت باربری (BCR) پرداختند. نتایج آزمایش های آن ها نشان دهنده افزایش ظرفیت باربری به علت افزایش تعداد ستون های سنگی است. همچنین، سختی بستر سست با افزایش تعداد ستون ها، افزایش می یابد و شیب نمودار بار- نشست، با افزایش تعداد ستون ها تندتر می شود. بهرامی و مرندي (۲۰۲۱) در مطالعه ای به منظور بهبود ویژگی های خاک های رمنده با استفاده از ستون سنگی مسلح شده با ژئوگرید، دریافتند که نشست ستون های سنگی محصور شده، با افزایش سختی ژئوگرید و نسبت سطح<sup>۱</sup> کاهش می یابد و نسبت سطح بهینه تقریباً ۱۵٪ است. همچنین، نتایج بیانگر آن است که مسلح کردن ستون های سنگی باعث افزایش فشار جانبی در خاک رمنده شده و از فروریختن ناگهانی ستون سنگی جلوگیری می کند. بهرامی و مرندي نیز به بررسی خاک ماسه ای سست بهسازی شده با بالشتک دانه ای غیرمسلح و مسلح شده با ژئوگرید، ستون سنگی اتکایی و ترکیبی پرداختند و دریافتند که مسلح سازی بالشتک با ژئوگرید ضمن متمایز نمودن شکل نمودارهای بار- نشست به سایر مطالعات مشابه، اثر قابل توجهی بر افزایش باربری و کاهش نشست نمونه ها داشته است.

همچنین، از ستون های سنگی برای افزایش مقاومت برشی خاک های سست استفاده می شود. موهاپاترا و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر نصب ستون های سنگی بر مقاومت برشی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان دهنده افزایش مقاومت برشی به علت نصب ستون های سنگی محصور شده و محصور نشده است.

دیناروند و اردکانی (۱۳۹۷) به بررسی تأثیر ستون های سنگی در رفتار برشی خاک ماسه ای دارای درصدهای مختلف لای پرداختند. با توجه به نتایج آن ها، ستون سنگی، سختی و مقاومت خاک را در حالت های محصور نشده و محصور شده با ژئوتکستایل در همی خاک ها افزایش می دهد. در حالت هایی که درصد لای در خاک بستر بیشتر است این افزایش، کمتر است. مقاومت مجموعه با افزایش اندازه دانه های ستون سنگی، افزایش می یابد. در حالت هایی که خاک بستر دارای درصد لای کمتری است و همچنین از مسلح کننده استفاده شده است، مقاومت مجموعه افزایش بیشتری دارد. اصلانی و نظری افشار (۱۴۰۰) با انجام آزمایش های برش مستقیم بزرگ مقیاس، رفتار برشی بستر ماسه ای سست مسلح شده با ستون سنگی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها حاکی از افزایش مقاومت برشی خاک بستر با حضور ستون سنگی و بهبود سختی و رفتار خاک بهسازی شده است. با افزایش نسبت ناحیه اصلاح شده، مقاومت برشی به مقدار بیشتری افزایش می یابد. همچنین، نتایج آن ها تأثیر نوع آرایش ستون های سنگی بر مقاومت برشی را نشان می دهد که در آرایش مربعی ستون های سنگی بیشترین افزایش مقاومت برشی و زمانی که از ستون سنگی به صورت منفرد استفاده شده است، کمترین افزایش مقاومت برشی رخ می دهد.

جهت افزایش کارایی ستون های سنگی نیاز به استفاده از محصورکننده های جدید و مقاوم تر و همچنین مصالح با خواص مهندسی خوب احساس می شود. بنابراین، در مطالعه حاضر، از کامپوزیت مسلح شده پلیمری (FRP) و ژئوتکستایل استفاده شد و اثر محصور سازی به وسیله FRP با اثر محصور سازی به وسیله ژئوتکستایل مقایسه می شود. علاوه بر این، خرده لاستیک و خاکستر بادی به صورت هم زمان به مصالح دانه ای موجود در ستون های سنگی اضافه می شود و اثر آن با حالتی که از این مصالح

<sup>۱</sup> - Aspect ratio

درون ستون‌ها استفاده نمی‌شود، مقایسه می‌گردد. همچنین، به بررسی تأثیر افزایش تنش نرمال، گروه و نسبت جانمایی بر افزایش مقاومت برشی مجموعه پرداخته می‌شود.

## ۲. مصالح و روش‌ها

### ۱-۲. مشخصات خاک بستر

خاک مورد استفاده در این تحقیق از معدن خاک رس درستکار شهر یزد تهیه شد. مشخصات و دانه‌بندی خاک بستر به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۱ ارائه شده است.

### ۲-۲. مشخصات مصالح مورد استفاده در ستون

#### سنگی

#### ۱-۲-۲. مشخصات مصالح دانه‌ای

در این پژوهش، از دو نوع دانه‌بندی برای مصالح دانه‌ای

مورد کاربرد در ستون‌های سنگی استفاده شد. برای ستون سنگی با قطر بزرگ‌تر (SC1)، مصالح عبوری از الک  $\frac{3}{8}$  و مانده روی الک  $\frac{10}{16}$  انتخاب شد و از آنجایی که تأثیر دانه‌بندی بر رفتار برشی ستون‌های سنگی در این پژوهش مورد بررسی قرار نمی‌گیرد، سعی شده تا نسبت قطر مصالح دانه‌ای به قطر ستون سنگی، در مصالح مورد استفاده در ستون سنگی با قطر کوچک‌تر (SC2) برابر با مصالح مورد استفاده در ستون سنگی با قطر بزرگ‌تر باشد. از این‌رو، مصالح دانه‌ای عبوری از الک  $\frac{1}{4}$  و مانده روی الک  $\frac{16}{16}$  برای ستون سنگی با قطر کوچک‌تر انتخاب شد. مشخصات مصالح دانه‌ای در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است که مصالح سنگی طوری انتخاب شده که مطابق با ASTM-D-4767 باشد.

جدول ۱. مشخصات خاک بستر

| پارامتر                                    | مقدار |
|--------------------------------------------|-------|
| حد روانی (%)                               | ۲۴/۱۳ |
| حد خمیری (%)                               | ۱۳/۸۳ |
| شاخص خمیری (%)                             | ۱۰/۳  |
| حداکثر وزن مخصوص خشک ( $\frac{gr}{cm^3}$ ) | ۱/۸۵  |
| رطوبت بهینه (%)                            | ۱۸/۲  |
| مقاومت برشی زهکشی نشده (kPa)               | ۱۵    |
| چگالی ویژه                                 | ۲/۷۲  |
| طبقه‌بندی خاک                              | CL    |

جدول ۲. دانه‌بندی، طبقه‌بندی و مشخصات فیزیکی مصالح دانه‌ای

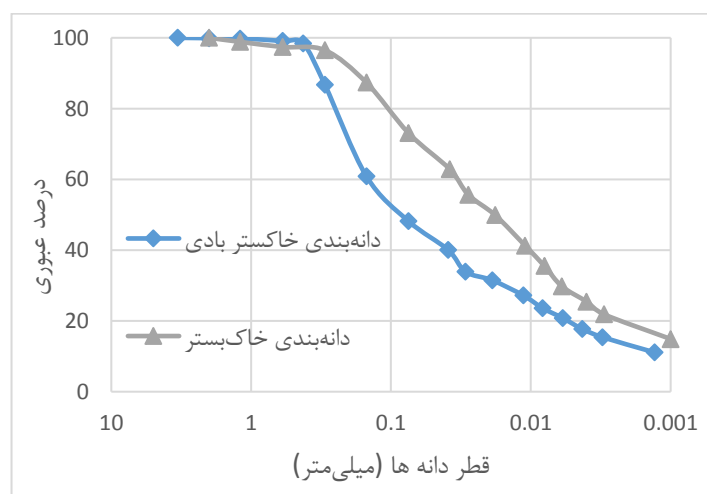
| PSD2 | PSD1 | مشخصات                                     |
|------|------|--------------------------------------------|
| ۱/۷۴ | ۱/۷۷ | وزن مخصوص خشک ( $\frac{gr}{cm^3}$ )        |
| SP   | GP   | طبقه‌بندی متحد                             |
| ۱/۶  | ۲/۴  | اندازه مؤثر دانه‌ها (mm) D10               |
| ۳/۳  | ۵/۵  | اندازه میانگین دانه‌ها (mm) D50            |
| ۱/۷۸ | ۱/۸۲ | حداکثر وزن مخصوص خشک ( $\frac{gr}{cm^3}$ ) |
| ۱/۶۱ | ۱/۵۸ | حداقل وزن مخصوص خشک ( $\frac{gr}{cm^3}$ )  |
| ۸۰   | ۸۰   | تراکم نسبی (%)                             |

## ۲-۲-۲. مشخصات خاکستر بادی

یکی دیگر از مواد مورد استفاده در ستون‌های سنگی، خاکستر بادی است. برای تعیین دانه‌بندی خاکستر بادی، از دانه‌بندی مکانیکی برای قسمت درشت‌دانه آن مطابق استاندارد ASTM D422 و آزمایش هیدرومتری مطابق استاندارد ASTM D422-63 برای قسمت ریزدانه آن استفاده شد. منحنی دانه‌بندی خاکستر بادی در شکل ۱ نشان داده شده است.

## ۳-۲-۲. مشخصات خرده لاستیک

از دو نوع دانه‌بندی برای خرده لاستیک در ستون‌های سنگی استفاده شد. در ستون‌های سنگی با قطر بزرگ‌تر (SC1) از خرده لاستیک با اندازه‌های ۳-۵ میلی‌متر و در ستون سنگی با قطر کوچک‌تر (SC2) از خرده لاستیک با اندازه‌های ۱-۳ میلی‌متر استفاده شد. خرده لاستیک استفاده‌شده در ستون‌های سنگی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک بستر و خاکستر بادی



شکل ۲. خرده لاستیک استفاده‌شده در ستون‌های سنگی

## ۲-۳. مشخصات پوشش‌های محصورکننده

### ۲-۳-۱. پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف (FRP<sup>۱</sup>)

جهت مسلح‌سازی ستون‌های سنگی، از دو نوع مسلح‌کننده استفاده شد. نوع اول مسلح‌کننده از جنس FRP است که برای ساخت آن از الیاف شیشه، رزین، اسید، کبالت و لوله پلاستیکی برای فرم دادن به FRP استفاده می‌شود. الیاف شیشه مصرفی از نوع سوزنی پودری (CSM-P450) است. جهت ساختن این نوع مسلح‌کننده ابتدا لوله‌های پلاستیکی هم‌اندازه با قطر ستون‌های سنگی به روغن آغشته می‌شوند. سپس، جهت آماده‌سازی چسب، ۱٪ اسید و ۱٪ کبالت به رزین اضافه می‌شود و چسب تهیه‌شده روی لوله پلاستیکی پخش می‌شود. بعد از آن، الیاف شیشه با ارتفاعی به‌اندازه ارتفاع ستون‌های

سنگی روی لوله پلاستیکی آغشته به چسب قرار داده می‌شود، یک لایه چسب روی الیاف شیشه پخش می‌شود و یک لایه الیاف روی لایه قبل قرار داده می‌شود. لایه سوم یا لایه آخر هم به‌مانند لایه‌های قبل اجرا می‌شود و یک لایه چسب روی آن پخش می‌شود و به مدت ۱۲ ساعت به نمونه ساخته‌شده اجازه خشک شدن داده می‌شود. پس از خشک شدن نمونه، FRP ساخته‌شده از لوله جدا می‌شود.

### ۲-۳-۲. ژئوتکستایل

نوع دیگر مسلح‌کننده، مسلح‌کننده از جنس ژئوتکستایل بافته‌نشده<sup>۲</sup> است که مشخصات آن در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات ژئوتکستایل

| مقدار | واحد             | مشخصه                          |
|-------|------------------|--------------------------------|
| ۲۵۰   | g/m <sup>2</sup> | جرم در واحد سطح                |
| ۳     | mm               | ضخامت                          |
| ۱۳    | KN/m             | حداکثر کشش در جهت طول          |
| ۱۶    | KN/m             | حداکثر کشش در جهت عرض          |
| ۹۲    | %                | حداکثر ازدیاد پارگی در جهت طول |
| ۹۰    | %                | حداکثر ازدیاد پارگی در جهت عرض |

<sup>۲</sup> Non-woven geotextile

<sup>۱</sup> Fiber Reinforced Polymers

## ۲-۴. روش انجام آزمایش‌ها

جهت نصب ستون‌های سنگی معمولی ابتدا لوله‌های پلاستیکی به روغن آغشته شد و با توجه به آرایش ستون، در محل مخصوص خود درون جعبه برش قرار داده شد. در ستون‌های سنگی مسلح‌شده، مسلح‌کننده در اطراف لوله پلاستیکی قرار می‌گیرد و پس از قرار دادن لوله درون جعبه برش، خاک رس در پنج لایه در اطراف لوله ریخته شد و توسط کوبه متراکم شد. پس از اجرا شدن خاک بستر به صورت کامل در اطراف ستون، مصالح مورد استفاده در ستون، با توجه به وزن محاسبه‌شده با هم مخلوط شده و در پنج لایه درون ستون ریخته و متراکم می‌شوند. پس از کوبیدن هر لایه، لوله پلاستیکی به آرامی مقداری به سمت بالا جابجا می‌شود و لایه بعد ریخته و متراکم می‌شود. این روند تا اجرا شدن ستون سنگی به صورت کامل ادامه پیدا می‌کند (شکل ۳).

در این پژوهش، از دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس

با جعبه‌ای به ابعاد  $30 \times 30 \times 15$  سانتی‌متر استفاده شد. دستگاه برش مستقیم استفاده‌شده در این پژوهش در شکل ۴ نشان داده شده است. با آماده شدن نمونه‌ها درون جعبه برش، بارگذاری قائم روی نمونه‌ها انجام شد و تنش‌های نرمال ۲۰، ۴۰ و ۷۰ کیلوپاسکال روی نمونه‌ها اعمال شد. بارگذاری قائم روی نمونه‌ها تا ثابت شدن نشست‌ها ادامه یافت و پس از ثابت شدن نشست قائم، بارگذاری جانبی به نمونه اعمال شد. بارگذاری جانبی با سرعت ۲ میلی‌متر بر دقیقه مطابق استاندارد ASTM D3080 صورت پذیرفت و تا جابجایی ۴۰ میلی‌متر بارگذاری جانبی ادامه یافت. با رسیدن جابجایی افقی نمونه به ۴۰ میلی‌متر، بارگذاری جانبی متوقف شد و آزمایش پایان یافت.

## ۳. بررسی و تحلیل نتایج

### ۳-۱. تعیین درصد بهینه خرده لاستیک و خاکستر

#### بادی



شکل ۳. نمونه ساخته‌شده برای حالت ستون سنگی منفرد با قطر ۱۱۰ میلی‌متر: الف) خرده لاستیک و ب) مصالح سنگی





شکل ۴. دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس

در ستون سنگی است.

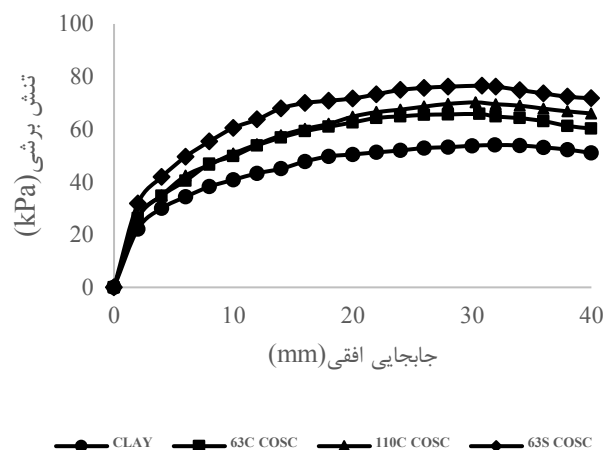
### ۲-۳. بررسی رفتار برشی بستر بهسازی‌شده با

#### ستون‌های سنگی مرکب محصورنشده

در این بخش، به بررسی نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس روی بستر مسلح‌شده به ستون‌های سنگی معمولی (محصورنشده) پرداخته می‌شود. نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس روی بستر بهسازی‌شده با ستون سنگی مرکب تحت تنش ۷۰ کیلوپاسکال در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با اضافه شدن ستون سنگی در نسبت‌های جانشینی مختلف، مقاومت برشی افزایش می‌یابد. با توجه به این شکل، با مسلح شدن بستر سست به ستون سنگی مرکب به قطر ۶۳ میلی‌متر، مقاومت برشی به میزان ۲۱/۸۴ درصد افزایش می‌یابد و با نصب ستون سنگی مرکب منفرد به قطر ۱۱۰ میلی‌متر و گروه ستون‌های سنگی در بستر سست، مقاومت برشی به ترتیب به میزان ۳۰ درصد و ۴۱/۸ درصد افزایش می‌یابد.

جهت مشخص کردن درصد بهینه خرده لاستیک، مقادیر ۱، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد خرده لاستیک و برای تعیین درصد بهینه خاکستر بادی مقادیر ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵ و ۲۰ درصد خاکستر بادی به مصالح دانه‌ای موجود در ستون‌های سنگی به قطر ۱۱۰ میلی‌متر اضافه شد و آزمایش‌های برش مستقیم روی بستر مسلح‌شده به ستون‌های سنگی تحت تنش نرمال ۷۰ کیلوپاسکال انجام شد.

پس از انجام آزمایش‌ها، مقدار ۱۲/۵ درصد برای خرده لاستیک و ۲/۵ درصد برای خاکستر بادی به دلیل افزایش بیشتر مقاومت برشی نسبت به دیگر درصدهای این مصالح، جهت استفاده هم‌زمان در ستون‌های سنگی مرکب انتخاب شد. قابل ذکر است که در تمامی حالت‌ها ممکن است این مقادیر بهینه نباشند و به دلیل افزایش یافتن زمان و حجم محاسبات جهت تعیین درصد بهینه تمامی حالت‌ها، با استفاده از این روش سعی شده تا درصد خطا کاهش یابد. همچنین، شایان ذکر است که درصدهای خرده لاستیک به صورت حجمی و درصدهای خاکستر بادی به صورت وزنی از مصالح دانه‌ای موجود



شکل ۵. نمودار تنش برشی - جابجایی بستر رسی مسلح شده با ستون‌های مرکب معمولی در تنش نرمال ۷۰ کیلوپاسکال

محصورشده و محصورنشده با قطر ۱۱۰ میلی‌متر، تحت تنش نرمال ۷۰ کیلوپاسکال، را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که زمانی که ستون سنگی به صورت محصورنشده نصب شده است، مقاومت برشی به میزان ۲۹/۹۹ درصد افزایش می‌یابد و با محصور شدن ستون‌ها به وسیله FRP و ژئوتکستایل، مقاومت برشی به ترتیب به میزان ۶۲/۳۳ درصد و ۵۵/۵۶ درصد افزایش می‌یابد.

شکل ۶- ب نتایج آزمایش روی ستون سنگی با قطر ۶۳ میلی‌متر را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود زمانی که ستون سنگی به صورت محصورنشده نصب شده، مقاومت برشی به میزان ۲۱/۸۴ درصد افزایش می‌یابد و با محصور شدن ستون‌ها به وسیله FRP و ژئوتکستایل، مقاومت برشی به ترتیب به میزان ۵۲/۲ درصد و ۴۸/۵۴ درصد افزایش می‌یابد.

شکل ۶- ج نتایج را برای گروه ستون‌های سنگی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود زمانی که ستون‌های سنگی به صورت محصورنشده نصب شده‌اند، مقاومت برشی به میزان ۴۱/۷۶ درصد افزایش می‌یابد و با محصور شدن ستون‌ها به وسیله FRP و ژئوتکستایل، مقاومت برشی به ترتیب به میزان ۷۴/۷۸ درصد و ۶۹/۵۹ درصد افزایش می‌یابد.

### ۳-۳. تأثیر محصورشدگی ستون‌های سنگی مرکب

#### بر رفتار برشی مجموعه

با مسلح‌سازی ستون‌های سنگی به وسیله FRP و ژئوتکستایل بافته‌نشده، سختی ستون سنگی نسبت به حالتی که از مسلح‌کننده استفاده نشده است، افزایش می‌یابد. مسلح‌کننده‌ها، با افزایش سختی مجموعه و همچنین حفظ بافت متراکم ستون سنگی و جلوگیری از ورود ذرات خاک اطراف به درون ستون در هنگام برش و ترکیب آن با مصالح ستون، باعث می‌شوند مجموعه در جابجایی کمتری به حداکثر مقاومت برشی خود برسد.

نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس روی بستر بهسازی‌شده با ستون‌های سنگی محصورشده تحت تنش نرمال ۷۰ کیلوپاسکال در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که هر دو نوع مسلح‌کننده در تمامی حالت‌ها موجب بهبود رفتار برشی می‌شوند و مسلح‌کننده از جنس FRP نسبت به مسلح‌کننده ژئوتکستایلی مقاومت برشی مجموعه را به دلیل صلیبت و سختی بیشتر و حفظ بافت مقاوم و متراکم ستون، به میزان بیشتری افزایش می‌دهد.

شکل ۶- الف نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس روی بستر بهسازی‌شده با ستون‌های سنگی

### ۳-۴. بررسی اثر افزایش تنش نرمال بر مقاومت

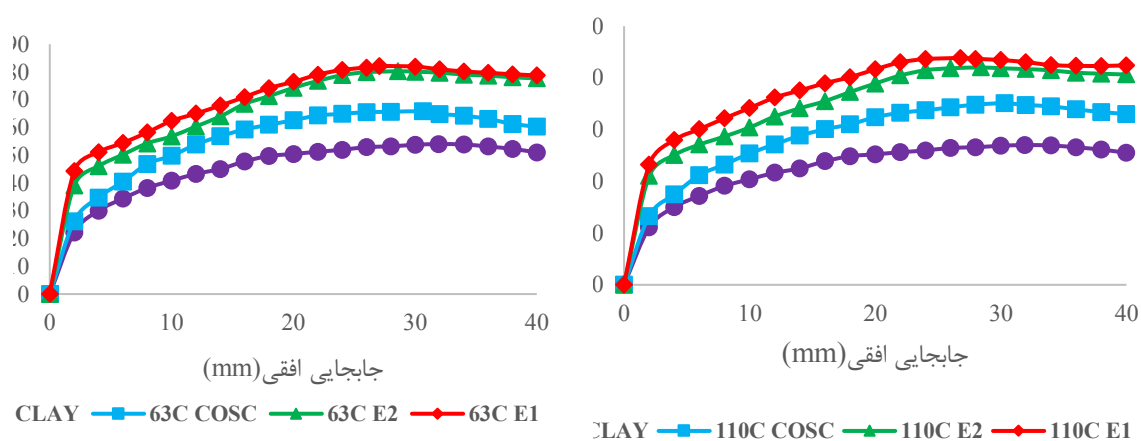
#### مجموعه

بدیهی است که با افزایش یافتن تنش نرمال، تنش برشی نیز افزایش می‌یابد و این افزایش با توجه به قطرهای مختلف ستون سنگی، آرایش و نوع مسلح‌کننده متفاوت است. در حالت‌هایی که از ستون سنگی به‌صورت محصورشده استفاده شده است، با افزایش یافتن مقدار تنش نرمال، کرنش شعاعی مسلح‌کننده افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند سختی ستون را افزایش دهد و موجب جذب بیشتر تنش برشی شود و در نهایت مقاومت برشی افزایش یابد. منحنی تنش برشی - جابجایی بستر بهسازی‌شده با ستون‌های سنگی مرکب با قطر ۱۱۰ میلی‌متر و در شرایط مسلح‌نشده، مسلح‌شده با FRP و مسلح‌شده با ژئوتکستایل تحت تنش‌های ۲۰، ۴۰ و ۷۰ کیلوپاسکال در شکل ۷ ارائه شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که با افزایش تنش نرمال، سختی مجموعه ستون سنگی و خاک اطراف آن افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش تنش نرمال، مقاومت برشی نیز افزایش می‌یابد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش تنش نرمال از ۲۰ کیلوپاسکال به ۴۰ کیلوپاسکال، مقاومت برشی در هر سه نمونه حدود ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش تنش نرمال از ۲۰ کیلوپاسکال به ۷۰ کیلوپاسکال، مقاومت برشی مجموعه در حالت‌های محصورنشده و محصورشده بیش از ۱۰۰ درصد افزایش

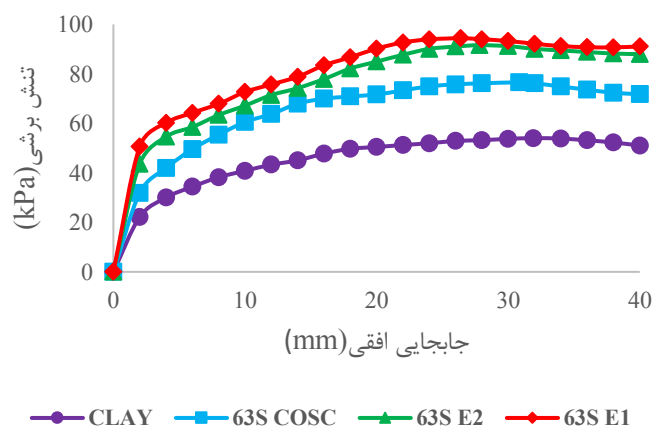
یافته است.

### ۳-۵. بررسی اثر نسبت جانشینی

با نصب ستون‌های سنگی، مصالح مقاوم‌تر جایگزین مصالح سست می‌شوند و در هنگام اعمال تنش‌های برشی، بیشتر این تنش‌ها جذب این مصالح می‌شوند و مقاومت برشی مجموعه افزایش می‌یابد. بنابراین، با افزایش حجم مصالح مقاوم و کاهش حجم مصالح سست، مقاومت برشی به میزان بیشتری افزایش می‌یابد. تحقیقات گذشته نشان‌دهنده افزایش مقاومت برشی به علت افزایش سطح اشغال‌شده توسط ستون‌های سنگی است. شکل‌های ۸ و ۹ تأثیر افزایش نسبت جانشینی ستون‌های سنگی مرکب معمولی و محصورشده بر مقاومت برشی را تحت تنش‌های نرمال ۲۰ و ۷۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهند. با توجه به این شکل‌ها، مشاهده می‌شود که در هر سه حالت محصورنشده و محصورشده با ژئوتکستایل و FRP، با افزایش یافتن درصد نسبت جانشینی و حجم اشغال‌شده توسط ستون‌های سنگی، مقاومت برشی مجموعه افزایش می‌یابد. همچنین، مشاهده می‌شود که در حالت‌هایی که از گروه ستون سنگی استفاده شده، مقاومت برشی با شیب بیشتری افزایش می‌یابد. زمانی که ستون‌های سنگی به‌صورت گروه نصب می‌شوند، خاک بین آن‌ها توسط ستون‌ها محصور می‌شود و باعث می‌شوند ستون‌ها و خاک بین آن‌ها به‌عنوان مصالح ترکیبی مقاوم عمل کنند.



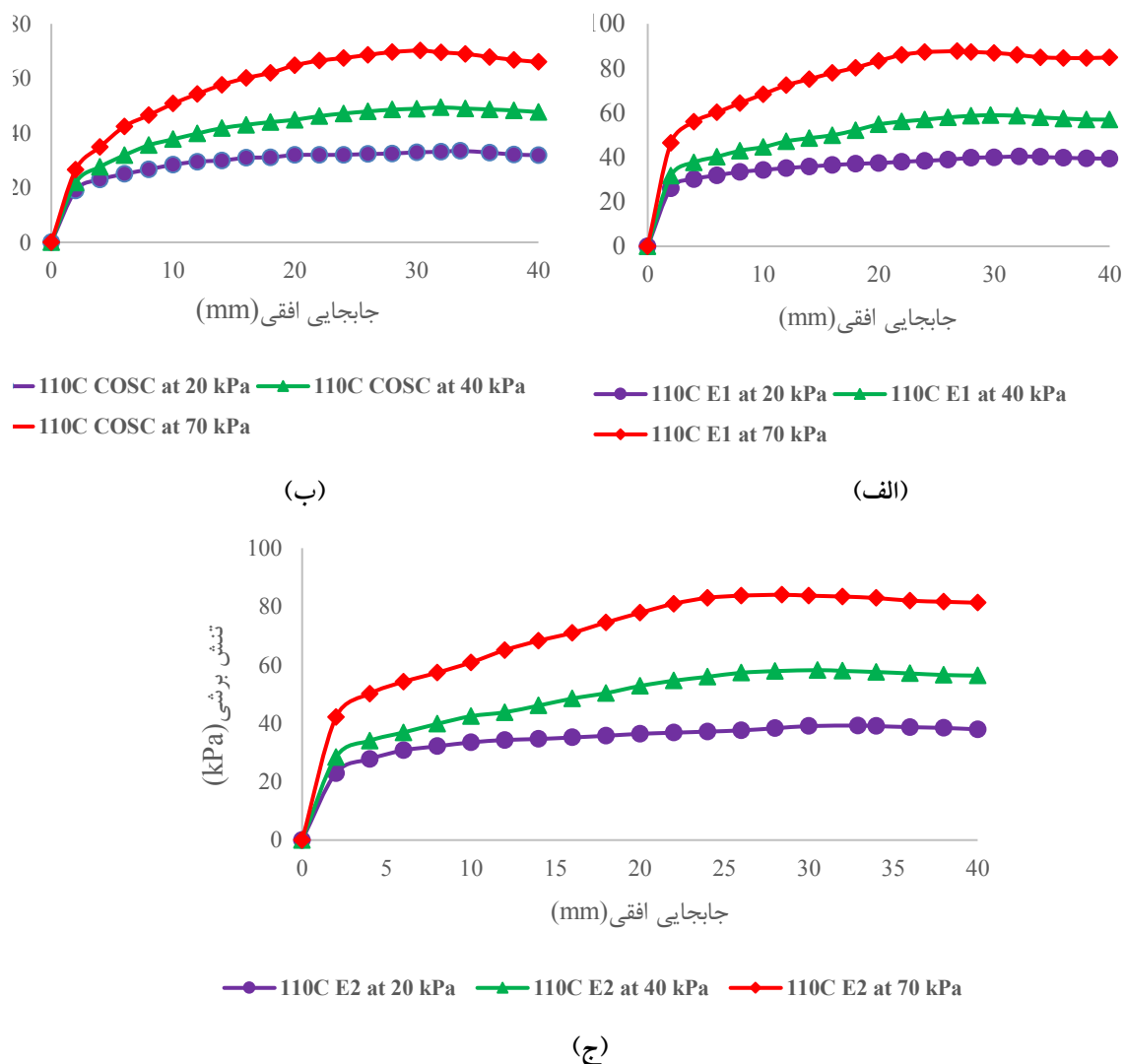
(الف) (ب)



(ج)

شکل ۶. منحنی تنش برشی - جابجایی بستر بهسازی شده با ستون‌های محصور نشده و محصور شده تحت تنش نرمال ۷۰ کیلو پاسکال:

الف) منفرد با قطر ۱۱۰ mm، ب) منفرد با قطر ۶۳ mm و ج) گروه



شکل ۷. منحنی تنش برشی - جابجایی بستر بهسازی شده با ستون‌های با قطر ۱۱۰ میلی‌متر تحت تنش‌های نرمال مختلف:  
(الف) مسلح شده با FRP، (ب) مسلح نشده و (ج) مسلح شده با ژئوتکستایل

### ۳-۶. بررسی اثر گروه ستون سنگی مرکب بر رفتار

#### برشی مجموعه

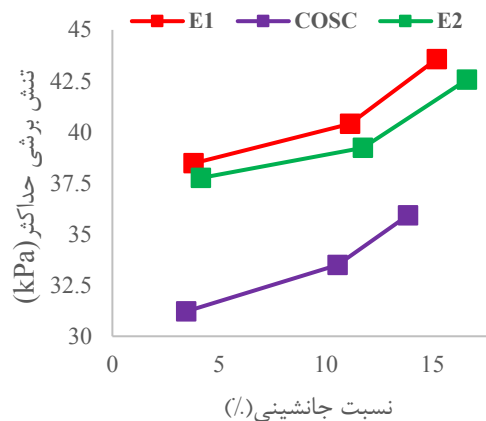
در یک نسبت جانشینی برابر بین ستون‌های سنگی منفرد و گروه ستون‌های سنگی، گروه ستون‌های سنگی عملکرد بهتری دارد (موهاپاترا و همکاران، ۲۰۱۶). خاکی که در بین گروه ستون‌های سنگی قرار گرفته است توسط ستون‌های سنگی احاطه می‌شود و باعث ایجاد محصورشدگی خاک در این قسمت از مجموعه می‌گردد و در نتیجه در هنگام اعمال تنش‌های برشی، خاک این

قسمت مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. همچنین، نتایج آزمایش روی گروه ستون سنگی و ستون سنگی منفرد نشان می‌دهد که با حضور گروه، مقاومت برشی مجموعه نسبت به حالت منفرد افزایش می‌یابد؛ به‌طوری که مقایسه رفتار برشی بستر بهسازی با ستون‌های سنگی مرکب معمولی با قطر ۱۱۰ میلی‌متر که نسبت جانشینی آن ۱۰/۵ درصد است با گروه ستون‌های سنگی که نسبت جانشینی آن ۱۳/۸ درصد است، در تنش نرمال ۷۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد که در حالتی که از ستون سنگی منفرد استفاده شده، مقاومت برشی مجموعه به میزان

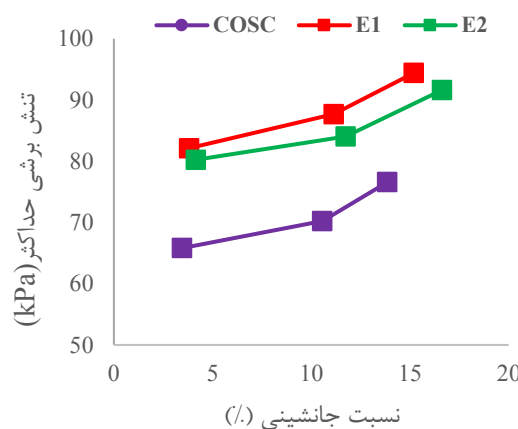
خرده لاستیک به ستون‌های سنگی معمولی  
با استفاده از مواد بازیافتی<sup>۱</sup> که ویژگی‌های مهندسی خوب  
و قابل توجهی دارند می‌توان کارایی ستون‌های سنگی را  
افزایش داد.

۲۹/۹۹ درصد افزایش می‌یابد. در حالی که با نصب  
گروه‌های سنگی، مقاومت مجموعه به میزان ۴۱/۷۶  
درصد افزایش می‌یابد.

### ۷-۳. بررسی تأثیر اضافه شدن خاکستر بادی و



شکل ۸. تغییرات تنش برشی حداکثر با افزایش نسبت جانشینی ستون‌ها در تنش نرمال ۲۰ کیلوپاسکال [۲]



شکل ۹. تغییرات تنش برشی حداکثر با افزایش نسبت جانشینی ستون‌ها در تنش نرمال ۷۰ کیلوپاسکال

شکل ۱۰ نشان‌دهنده افزایش مقاومت برشی به علت  
اضافه شدن خاکستر بادی و خرده لاستیک به ستون‌های  
سنگی است. در این شکل، نتایج مربوط به اضافه شدن  
خرده لاستیک و خاکستر بادی به ستون سنگی معمولی با  
قطر ۶۳ میلی‌متر تحت تنش نرمال ۷۰ کیلوپاسکال ارائه  
شده است. در حالتی که این مواد اضافه نشده، مقاومت

همچنین، استفاده از این مواد بازیافتی می‌تواند به  
حفظ محیط‌زیست و اقتصادی کردن طرح کمک کند. در  
این بخش، به بررسی تأثیر اضافه شدن خرده لاستیک و  
خاکستر بادی به مصالح دانه‌ای موجود در ستون‌های  
سنگی و همچنین تأثیر آن‌ها بر مقاومت برشی پرداخته  
می‌شود.

<sup>1</sup>- Recycled materials

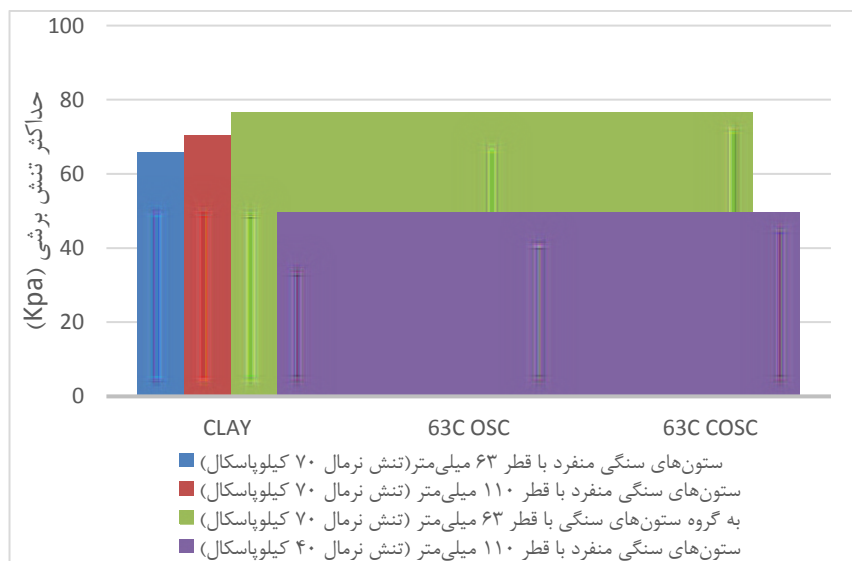
مجموعه به‌اندازه ۱۹/۴ درصد افزایش می‌یابد و زمانی که این مصالح به ستون‌های سنگی اضافه می‌شوند و ستون سنگی به‌صورت مرکب نصب می‌شود، مقاومت برشی به اندازه ۲۹/۳۲ درصد افزایش می‌یابد.

لازم به ذکر است که استفاده از ضایعات تایر در علوم مهندسی با توجه به ویژگی‌های مهندسی قابل توجه تایرهای لاستیکی از جمله شکل‌پذیری، سبکی و مقاومت کششی زیاد و همچنین کمک به حل مشکلات زیست‌محیطی حائز اهمیت است و می‌توان از آن‌ها در ستون‌های سنگی، دیوار حائل، بستر راه‌ها، شیب‌ها و پی-ها، برای بهبود پارامترهای رفتاری و بهبوددهنده مصالح دانه‌ای مورد توجه قرار گیرد. همچنین، از آنجایی که خاکستر بادی دارای ترکیباتی از سیلیس، آلومینیوم و آهن است، به همراه خرده لاستیک باعث افزایش مقاومت برشی خاک‌های ضعیف می‌گردد. علاوه بر این، علت بهبود مقاومت برشی خاک در اثر استفاده از خرده لاستیک در ستون سنگی، جذب انرژی زیاد است و علت بهبود مقاومت برشی خاک در اثر استفاده از خاکستر بادی، حاوی بودن فلزات و پر کردن فضای خالی در ستون‌های سنگی است.

برشی ۱۷/۲۸ درصد افزایش یافته و با افزودن این مواد مقاومت برشی ۲۱/۸۴ درصد افزایش یافته است.

همچنین، در شکل ۱۰، نتایج ترکیب این مواد با مصالح ستون سنگی در ستون‌هایی به قطر ۱۱۰ میلی‌متر در تنش نرمال ۷۰ کیلوپاسکال نشان داده شده است. ستون سنگی معمولی مقاومت برشی را ۲۲/۲۹ درصد و ستون سنگی مرکب معمولی مقاومت برشی را ۲۹/۹۹ درصد افزایش می‌دهد. علاوه بر این، با توجه به شکل ۱۰، مشاهده می‌گردد که گروه ستون‌های سنگی معمولی مقاومت برشی مجموعه را تحت تنش نرمال ۷۰ کیلوپاسکال به میزان ۳۱/۹۴ درصد افزایش می‌دهد و با افزودن خاکستر بادی و خرده لاستیک به ستون، مقاومت برشی ۴۱/۷۶ درصد افزایش یافته است.

در شکل ۱۰، تأثیر افزوده شدن خرده لاستیک و خاکستر بادی در تنش نرمال ۴۰ کیلوپاسکال نیز نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مقاومت برشی به علت اضافه شدن خرده لاستیک و خاکستر بادی به ستون‌های سنگی افزایش می‌یابد. زمانی که این مصالح به ستون‌های سنگی اضافه نشده‌اند و ستون‌های سنگی به‌صورت معمولی نصب می‌شوند، مقاومت برشی



شکل ۱۰. تأثیر اضافه شدن خرده لاستیک و خاکستر بادی به ستون‌های سنگی در حالات مختلف

#### ۴. نتیجه گیری

یافت و با محصورسازی ستون‌ها، مقاومت برشی تا ۷۴/۷ درصد زیاد شد.

- اضافه کردن خرده لاستیک و خاکستر بادی به ستون‌های سنگی، مقاومت برشی را ۴/۶ الی ۱۰ درصد افزایش داد.
- گروه ستون‌ها به دلیل نسبت جانشینی بیشتر در مقایسه با حالت منفرد و ایجاد محصورشدگی برای خاک بین ستون‌ها، مقاومت برشی را نسبت به حالت منفرد به میزان بیشتری افزایش داد.
- با افزایش یافتن نسبت جانشینی و حجم اشغال‌شده توسط ستون‌های سنگی، مقاومت برشی به میزان بیشتری افزایش یافت.
- با افزایش تنش نرمال از ۲۰ کیلوپاسکال به ۷۰ کیلوپاسکال، مقاومت برشی بیش از دو برابر افزایش یافت.

از آنجایی که استفاده از ستون‌های سنگی باعث بهبود پارامترهای مکانیکی و مقاومتی خاک می‌شود، روشی مناسب و اقتصادی برای اصلاح خاک بستر جاده است. بنابراین، این مطالعه با هدف بررسی تأثیر استفاده هم‌زمان از خرده لاستیک و خاکستر بادی بر عملکرد برشی ستون سنگی محصور انجام شده است و پارامترهایی مانند تأثیر مقدار خرده لاستیک و خاکستر بادی، محصور شدن ستون سنگی، افزایش تنش نرمال و نسبت جایگزینی بر عملکرد برشی ستون‌های سنگی نیز مورد بررسی قرار گرفتند. خلاصه نتایج این تحقیق به شرح زیر است:

- با نصب ستون‌های سنگی مرکب معمولی در بستر رسی، مقاومت برشی تا ۳۰ درصد افزایش یافت و با مسلح‌سازی آن‌ها، مقاومت برشی به اندازه ۶۳/۳ درصد افزایش یافت.
- با نصب گروه ستون‌های سنگی مرکب محصورنشده در بستر رسی، مقاومت برشی تا ۴۱/۷ درصد افزایش

#### ۵. مراجع

- اصلانی، م. و نظری افشار، ج. ۱۴۰۰. "مطالعه آزمایشگاهی تأثیر نسبت تمرکز تنش در مقاومت برشی بستر ماسه‌ای مسلح شده با ستون". ۱۵(۱): ۳۵-۶۶.
- حاجی عزیزی، م. و نصیری، م. ۱۳۹۴. "کاربرد ستون سنگی در مقاوم‌سازی و افزایش ظرفیت باربری جاده‌ها". جاده، ۲۳(۸۳): ۷۷-۶۵.
- دیناروند، ر. و اردکانی، ع. ۱۳۹۷. "رفتار ستون‌های دانه‌ای محصورشده با ژئوستتیک در خاک ماسه لای دار تحت آزمایش برش مستقیم". نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۰(۵): ۹۷۲-۹۶۱.
- Abbas, H. O. 2020. "Laboratory study on reinforced expansive soil with granular pile anchors". Int. J. Eng., 33(7): 1167-1172. <https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.07a.01>
- ASTM D4767. 2011. "Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils". ASTM International.
- Adalier K, Elgamel A. Mitigation of liquefaction and associated ground deformations by stone columns. Engineering Geology. 2004;72(3):275-91. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795203002023>
- Bahrami, M. and Marandi, S. M. 2021. "Large-scale experimental study on collapsible soil improvement using encased stone columns". Int. J. Eng., 34(5): 1145-1155. <https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.05b.08>
- Barksdale, R. D. and Bachus, R. C. 1983. "Design and construction of stone columns". US Department of Transportation.
- Bergado, D. T. and Lam, F. L. 1987. "Full scale load test of granular piles with different densities and different proportions of gravel and sand on soft Bangkok clay". Soils Foundations, 27(1): 86-93.



- <https://doi.org/https://doi.org/10.3208/sandf1972.27.86>
- Bergado, D. T., Singh, N., Sim, S. H., Panichayatum, B., Sampaco, C. L. and Balasubramaniam, A. S. 1990. "Improvement of soft Bangkok clay using vertical geotextile band drains compared with granular piles". *Geotext. Geomembranes*, 9(3): 203-231. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0266-1144\(90\)90054-G](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0266-1144(90)90054-G)
- Brennan, A. J. and Madabhushi, S. P. G. 2006. "Liquefaction remediation by vertical drains with varying penetration depths". *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 26(5): 469-475. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2005.10.001>
- Dungca, J. R., Kuwano, J., Takahashi, A., Saruwatari, T., Izawa, J., Suzuki, H. and Tokimatsu, K. 2006. "Shaking table tests on the lateral response of a pile buried in liquefied sand". *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 26(2): 287-295. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2005.02.021>
- Esmaili, M., Khajehi, H. and Astaraki, F. 2017. "The effectiveness of deep soil mixing on enhanced bearing capacity and reduction of settlement on loose sandy soils". *Int. J. Railway Res.*, 4(2): 33-39.
- Ghazavi, M., Ehsani Yamchi, A. and Nazari Afshar, J. 2018. "Bearing capacity of horizontally layered geosynthetic reinforced stone columns". *Geotext. Geomembranes*, 46(3): 312-318. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.01.002>
- Hasheminezhad, A. and Bahadori, H. 2019. "Seismic response of shallow foundations over liquefiable soils improved by deep soil mixing columns". *Comput. Geotech.*, 110: 251-273. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.02.019>
- Hughes, J. M. O. and Withers, N. J. 1974. "Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns". *Ground Eng.*, 7(3).
- Hughes, J. M. O., Withers, N. J. and Greenwood, D. A. 1975. "A field trial of the reinforcing effect of a stone column in soil". *Geotech.*, 25(1): 31-44.
- Jamshidi Chenari, R., Karimpour Fard, M., Jamshidi Chenari, M. and Shamsi Sosahab, J. 2019. "Physical and numerical modeling of stone column behavior in loose sand". *Int. J. Civ. Eng.*, 17(2): 231-244. <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0223-6>
- Juinarongrit, T. and Ashford, S. A. 2006. "Soil-pile response to blast-induced lateral spreading. I: Field test". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 132(2): 152-162. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10900241\(2006\)132:2\(152\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900241(2006)132:2(152))
- Kirsch, K. and Kirsch, F. 2017. "Ground improvement by deep vibratory methods". Taylor & Francis.
- Mohapatra, S. R., Rajagopal, K. and Sharma, J. 2016. "Direct shear tests on geosynthetic-encased granular columns". *Geotext. and Geomembranes*, 44(3): 396-405. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.01.002>
- Rollins, K. M., Gerber, T. M., Lane, J. D. and Ashford, S. A. 2005. "Lateral resistance of a full-scale pile group in liquefied sand". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 131(1): 115-125. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:1\(115\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:1(115))
- Seed, H. B. and Booker, J. R. 1977. "Stabilization of potentially liquefiable sand deposits using gravel drains". *J. Geotech. Eng. Div.*, 103(7): 757-768. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000453>
- Zhou, Y. G., Liu, K., Sun, Z. B. and Chen, Y. M. 2021. "Liquefaction mitigation mechanisms of stone column-improved ground by dynamic centrifuge model tests". *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 150; 106946. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106946>

