

## رفتار ستون‌های دانه‌ای محصورشده با ژئوستتیک در خاک ماسه لای‌دار تحت آزمایش برش مستقیم

رضا دیناروند، علیرضا اردکانی\*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۱ خرداد ۱۳۹۶  
بازنگری: ۱۷ شهریور ۱۳۹۶  
پذیرش: ۲۰ شهریور ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۲۸ شهریور ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

ستون دانه‌ای  
محصور شدگی  
ژئوتکتایل  
مقاومت برشی  
ماسه لای‌دار

**چکیده:** استفاده از ستون‌های دانه‌ای از دیرباز و به جهت مقرون به صرفه بودن و سازگار بودن با محیط زیست، برای بالا بردن مقاومت برشی خاک، کنترل نشست، سرعت بخشیدن به تحکیم، کنترل روانگرایی و افزایش ظرفیت باربری پی‌ها رایج بوده است. در این تحقیق بهسازی خاک ماسه‌ای سست با درصد ریزدانه‌ی لای صفر تا ۳۰ درصد که با ستون دانه‌ای بهسازی شد، بررسی شد. با انجام ۴۸ آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس، عواملی نظیر نسبت سطح مقطع ستون دانه‌ای، محصور شدگی ستون، تنش نرمال، اثر گروه ستون دانه‌ای، و دانه‌بندی مصالح ستون مورد بررسی قرار گرفت. پس از بهسازی با ستون دانه‌ای (SC)، مشخص شد که در تنش نرمال ۱۰ کیلوپاسکال تا ۸۰ درصد و در تنش نرمال ۳۰ کیلوپاسکال تا ۳۵ درصد، به ترتیب مقاومت پسماند و پیک افزایش می‌یابد. افزایش نسبت سطح مقطع ستون به سطح مقطع کل نمونه ( $A_{\text{pr}}$ ) افزایش مقاومت برشی را به همراه داشت. با محصور کردن ستون دانه‌ای به وسیله‌ی الیاف ژئوتکتایل (ESC)، مقاومت نهایی مجموعه بین ۱۵٪ تا ۴۰٪ نسبت به ستون دانه‌ای محصور نشده افزایش پیدا کرد. همچنین در یک  $A_{\text{pr}}$  یکسان و در تنش نرمال ۶۰ کیلوپاسکال، گروه ستون دانه‌ای محصور شده بین ۳۳٪ تا ۴۰٪ و ستون منفرد محصور شده بین ۱۵٪ تا ۲۵٪، مقاومت پسماند را نسبت به ستون محصور نشده افزایش می‌دهد. با افزایش بعد دانه‌های ستون منفرد محصور شده در تنش نرمال ۶۰ کیلوپاسکال، مقاومت برشی نرمالیزه شده تا ۳۶٪ نسبت به ستون منفرد محصور نشده افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش‌ها حاکی از این است که با افزایش ریزدانه‌ی خاک، راندمان تاثیر حضور ستون دانه‌ای در افزایش مقاومت برشی کمتر می‌شود.

### ۱- مقدمه

استفاده از ستون‌های سنگی برای اصلاح خاک‌های ریزدانه برای نخستین بار در سال ۱۹۵۰ در کانادا صورت گرفت [۱]. ستون‌های سنگی یا شمع‌های سنگی به‌طور گسترده برای پایدارسازی رُس‌ها و لای‌های نرم و همچنین ماسه‌های لای‌دار سست با درصد ریزدانه‌ی بالا به کار می‌روند [۲]. خاک تسلیح شده با ستون دانه‌ای، به مانند یک ترکیب با سختی و مقاومت بالاتر نسبت به بستر تسلیح نشده عمل می‌کند [۳]. استفاده از ستون‌های دانه‌ای می‌تواند ظرفیت باربری را تا میزان ۴ برابر و ضریب اطمینان پایداری شبروانی را تا ۲۵٪ افزایش دهد [۴]. علاوه بر بهبود ظرفیت باربری پی‌ها، ستون‌های دانه‌ای زمان مورد نیاز برای نشست نهایی پس از ساخت را با شتاب بخشیدن به نرخ تحکیم رُس‌های نرم، کاهش می‌دهد. ستون‌های دانه‌ای ظرفیت باربری خود را از محصورشدگی جانبی توسط خاک پیرامون به دست می‌آورند [۵ و ۶].

همچنین ستون‌های سنگی کاربرد گسترده‌ای در مواجهه با خاک‌های مستعد روانگرایی دارند. استفاده از ستون‌های سنگی به جهت کاهش پتانسیل

روانگرایی برای اولین بار در سال ۱۹۷۷ بررسی شد [۷]. به جهت بررسی عملکرد این ستون‌ها مطالعات بسیاری به صورت مطالعه‌ی موردی، مطالعات صحرایی، مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های عددی انجام شده است [۸]. در خاک‌های ماسه‌ای ریز سست و خاک‌های لای‌دار غیرپلاستیک تسلیح شده با ستون دانه‌ای، ایجاد اضافه فشار آب حفره‌ای کاهش و نرخ زایل شدن فشار اضافی پس از نصب ستون دانه‌ای افزایش می‌یابد [۹ و ۱۰]. علاوه بر این موارد، ستون سنگی موجب کاهش شتاب خاک، جابجایی جانبی و تنش کرنش برشی بررسی شد [۸].

ساخت و استفاده از ستون‌های ماسه‌ای و سنگی مرسوم در خاک‌های بسیار نرم و سست، بدلیل اینکه خاک پیرامون محصورشدگی جانبی کمی ایجاد می‌کند، تقریباً غیرممکن است، اما این مساله با قرار دادن پوشش از جنس الیاف ژئوستتیک پیرامون ستون قابل حل می‌باشد. این سیستم با استفاده از پوشش ژئوتکتایل به خوبی در کارهای مهندسی ژئوتکنیک کارایی داشته است [۱۱ و ۱۲]. همچنین کارهای دیگری با استفاده از پوشش ژئوگرید که سختی و مقاومت بیشتری نسبت به ژئوتکتایل دارد و استفاده از آن در مکان‌هایی که ستون از مصالح درشت‌دانه‌تر ساخته می‌شود، انجام شده است [۱۳ و ۱۴].

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir

بدون پوشش بوده است [۲۱]. موهاپاتارا و همکاران<sup>۵</sup> در سال ۲۰۱۵، رفتار ستون‌های دانه‌ای مسلح با الیاف ژئوسنتتیک را تحت آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس بررسی کردند. در تحقیق ایشان، از خاک ماسه‌ای به جای رس عادی تحکیم یافته، به دلیل سادگی ساخت نمونه استفاده شد. از نتایج تحقیق ایشان این بود که وجود پوشش ژئوسنتتیک، ظرفیت باربری ستون‌های دانه‌ای را افزایش می‌دهد، اما پس از گسیختگی، مقاومت به سطح ستون‌های دانه‌ای غیر مسلح افت پیدا می‌کند، مود گسیختگی ستون دانه‌ای مسلح از نوع خمشی بود، در حالی که ستون غیر مسلح به شکل برشی گسیخته شد، و همچنین اثر گروه ستون دانه‌ای بهتر از ستون منفرد با سطح مقطع مشابه بود [۱۵].

از آنجایی که رفتار جانبی ستون‌های دانه‌ای محصور شده با ژئوتکستایل کمتر بررسی شده است، لذا در این تحقیق رفتار ستون‌های دانه‌ای محصور نشده و محصور شده تحت بارگذاری جانبی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مشابه تحقیق موهاپاتارا و همکاران [۱۵] از خاک ماسه‌ای به عنوان خاک بستر استفاده شده است. لیکن در این تحقیق تاثیر عواملی همچون میزان ریزدانه‌ی خاک بستر، تنش نرمال، اثر گروه ستون دانه‌ای، و دانه‌بندی مصالح ستون بر مقاومت جانبی مجموعه‌ی خاک و ستون دانه‌ای بررسی می‌شود.

## ۲- مصالح و روش‌ها

### ۲-۱- مصالح بستر

در این تحقیق از ماسه و لای فیروزکوه به عنوان مصالح بستر استفاده شد. خاک بستر در درصد‌های ریزدانه‌ی متفاوت صفر تا ۳۰ درصد آماده شد. سپس وزن مورد نیاز از خاک خشک در پنج لایه با انرژی یکسان تا رسیدن به تراکم نسبی ۳۰٪ کوبیده شد. مشخصات مکانیکی خاک بستر در جدول ۱ آورده شده است.

همچنین نمودار دانه‌بندی بستر و ستون دانه‌ای و مشخصات دانه‌بندی و طبقه‌بندی خاک بستر بر اساس استاندارد متحد در شکل ۱ و جدول ۲ آورده شده است.

در تحقیقات گذشته رفتار ستون‌های دانه‌ای ساده و مسلح شده با پوشش ژئوسنتتیک، تحت بارگذاری قائم به خوبی بررسی شده است [۱۵]. مد غالب گسیختگی در ستون منفرد، کمانش است که این کمانش در عمقی برابر با قطر ستون تا دو برابر قطر آن رخ می‌دهد. مد گسیختگی در حالت گروه ستون سنگی ترکیبی از کمانش و تغییرشکل جانبی است. ظرفیت باربری نهایی در خاک‌های نرم پس از نصب ستون‌های سنگی محصورنشده افزایش می‌یابد. باربری نهایی و سختی مجموعه با مسلح کردن ستون‌های سنگی افزایش می‌یابد. مقدار کمانش جانبی در حالت ستون سنگی محصورشده به دلیل محصورشدگی اضافی که مصالح ژئوسنتتیک به وجود می‌آوردند، کاهش می‌یابد. افزایش طول و سختی پوشش مسلح‌کننده، ظرفیت باربری نهایی و سختی مجموعه افزایش می‌یابد. ستون سنگی محصورشده با ژئوتکستایل، ظرفیت باربری نهایی بزرگتری نسبت به گروه ستون محصورنشده دارد [۱۶]. پوشش محصورکننده اثر بسیاری بر توزیع تنش بین خاک و ستون دارد. ستون محصور شده تنش به میزان ۱/۷ برابر ستون محصورنشده از پیرامون خود جذب می‌کند و تنش قائم موجود در ستون محصورنشده مقدار کمتری است. کاهش نشست برای حالت ستون محصورنشده، نسبت به ستون محصور شده با ژئوتکستایل کمتر است و با افزایش سختی ژئوتکستایل، کاهش نشست بیشتری مشاهده می‌شود. همچنین در حالت محصورشده، سرعت تحکیم و زایل شدن اضافه فشار آب حفره‌ای ۱/۳ برابر حالت ستون محصورنشده است [۱۷].

در سال ۲۰۰۸، موروگسان و راجاگوپال<sup>۱</sup> آزمایش‌های آزمایشگاهی کرنش صفحه‌ای برای درک رفتار ستون‌های دانه‌ای با پوشش و بدون پوشش در اثر بارگذاری برشی انجام دادند که نتیجه‌ی آن، بهبود مقاومت برشی آنها در اثر اضافه نمودن پوشش بود [۱۸]. شناید و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۴) یک سری آزمایش‌های در محل بر ستون‌های ماسه‌ای با پوشش ژئوسنتتیک انجام دادند و نتیجه گرفتند که در اثر پوشش‌های ژئوسنتتیک، فشار جانبی خاک در مجاورت پی کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد [۱۹]. چن و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۵) یک مدل سه بعدی عددی برای درک رفتار خاکریز قرار گرفته بر ستون‌های سنگی با پوشش ژئوسنتتیک انجام دادند که نتیجه‌ی آن، این بود که ستون‌های سنگی با پوشش، در خمش به جای برش گسیخته شدند. اما اثرات قطر ستون سنگی و سختی پوشش قابل صرف نظر کردن بود [۲۰]. آلمیدا و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۵) با ساخت یک خاکریز آزمایشی به ارتفاع ۵/۳۵ متر بر روی یک پی نرم بهسازی شده با ستون‌های دانه‌ای با پوشش ژئوسنتتیک مشاهده کردند که نرخ کرنش شعاعی پوشش‌های ژئوسنتتیک با تحکیم یافتن خاک، به تدریج کاهش می‌یابد. همچنین تغییر شکل جانبی خاک نرم در پنجه‌ی خاکریز در ستون‌های با پوشش ۴ مرتبه کمتر از ستون

1 Murugesan and Rajagopal

2 Schnaid et al.

3 Chen et al.

4 Almeida et al.

5 ohatra et al.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی خاک بستر در درصد ریزدانه‌های مختلف

Table 1. Table 1. Property of bed soil with different fine contents

| $\gamma_d$ | e    | $D_r$ | $e_{max}$ | $e_{min}$ | $G_s$ | $\gamma_{d min}$<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | $\gamma_{d max}$<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | میزان ریزدانه<br>(%) |
|------------|------|-------|-----------|-----------|-------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------|
| ۱/۵۰       | ۰/۷۸ | %۳۰   | ۰/۸۷      | ۰/۵۷      | ۲/۶۷  | ۱/۴۳                                      | ۱/۷۱                                      | ۰                    |
| ۱/۵۴       | ۰/۷۳ | %۳۰   | ۰/۸۵      | ۰/۴۶      | ۲/۶۷  | ۱/۴۴                                      | ۱/۸۳                                      | ۱۰                   |
| ۱/۵۸       | ۰/۶۹ | %۳۰   | ۰/۸۳      | ۰/۳۷      | ۲/۶۷  | ۱/۴۶                                      | ۱/۹۵                                      | ۲۰                   |
| ۱/۵۹       | ۰/۶۸ | %۳۰   | ۰/۸۳      | ۰/۳۲      | ۲/۶۷  | ۱/۴۴                                      | ۲/۰۲                                      | ۳۰                   |

جدول ۲: مشخصات دانه‌بندی و طبقه‌بندی خاک بستر

Table 2. Grain size specification and soil classification of bed soil

| میزان ریزدانه | ۰٪   | ۱۰٪   | ۲۰٪  | ۳۰٪  |
|---------------|------|-------|------|------|
| $D_{10}$      | ۰/۱۵ | ۰/۰۴  | ۰/۰۳ | ۰/۰۲ |
| $D_{30}$      | ۰/۱۸ | ۰/۱۶  | ۰/۱۵ | ۰/۱۴ |
| $D_{60}$      | ۰/۲۲ | ۰/۲۱  | ۰/۲۰ | ۰/۲۰ |
| $C_u$         | ۱/۴۷ | ۴/۷۷  | ۶/۸۳ | ۸/۷۰ |
| $C_c$         | ۰/۹۸ | ۲/۷۷  | ۳/۶۶ | ۴/۹۰ |
| طبقه‌بندی خاک | SP   | SP-SM | SM   | SM   |

جدول ۳: مشخصات دانه‌بندی و طبقه‌بندی مصالح ستون دانه‌ای

Table 3. Grain size specification and soil classification of granular materials

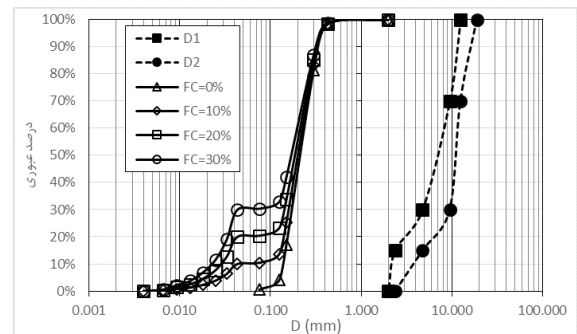
| مشخصات                               | $D_1$ | $D_2$ |
|--------------------------------------|-------|-------|
| وزن مخصوص خشک (gr/cm <sup>3</sup> )  | ۱/۷   | ۱/۸   |
| طبقه‌بندی متحد                       | GP    | GP    |
| $D_{10}$ اندازه موثر دانه‌ها (mm)    | ۲/۲   | ۳/۹   |
| $D_{50}$ اندازه میانگین دانه‌ها (mm) | ۷     | ۱۰/۲۰ |

۲-۳- مصالح پوشش محصورکننده

مشخصات پوشش محصورکننده‌ی ستون که از الیاف ژئوتکستایل بافته نشده می‌باشد، در جدول ۴ آمده است.

۲-۴- روش انجام و برنامه‌ریزی آزمایش‌ها

بستر ماسه‌ای با میزان ریزدانه‌ی صفر تا ۳۰ درصد به نحوی آماده شد که تراکم نسبی همه‌ی نمونه‌ها یکسان و برابر با ۳۰٪ باشد. جهت آماده‌سازی



شکل ۱: نمودار دانه‌بندی خاک بستر با درصد ریزدانه‌های متفاوت و مصالح ستون

Fig 1. Grain size distribution of bed soil with different fine contents and granular materials

۲-۲- مصالح ستون دانه‌ای

دانه‌بندی استفاده شده به عنوان مصالح ستون دانه‌ای در جدول ۳ آمده است. به منظور یافتن تاثیر بعد دانه‌های مصالح ستون در ظرفیت برشی، دو محدوده از اندازه‌ی دانه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مصالح  $D_1$  عبوری از الک  $1/3''$  و مانده روی الک #۱۰، و مصالح  $D_2$  عبوری از الک  $3/4''$  و مانده روی الک #۸ می‌باشند.

مشابه با ستون SC2 می‌باشد، استفاده شد. مشخصات پوشش محصورکننده از جنس ژئوتکستایل در جدول ۴ ارائه شده است. برای بررسی اثر دانه بندی مصالح ستون، از دو دانه‌بندی  $D_1$  و  $D_2$  استفاده شد.

مجموعه‌ای آزمایش‌های انجام شده ۴ نوع خاک بستر، ۴ تنش نرمال، ۲ قطر و ۲ آرایش ستون، دو دانه‌بندی ستون و در ۲ حالت ستون محصورشده و محصورنشده به شرح جدول ۵ می‌باشد. مجموع آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق ۴۸ آزمایش می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۲: (الف) نمونه ستون منفرد محصور شده (ب) نمونه ستون منفرد محصور نشده

Fig. 2. (a) Encased single column model (b) Uncased single column model

ستون‌ها از لوله‌های یو پی وی سی با قطر داخلی برابر با قطر ستون استفاده شد. در این لوله‌ها، مصالح در پنج لایه و با تعداد ۵۰ ضربه با انرژی یکسان کوبیده شد که مشابه با ساخت نمونه‌ها در مرجع شماره‌ی [۱۵] می‌باشد. در حالت محصور شده، پیش از قرار دادن مصالح، ژئوتکستایل به ارتفاع نمونه و طولی برابر با محیط داخلی لوله به‌علاوه‌ی ۲ سانتی‌متر به‌وسیله‌ی چسب به شکل لوله ساخته شد و درون لوله یو پی وی سی قرار گرفت. پس از متراکم کردن مصالح ستون، لوله به آرامی خارج شد. پس از مهیا کردن کامل نمونه، که تماماً در حالت خشک انجام شد، نمونه اشباع گردید. شکل ۲ نمونه‌های ساخته شده در دستگاه برش مستقیم در دو حالت محصورشده و محصورنشده را نشان می‌دهد.

#### جدول ۴: مشخصات مقاومتی پوشش محصورکننده‌ی ستون دانه‌ای

Table 4. Strength property of encasement material of granular column

| مشخصات                         | ژئوتکستایل بافته نشده          |
|--------------------------------|--------------------------------|
| ضخامت                          | ۳/۳ mm                         |
| مقاومت کششی در جهت ماشین       | ۳۵ kN/m                        |
| مقاومت کششی در جهت مقابل ماشین | ۳۹ kN/m                        |
| ازدیاد طول                     | ٪۶۰                            |
| نفوذپذیری                      | $55 \times 10^{-3} \text{m/s}$ |

ستون SC1 با قطر ۵/۵ سانتی‌متر و ستون SC2 با قطر ۱۱ سانتی‌متر، در دو آرایش منفرد و مربعی برای بررسی اثر سطح مقطع و اثر گروه استفاده شد. برای بررسی اثر گروه از ۴ ستون SC1، که نسبت سطح مقطع آن

#### جدول ۵: برنامه آزمایش‌های برش مستقیم

Table 5. Table 5. Experimental program of direct shear tests

| دانه‌بندی مصالح ستون | محصور شدگی ستون | تنش نرمال (kPa) | نسبت سطح مقطع ستون (%) |           | نوع ستون دانه‌ای  | میزان ریزدانه (%) |
|----------------------|-----------------|-----------------|------------------------|-----------|-------------------|-------------------|
|                      |                 |                 | ستون منفرد             | گروه ستون |                   |                   |
| $D_1$                | محصور نشده      | ۱۰              | ۰                      | ۰         | No SC             | ۰                 |
|                      |                 | ۳۰              | ۲/۶۴                   | -         | SC1 <sup>۱</sup>  | ۱۰                |
| $D_2$                | محصور شده       | ۶۰              | ۱۰/۵۵                  | -         | SC2 <sup>۲</sup>  | ۲۰                |
|                      |                 | ۱۲۰             | -                      | ۱۰/۵۵     | ۴SC <sup>۱۳</sup> | ۳۰                |

<sup>۱</sup> ستون دانه‌ای منفرد به قطر ۵/۵ سانتی‌متر

<sup>۲</sup> ستون دانه‌ای منفرد به قطر ۱۱ سانتی‌متر

<sup>۳</sup> گروه ستون دانه‌ای به قطر ۵/۵ سانتی‌متر

۳-۲- خاک بستر تسلیح شده با ستون دانه‌ای محصور نشده

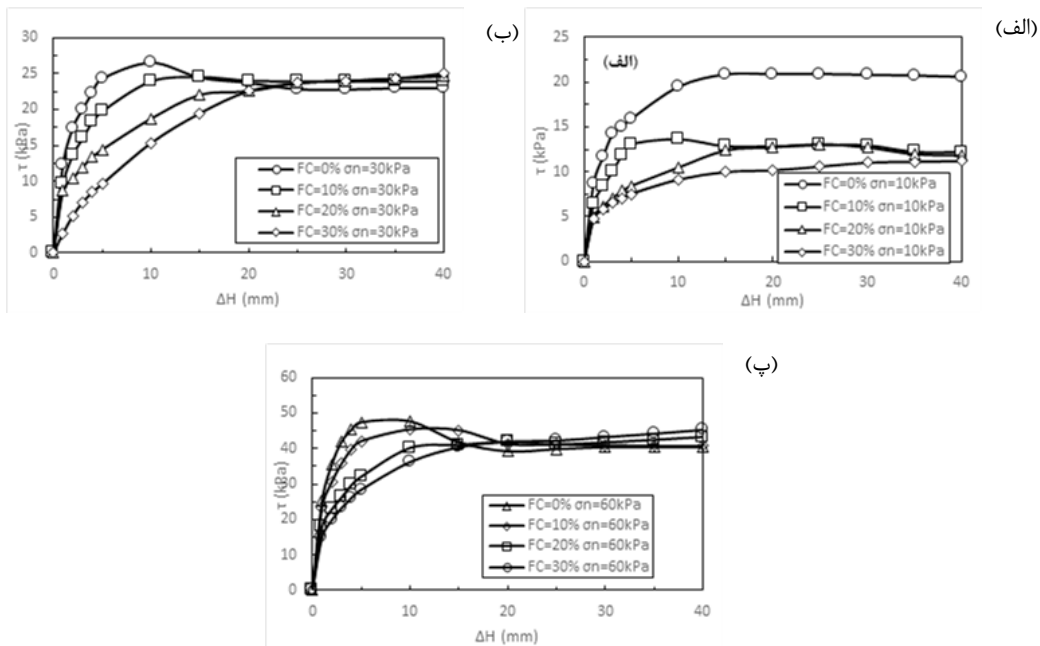
در این بخش نتایج آزمایش‌های برش مستقیم انجام شده بر روی نمونه‌های مسلح شده با ستون دانه‌ای غیر محصور آورده شده است. در شکل ۴ اثر حضور ستون دانه‌ای در تنش نرمال ۱۰ کیلوپاسکال، در خاک‌های بستر با مقادیر مختلف ریزدانه را نشان می‌دهد. حضور ستون دانه‌ای به دلیل تراکم بالاتر و دانه‌بندی بزرگ‌تر ستون نسبت به خاک بستر، منجر به افزایش مقاومت برشی و سختی مجموعه شده است. ستون دانه‌ای که مقاومت و سختی بیشتری دارد، تحت بارگذاری نرمال و پس از آن بارگذاری جانبی، نیروی بیشتری را به خود جذب می‌کند. افزایش مقاومت و سختی در خاک‌های مختلف یکسان نیست و در خاک‌های با درصد ریزدانه‌ی بالاتر، مقدار افزایش کمتری مشاهده شد. برای مثال مقاومت باقیمانده در اثر حضور ستون دانه‌ای در تنش نرمال ۱۰ کیلوپاسکال، در خاک‌های بدون ریزدانه و با ریزدانه‌ی ۳۰ درصد، به ترتیب حدود ۵۵٪ و ۲۰٪ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت سطح مقطع ستون دانه‌ای، به علت اینکه حجم بیشتری از خاک سست بستر، با خاک متراکم و درشت‌دانه‌تری تعویض شده، لذا افزایش مقاومت بیشتری مشاهده شده است [۱۵]. در این حالت مقاومت باقی‌مانده در تنش نرمال ۱۰ کیلوپاسکال از ۴۵٪ به ۵۵٪ در خاک‌های بدون ریزدانه و از حدود ۱۰٪ به حدود ۲۰٪ در خاک‌های با ریزدانه‌ی ۳۰ درصد افزایش می‌یابد.

تمامی آزمایش‌ها در حالت تحکیم یافته زهکشی شده انجام شد. جهت اطمینان از تحکیم کامل، نشست مجموعه تحت بار نرمال با زمان ثبت شد. این اعمال بار تا زمانی که نشست در یک زمان طولانی ثابت باشد ادامه یافت. همچنین جهت اطمینان از زهکشی کامل، سرعت برش را آرام و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه مطابق با استاندارد ASTM D3080 انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خاک بستر تسلیح نشده

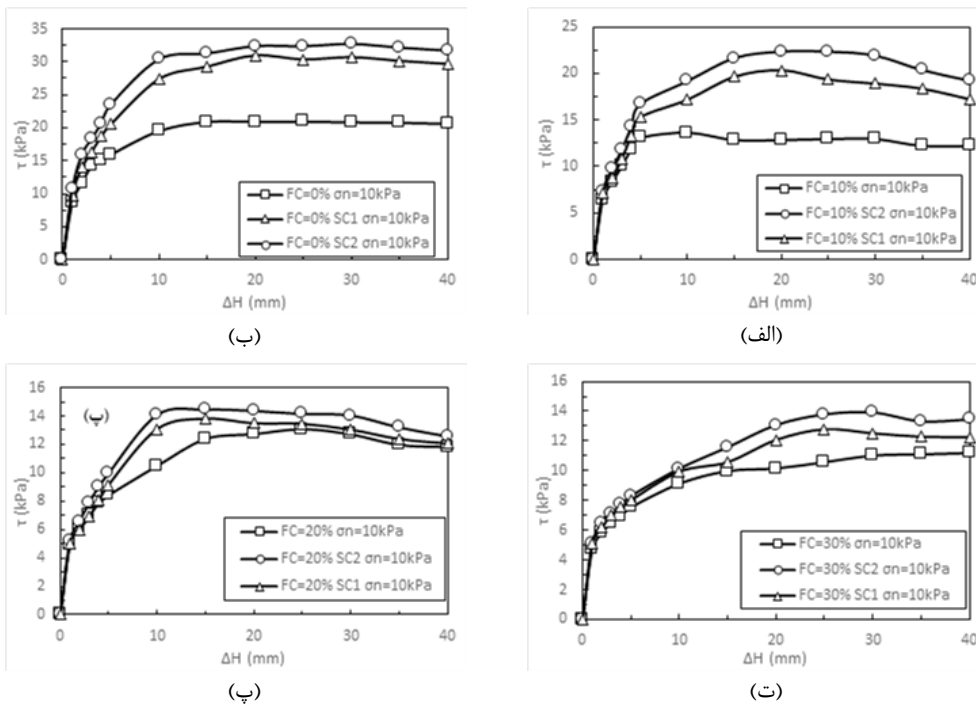
در این بخش اثر درصد ریزدانه بر مقاومت خاک بررسی می‌شود. شکل ۳ تغییرات تنش برشی خاک بستر تسلیح نشده در برابر جابجایی افقی در تنش نرمال‌های ۱۰، ۳۰ و ۶۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد. در شکل ۳ می‌توان مشاهده کرد که با افزایش درصد ریزدانه‌ی خاک، رفتار نرم‌تر شده و به علت کاهش سختی خاک، در جابجایی بیشتری به حداکثر تنش برشی می‌رسد. با افزایش میزان ریزدانه، مقاومت باقیمانده افزایش و مقاومت حداکثر کاهش می‌یابد و این اثر در تنش‌های نرمال بالاتر، بیش‌تر است. البته در تنش نرمال ۱۰ کیلوپاسکال مقاومت باقیمانده نیز با افزایش درصد ریزدانه کاهش می‌یابد. علت آن هم این است که این تنش نرمال به اندازه‌ای بزرگ نیست که تراکم خاک‌ها پیش از برش را دچار تغییر زیاد کند. مقاومت حداکثر با افزایش میزان ریزدانه، ۳ کیلوپاسکال کاهش در تنش نرمال ۶۰ کیلوپاسکال، ۲ کیلوپاسکال کاهش در تنش نرمال ۳۰ کیلوپاسکال، و حدود ۱۰ کیلوپاسکال کاهش در تنش نرمال ۱۰ کیلوپاسکال را تجربه می‌کند.



شکل ۳: نمودار تنش برشی-جابجایی خاک بستر تسلیح نشده (الف) تنش نرمال ۱۰ kPa (ب) تنش نرمال ۳۰ kPa (پ) تنش نرمال ۶۰ kPa

Fig. 3. Shear stress-horizontal shear displacement of unreinforced bed soil a) 10 kPa normal stress, (b) 30 kPa normal stress, (c) 60 kPa normal stress





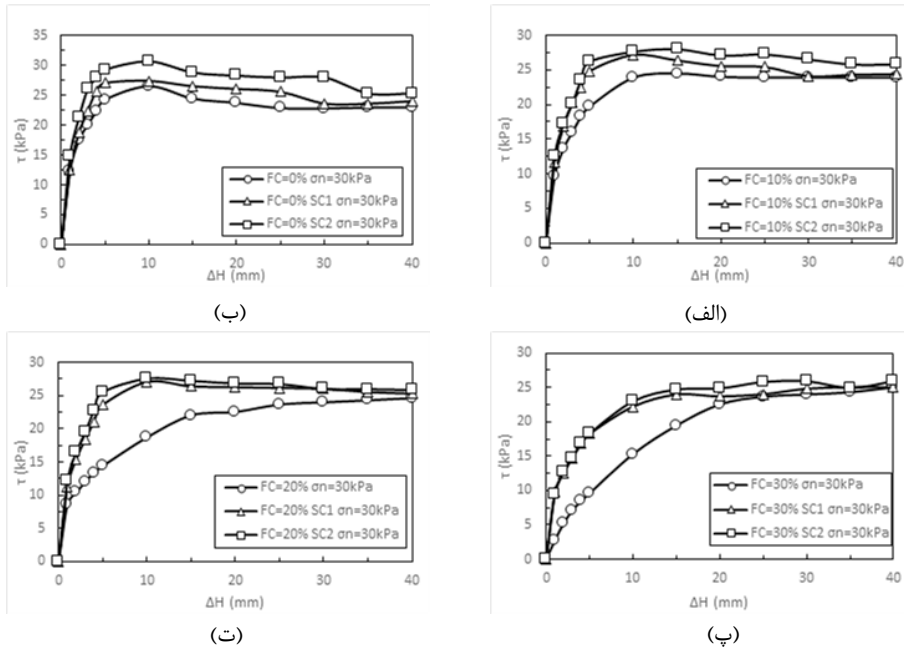
شکل ۴: نمودار تنش برشی-جابجایی بستر تسلیح شده با ستون دانه‌ای محصور نشده در تنش نرمال ۱۰ kPa (الف) بدون ریزدانه (ب) ریزدانه‌ی ۱۰٪ (پ) ریزدانه‌ی ۲۰٪ (ت) ریزدانه‌ی ۳۰٪

Fig. 4. Shear stress-horizontal shear displacement of bed soil improved by GC at 10 kPa normal stress (a) Without fine content, (b) 10% fine content, (c) 20% fine content, (d) 30% fine content

میزان ریزدانه از ۱۰ الی ۳۰ درصد، مقاومت نرمالیزه شده کاهش می‌یابد. علت آن هم می‌تواند ناشی از کاهش مقاومت و سختی خاک بستر، با افزایش ریزدانه‌ی خاک بستر باشد و این کاهش سختی خاک بستر باعث می‌شود که ظرفیت نیرویی کمتری در ستون دانه‌ای بتواند بسیج شود. از طرفی تنها یک استثنا در تغییر رفتار در حالت مقایسه حالت بدون ریزدانه با ریزدانه ۱۰ درصد، در تنش ۱۰ کیلوپاسکال وجود دارد. در این حالت خاک بستر بدون ریزدانه، حتی در تنش نرمال پایین و تسلیح نشده، هم مقاومت و سختی نسبتاً بالایی دارد و جایگزینی آن با ستون دانه‌ای تأثیر کمتری در افزایش مقاومت دارد. شکل ۷ بیانگر اثر نسبت سطح مقطع ستون دانه‌ای  $A_{rr}$  بر مقاومت حداکثر، در حالت‌های تنش نرمال ۱۰ و ۳۰ کیلوپاسکال می‌باشد. همان‌گونه که در شکل‌های ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت سطح مقطع ستون، مقاومت حداکثر افزایش می‌یابد، که این افزایش در درصد ریزدانه‌های پایین‌تر بیش‌تر است. علت آن هم مقاومت و سختی بیشتر خاک پیرامون در درصد ریزدانه‌های کمتر خاک است. در این شرایط، بدلیل سختی بیشتر خاک پیرامون نسبت به خاک با درصد ریزدانه‌ی بالاتر، مقداری از نیروی نرمال و نیروی جانبی را خاک پیرامون به خود می‌گیرد که این مقدار، از حالتی که خاک درصد ریزدانه‌ی بالاتری دارد، بیشتر است. لذا مجموعه مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد.

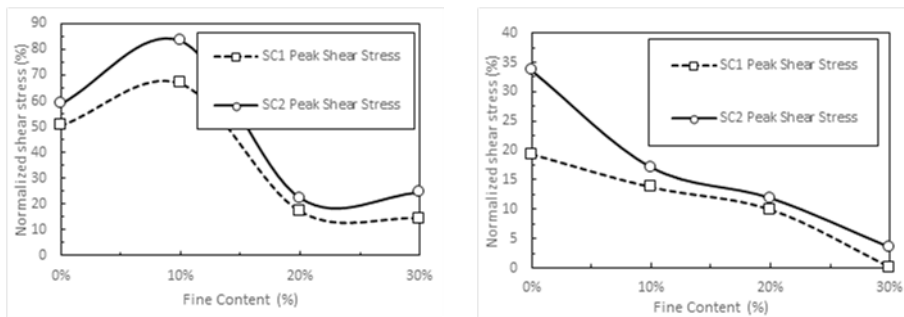
شکل ۵ اثر حضور ستون دانه‌ای در مقاومت برشی خاک در تنش نرمال ۳۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵، رفتار برشی مجموعه، رفتاری سخت‌تر می‌باشد و در تغییر شکل کم‌تری به حداکثر مقاومت خود می‌رسد. مشابه با حالت قبل در تنش نرمال ۱۰ کیلوپاسکال، افزایش مقاومت در درصدهای ریزدانه‌ی بالاتر، مقدار کمتری است. با توجه به شکل ۵، با افزایش درصد ریزدانه، میزان مقاومت کمتر می‌شود و از حدود ۳۰ تا ۳۲ کیلوپاسکال به حدود ۱۲ تا ۱۴ کیلوپاسکال کاهش می‌یابد، زیرا خاک با درصد ریزدانه‌ی بالاتر، مقاومت و مدول الاستیسیته‌ی پایین‌تری نسبت به خاک با درصد ریزدانه‌ی پایین‌تر دارد. همچنین در این موارد، ورود خاک پیرامون به داخل ستون، بیشتر می‌باشد که عملکرد ستون را از حالت ایده‌آل خارج می‌کند. البته میزان افزایش مقاومت در تنش نرمال ۳۰ کیلوپاسکال تا ۳۵٪ است، که به مراتب کمتر از حالت تنش نرمال ۱۰ کیلوپاسکال است که تا ۸۵٪ مقاومت افزایش می‌یابد. علت این موضوع حفظ بافت مستحکم و متراکم ستون دانه‌ای در تنش‌های نرمال پایین می‌تواند باشد، اما در تنش‌های نرمال بالاتر، ستون دانه‌ای بافت متراکم خود را تا حدی از دست می‌دهد.

شکل ۶ بیانگر افزایش مقاومت حداکثر نرمالیزه شده، در حالت وجود ستون دانه‌ای، نسبت به حالت بدون ستون می‌باشد. در این شکل، خط چین و خط پر به ترتیب نشان دهنده‌ی ستون SC1 با قطر ۵/۵ سانتی‌متر و ستون SC2 به قطر ۱۱ سانتی‌متر است. مطابق شکل ۶، در حالت کلی، با افزایش



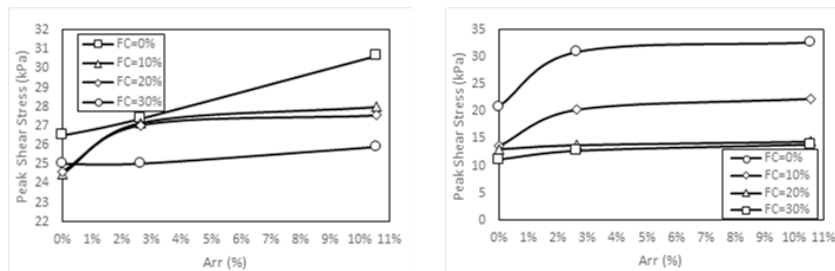
شکل ۵: نمودار تنش برشی-جابجایی بستر تسلیح شده با ستون دانه‌ای محصور نشده در تنش نرمال ۳۰ kPa (الف) بدون ریزدانه (ب) ریزدانه‌ی ۱۰٪ (پ) ریزدانه‌ی ۲۰٪ (ت) ریزدانه‌ی ۳۰٪ (الف) بدون ریزدانه

Fig. 5. Fig. 5. Shear stress-horizontal shear displacement of bed soil improved by GC at 30 kPa normal stress (a) Without fine content, (b) 10% fine content, (c) 20% fine content, (d) 30% fine content



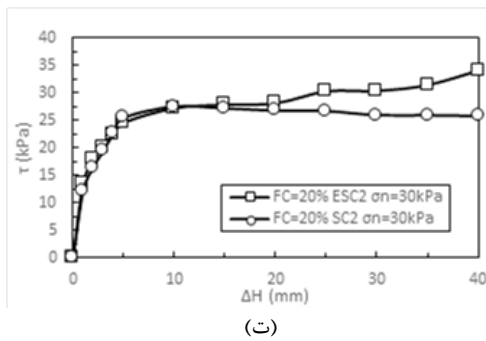
شکل ۶: تغییرات مقاومت برشی نرمالیزه-درصد ریزدانه‌ی خاک بستر (الف) تنش نرمال ۱۰ kPa (ب) تنش نرمال ۳۰ kPa

Fig. 6. Normalized shear strength vs. fine content of bed soil (a) 10 kPa normal stress, (b) 30 kPa normal stress



شکل ۷: تغییرات مقاومت برشی حداکثر-نسبت سطح مقطع ستون دانه‌ای (الف) تنش نرمال ۱۰ kPa (ب) تنش نرمال ۳۰ kPa

Fig. 7. Maximum shear strength vs. area replacement ratio (a) 10 kPa normal stress, (b) 30 kPa normal stress

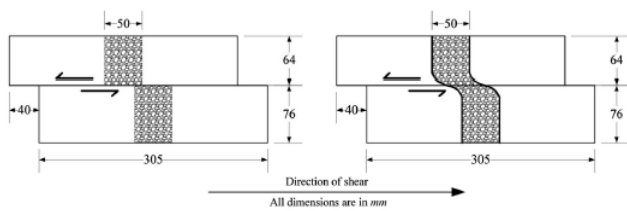


شکل ۸: نمودار تنش برشی-جابجایی خاک بستر تسلیح شده با ستون دانه‌ای محصور شده در تنش نرمال ۳۰ kPa (الف) بدون ریزدانه (ب) ریزدانه‌ی ۱۰٪ (پ) ریزدانه‌ی ۲۰٪ (ت) ریزدانه‌ی ۳۰٪

Fig. 8. Shear stress-horizonal shear displacement of bed soil improved by EGC at 30 kPa normal stress (a) Without fine content, (b) 10% fine content, (c) 20% fine content, (d) 30% fine content

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با محصور کردن ستون توسط ژئوستنتیک، در تمامی حالات رفتار مجموعه را بهبود بخشیده است. حضور پوشش ژئوستنتیک باعث افزایش سختی مجموعه شده و تنش برشی در جابجایی کمتری به حداکثر اولیه‌ی خود می‌رسد.

شکل گسیختگی در حالت محصورنشده و محصورشده مطابق شکل ۹ می‌باشد که نشان دهنده‌ی حفظ بافت ستون دانه‌ای در جابجایی‌های بزرگ‌تر است. همچنین افزایش در مقاومت نهایی در خاک‌های با درصد ریزدانه‌ی بالاتر، به علت سختی پایین‌تر این خاک‌ها، مقدار کمتری است. زیرا نیروی کمتری توسط بستر بسیج می‌شود و همه‌ی مقاومت، ناشی از ستون دانه‌ای می‌باشد. شکل ۱۰ بیان‌گر میزان مقاومت نهایی در خاک‌های مختلف است.



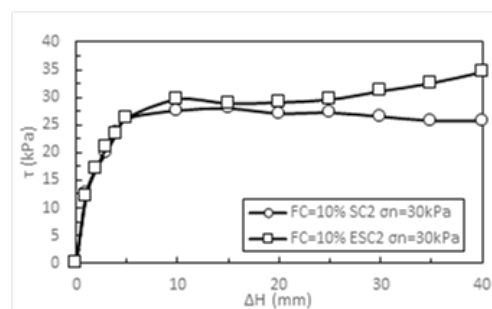
شکل ۹: گسیختگی برشی ستون‌های دانه‌ای در دو حالت محصورشده و محصورنشده [۱۵]

Fig. 9. Different type of shear failure of uncased and encased gravel columns [15]

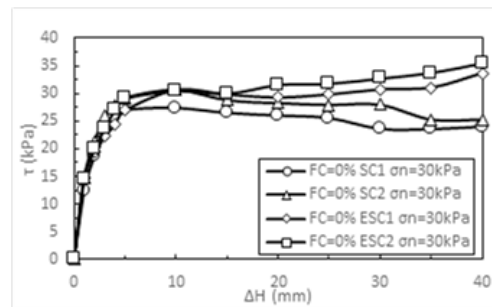
همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، با محصور کردن ستون، مقاومت نهایی افزایش می‌یابد که این افزایش در درصد ریزدانه‌های پایین‌تر، محسوس‌تر می‌باشد. زیرا مطابق تحقیقات گذشته، در درصد ریزدانه‌ی بالاتر، اصطکاک میان بستر ماسه‌ای و ژئوتکستایل کاهش می‌یابد [۲۲].

### ۳-۳- خاک بستر تسلیح‌شده با ستون دانه‌ای محصورشده

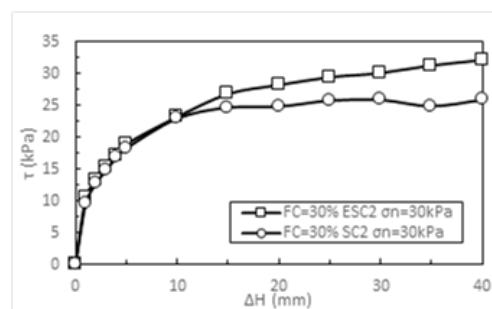
به طور کلی میزان افزایش مقاومت در اثر حضور ستون دانه‌ای در تنش نرمال ۳۰ کیلوپاسکال، کم‌تر از تنش نرمال ۱۰ کیلوپاسکال می‌باشد. علت آن هم می‌تواند این باشد که در تنش نرمال بالاتر، پیش از باگذاری جانبی، ستون دانه‌ای بافت متراکم خود را ازدست می‌دهد. در خاک‌های متراکم به‌دلیل محصورشدگی که خاک بستر برای ستون ایجاد می‌کند، این بافت تراکم اولیه‌ی خود را حفظ می‌کند، اما در خاک‌های سست این محصور شدگی وجود ندارد. استفاده از پوشش ژئوتکستایل پیرامون ستون، علاوه بر اینکه به علت مقاومت کششی بالا، این محصور شدگی جانبی را فراهم می‌کند، بلکه با ایجاد یک لایه‌ی حائل میان ستون و خاک پیرامون، از ورود خاک ریزدانه‌ی پیرامون به داخل ستون جلوگیری می‌کند. ورود خاک ریزدانه به داخل ستون، هم باعث می‌شود مقاومت جانبی ستون که تا حد زیادی بدلیل ماهیت اصطکاکی آن است، دچار ضعف شده و هم اینکه از عملکرد زهکشی ستون، که در بحث تحکیم خاک رس و در بحث کنترل روانگرایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، کاسته می‌شود. شکل ۸ اثر محصور کردن ستون دانه‌ای را با ستون دانه‌ای محصور نشده در خاک‌های با درصد ریزدانه‌ی مختلف در تنش نرمال ۳۰ کیلوپاسکال مقایسه می‌کند.



(الف)



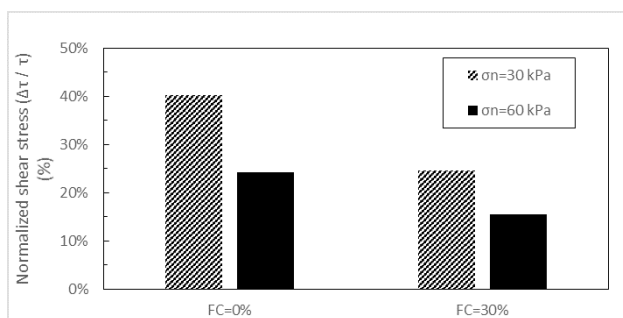
(ب)



(پ)



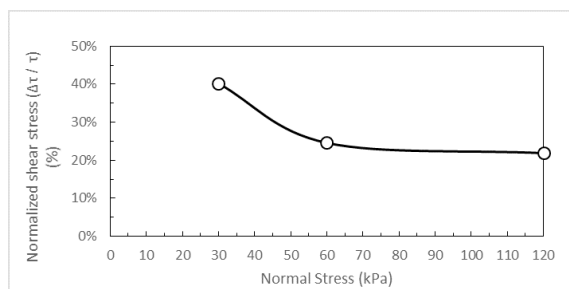
همچنین همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش تنش نرمال، مقاومت نرمالیزه کاهش می‌یابد. علت آن هم این است در تنش‌های نرمال بالاتر، ستون دانه‌ای به علت سختی بسیار بیشتر نسبت به خاک پیرامون، تنش نرمال بیشتری به خود جذب می‌کند و از این رو، ستون متراکم تحت فشار نرمال، بافت متراکم خود را از دست می‌دهد. در تنش‌های نرمال پایین‌تر نیز این اتفاق می‌افتد، اما وجود پوشش محصور کننده ی ژئوتکستایل، جلوی تغییر بافت ستون گرفته می‌شود.



شکل ۱۲: تغییرات مقاومت پسماند نرمالیزه شده در تنش نرمال متفاوت به علت محصورشدگی ستون

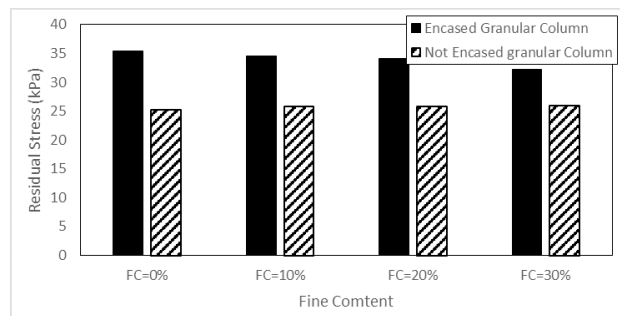
Fig. 12. Variation of normalized residual strength at different normal stress due to column encasement

برای بررسی بیشتر اثر تنش نرمال، ستون دانه‌ای در خاک بستر بدون ریزدانه در تنش نرمال بالاتر نیز مورد آزمایش قرار گرفت. در شکل ۱۳ افزایش مقاومت جانبی در حالت محصور شدگی ستون دانه‌ای، نسبت به مقاومت در حالت ستون محصور نشده، به صورت نرمالیزه شده در تنش نرمال‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۱۳: تغییرات مقاومت باقیمانده نرمالیزه شده-تنش نرمال به علت محصورشدگی ستون در خاک ماسه‌ی بدون ریزدانه

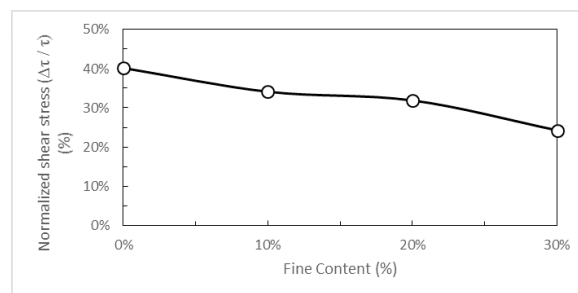
Fig. 13. Variation of normalized residual strength vs. normal stress due to column encasement in clean sand



شکل ۱۰: مقاومت باقیمانده در دو حالت محصور شده و محصور نشده در خاک‌های مختلف

Fig. 10. Residual shear strength of two cases of GC and EGC in different soil

در شکل ۱۱، افزایش مقاومت نرمالیزه شده در حالت ستون محصور شده نسبت محصور نشده، نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۱۱، با افزایش درصد ریزدانه، افزایش مقاومت نهایی از ۴۰٪ به ۲۴٪ کاهش می‌یابد. علت این موضوع ناشی می‌تواند ناشی از کاهش اصطکاک خاک بستر و کاهش اصطکاک میان خاک پیرامون و پوشش ژئوتکستایل، با افزایش ریزدانه باشد. البته در تمامی حالات افزایش مقاومت در اثر محصورشدگی محسوس می‌باشد.



شکل ۱۱: تغییرات مقاومت باقیمانده نرمالیزه-درصد ریزدانه‌ی خاک در ستون‌ها به علت محصورشدگی ستون

Fig. 11. Normalized shear stress vs. fine content in columns due to encasement

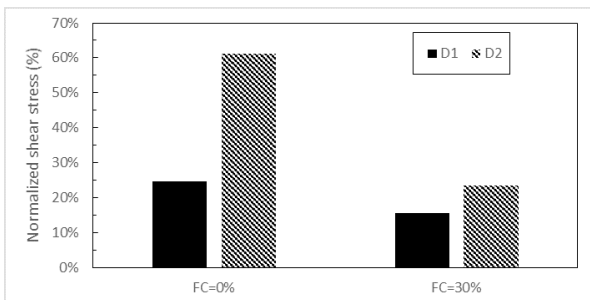
### ۳-۴- اثر افزایش تنش نرمال در مقاومت مجموعه

در شکل ۱۲ تاثیر وجود ستون در دو حالت محصور شده و محصور نشده تحت تنش نرمال ۳۰ و ۶۰ کیلوپاسکال، در دو حالت بدون ریزدانه و با ریزدانه‌ی ۳۰٪ بررسی شده است. با محصور کردن ستون، مقاومت باقیمانده مجموعه نسبت به حالت محصور نشده ۲۵٪ برای بستر بدون ریزدانه و ۱۵٪ برای بستر با ۳۰ درصد ریزدانه افزایش می‌یابد. علت تاثیر کمتر ستون محصور شده، در حالت وجود ۳۰ درصد ریزدانه، کاهش سختی و همچنین اصطکاک خاک پیرامون و ژئوتکستایل می‌تواند باشد [۲۲].

بیشتر باشد. زیرا علاوه بر اینکه محصورشدگی باعث انسجام بیشتر می‌شود، به دلیل اینکه مساحت پیرامونی ستون‌ها در حالت گروه ستون بیشتر است، سطح تماس خاک-ژئوتکستایل بیشتری ایجاد می‌شود. این اثر در خاک‌های با درصد ریزدانه‌ی پایین، اثر محسوس‌تری است و با افزایش درصد ریزدانه کاهش می‌یابد. زیرا اصطکاک میان ژئوتکستایل و خاک پیرامون با افزایش ریزدانه‌ی خاک، مقدار کمتری خواهد بود.

### ۳-۶- اثر دانه‌بندی مصالح ستون دانه‌ای

در این بخش اثر تغییر در دانه‌بندی مصالح ستون دانه‌ای بر مقاومت جانبی مجموعه بررسی شده است. در حالت محصورنشده، افزایش بعد دانه‌های ستون، تاثیر معناداری در مقاومت نهایی نداشته است. اما در حالت محصورشده، تفاوت چشم‌گیری در مقاومت نهایی، به ویژه در درصد ریزدانه‌ی پایین، مشاهده شده است. علت آن هم حفظ بافت متراکم ستون در حالت محصور شده است و اینکه دانه‌بندی بزرگ‌تر، ماهیت اصطکاکی قوی‌تری نسبت به دانه‌بندی کوچک‌تر دارد. این امر باعث افزایش اصطکاک میان دانه‌های ستون دانه‌ای و همچنین اصطکاک میان دانه‌های ستون و ژئوتکستایل می‌شود. در شکل ۱۵ مقاومت باقیمانده نرمالیزه شده ستون‌های محصور شده نسبت به ستون محصور نشده در دو دانه‌بندی مختلف را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۵، افزایش بعد دانه‌های ستون، باعث افزایش مقاومت از ۲۵٪ به ۶۱٪ و از ۱۵٪ به ۲۳٪ برای بستر بدون ریزدانه و بستر دارای ریزدانه ۳۰٪ درصد شده است.



شکل ۱۵: تغییرات مقاومت باقیمانده نرمالیزه شده ستون‌های محصورشده نسبت به محصورنشده در تنش نرمال ۶۰ kPa

Fig. 15. Variation of normalized residual strength of EGC to GC at 60 kPa normal stress

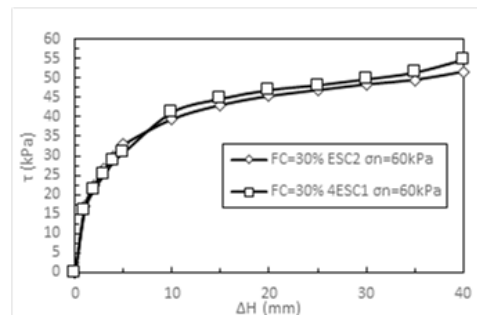
### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه ۴۸ آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس بر روی خاک ماسه‌ای با میزان ریزدانه‌ی لای متفاوت، در شرایط مختلف ستون‌سنگی مسلح و غیر مسلح انجام شد. در زیر خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده در این تحقیق آورده شده است:

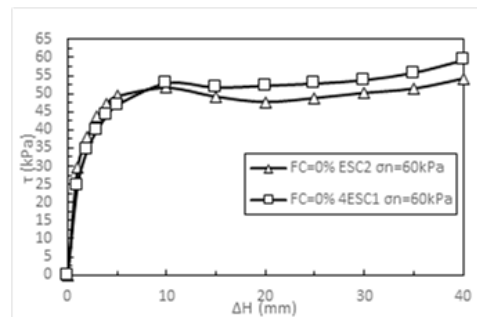
مطابق شکل ۱۳، با افزایش تنش نرمال، تاثیر ستون دانه‌ای محصور شده در افزایش مقاومت جانبی خاک کمتر است. در حالت ستون دانه‌ای محصور شده، مقاومت نهایی مجموعه نسبت به حالت ستون محصور نشده تا ۲۲٪ افزایش می‌یابد.

### ۳-۵- اثر گروه ستون دانه‌ای

در این بخش، اثر گروه ستون دانه‌ای بررسی می‌شود. گروه ستون دانه‌ای متشکل از چهار ستون SC1 که نسبت سطح مقطع آن مشابه با ستون منفرد SC2 می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۴ مقایسه‌ی گروه ستون دانه‌ای و ستون منفرد به ترتیب در خاک بستر با بدون ریزدانه و ۳۰ درصد ریزدانه را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۴: نمودار تنش برشی-جابجایی بستر تسلیح شده با ستون منفرد و گروه محصور شده در تنش نرمال ۶۰ کیلوپاسکال (الف) بدون ریزدانه (ب) ریزدانه‌ی ۳۰٪

Fig. 14. Shear stress-horizontal shear displacement of bed soil improved by single and group EGCs at 60 kPa normal stress (a) Without fine content, (b) 30% fine content

در یک نسبت سطح مقع مشابه، گروه ستون دانه‌ای عملکرد بهتری نسبت به ستون منفرد دارد. علت آن هم این است که گروه ستون، برای خاکی که گروه آن را احاطه کرده یک محصورشدگی ایجاد می‌کند و مقاومت آن را افزایش می‌دهد [۱۵]. این اثر در ستون‌های محصور شده می‌تواند

- [7] K. Tokimatsu, Y. Asaka, Effects of liquefaction-induced ground displacements on pile performance in the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake, *Soils and Foundations*, 38 (1998) 163-177.
- [8] A. Asgari, M. Oliaei, M. Bagheri, Numerical simulation of improvement of a liquefiable soil layer using stone column and pile-pinning techniques, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 51 (2013) 77-96.
- [9] K. Adalier, A. Elgamal, J. Meneses, J.I. Baez, Stone columns as liquefaction countermeasure in non-plastic silty soils, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(7) (2003) 571-584.
- [10] S.A. Ashford, K.M. Rollins, J.I. Baez, Comparison of deep foundation performance in improved and non-improved ground using blast-induced liquefaction, *Soil Dynamics and Liquefaction*, ASCE Geotech. Special Publ., 107 (2000) 20-34.
- [11] M. Raithel, H.G. Kempfert, Calculation models for dam foundations with geotextile coated sand columns, ISRM International Symposium, International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, (2000).
- [12] M. Raithel, H.G. Kempfert., A. Kirchner, Geotextile-encased columns (GEC) for foundation of a dike on very soft soils, *Proceedings of the Seventh International Conference on Geosynthetics*, Nice, France, (2002).
- [13] J. Gniel, A. Bouazza, Construction of geogrid encased stone columns: a new proposal based on laboratory testing, *Geotextiles and Geomembranes*, 28 (2010) 108-118.
- [14] G. Araujo, E. Palmeira, R. Cunha, Behaviour of geosynthetic-encased granular columns in porous collapsible soil, *Geosynthetics International*, 16(6) (2009) 433-451.
- [15] S.R. Mohapatra, K. Rajagopal, J. Sharma, Direct shear tests on geosynthetic-encased granular columns, *Geotextiles and Geomembranes*, 44(3) (2016) 396-405.
- [16] L., Zhang, M. Zhao, Deformation analysis of geotextile-encased stone columns, *International Journal of Geomechanics*, 15(3) (2015) 04014053.
- [17] M. Miranda, M., A. Da Costa, J. Castro, C. Sagasetta, Influence of geotextile encasement on the behaviour of stone columns: Laboratory study, *Geotextiles and Geomembranes*, 45 (2017) 14-22.
- [18] S. Murugesan, K. Rajagopal, Shear load tests on stone columns with and without geosynthetic encasement, *Geotechnical Testing Journal*, 32(1) (2008) 76-85.
- با افزایش تنش نرمال، تاثیر حضور ستون دانه‌ای در افزایش مقاومت برشی، کاهش می‌یابد و در تنش‌های نرمال بالا، تقریباً ناچیز می‌شود.
- با محصور کردن ستون دانه‌ای توسط ژئوتکستایل، مقاومت باقیمانده‌ی مجموعه افزایش می‌یابد. این پوشش از بافت متراکم ستون دانه‌ای محافظت به عمل می‌آورد و همچنین از ورود خاک ریزدانه‌ی پیرامون به درون ستون جلوگیری می‌کند.
- با افزایش درصد ریزدانه در خاک، ضمن کاهش مقاومت خاک، رفتار خاک نرم‌تر می‌شود که می‌تواند ناشی از کاهش اصطکاک بین خاک بستر و ژئوتکستایل باشد. وجود ستون در دو حالت محصور شده و محصورنشده، سختی و مقاومت خاک را در همه‌ی خاک‌ها افزایش می‌دهد که این افزایش، در درصد ریزدانه‌های بالاتر، کم‌تر می‌باشد.
- اثر گروه ستون دانه‌ای نسبت به ستون منفرد با نسبت سطح مقطع مشابه نشان داد که گروه ستون، مقاومت باقیمانده‌ی مجموعه را نسبت به ستون منفرد افزایش می‌دهد. علت آن می‌تواند محصور شدگی ناشی از اثرات گروه باشد. این اثر در حالت محصورشده و در درصد ریزدانه‌ی پایین محسوس‌تر است.
- اثر دانه‌بندی ستون دانه‌ای نشان داد که با افزایش بعد دانه‌های ستون، مقاومت مجموعه افزایش می‌یابد. این افزایش مقاومت در خاک‌های دارای ریزدانه پایین و همچنین در حالت محصور شده، محسوس‌تر است.

## مراجع

- [1] J. Duncan, C. Chang, Nonlinear analysis of stress and strain in soils, *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 96 (1970) 1629-1652.
- [2] R.D. Barksdale, R.C. Bachus, Design and construction of stone columns volume II, Federal Highway Administration, (1983).
- [3] S. Murugesan, K. Rajagopal, Studies on the behavior of single and group of geosynthetic encased stone columns, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(1) (2009) 129-139.
- [4] D. Bergado, N. Singh, S. Sim, B. Panichayatum, C. Sampaco, A. Balasubramaniam, Improvement of soft Bangkok clay using vertical geotextile band drains compared with granular piles, *Geotextiles and Geomembranes*, 9(3) (1990) 203-231.
- [5] J. Hugher, N.J. Withers, Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns, *Ground engineering*, 7(3) (1974) 42-49.
- [6] J. Hughes, N. Withers, D. Greenwood, A field trial of the reinforcing effect of a stone column in soil, *Geotechnique*, 25 (1975) 31-44.

- [21] M.S. Almeida, I. Hosseinpour, M. Riccio, M., D. Alexiew, Behavior of geotextile-encased granular columns supporting test embankment on soft deposit, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(3) (2014) 04014116.
- [22] S.A. Naeini, N. Gholampoor, Cyclic behaviour of dry silty sand reinforced with a geotextile, *Geotextiles and Geomembranes*, 42(6) (2014) 611-619.
- [19] F. Schnaid, D. Winter, A.E.F. Silva, D. Alexiew, V. Kuster, A. Hebmuller, Geotextile encased columns (GEC) under bridge approaches as a pressure-relief system: concept, experience and measurements, 10th International Conference on Geosynthetics, Berlin, Germany, (2014).
- [20] J.F. Chen, L.Y. Li, J.F. Xue, S.Z. Feng, Failure mechanism of geosynthetic-encased stone columns in soft soils under embankment, *Geotextiles and Geomembranes*, 43(5) (2015) 424-431.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

R. Dinarvand, A. Ardakani, Behavior of geosynthetic-encased granular column in silty sand soil by direct shear test, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(5) (2018) 961-972.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12979.5308

