



## مطالعه آزمایشگاهی مقاومت برشی ماسه سست بهسازی شده در حالت ستون سنگی مجزا و ترانشه معادل و سطح معادل

مجید اصلانی<sup>۱</sup>، جواد نظری افشار<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر قدس، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> گروه مهندسی عمران، واحد لنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۷-۱۵  
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۸-۱۲  
پذیرش: ۱۳۹۷-۱۰-۱۸  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۰-۱۸

### کلمات کلیدی:

ستون سنگی مجزا  
ترانشه معادل  
سطح معادل  
مقاومت برشی  
ماسه سست

**خلاصه:** به دلیل پیچیدگی‌های موجود در محاسبات سه‌بعدی زمین‌های مسلح‌شده با ستون‌های سنگی می‌توان مسائل سه‌بعدی را به کمک روش‌هایی مانند سطح معادل و ترانشه معادل به مسائل در حالت دوبعدی (کرنش مسطح) تبدیل نمود که در مطالعات تحلیلی و عددی به‌وفور استفاده می‌شود. در خصوص مقایسه نتایج حاصل از روش‌های مذکور و مدل‌سازی واقعی، مطالعات آزمایشگاهی کاملی صورت نگرفته‌است. بدین منظور در این مطالعه آزمایش‌هایی در دستگاه برش مستقیم در ابعاد  $152 \times 305 \times 305$  میلی‌متر بر روی نمونه خاک بهسازی‌شده با ستون سنگی در آرایش‌های ستون سنگی مجزا (منفرد، مربعی و مثلثی)، ترانشه معادل و سطح معادل انجام شد. پارامترهای تاثیرگذار شامل نسبت ناحیه اصلاح‌شده ( $8/4$ )،  $12$ ،  $16/4$  و  $25$  درصد) و مقدار سربار قائم اعمالی ( $55$ ،  $75$  و  $100$  کیلوپاسکال) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بیانگر افزایش سختی و مقاومت برشی خاک بهسازی‌شده در آرایش‌های ستون سنگی مجزا و ترانشه معادل و هم‌چنین تاثیر نحوه چیدمان آرایش ستون‌های سنگی در افزایش مقاومت برشی نسبت به بستر سست ماسه‌ای می‌باشد. بیشترین افزایش مقاومت برشی و سختی مربوط به آرایش مربع و کمترین آن مربوط به آرایش منفرد می‌باشد. مقایسه نتایج حاصل از آرایش‌های ستون سنگی مجزا و ترانشه معادل متناظر با هر آرایش نشان می‌دهد که می‌توان از آرایش ترانشه معادل در حالت دوبعدی به جای ستون‌های سنگی در حالت سه‌بعدی استفاده نمود. در آزمایش‌های انجام‌شده در حالت سطح معادل افزایش در مقاومت برشی و پارامترهای مقاومت برشی نسبت به بستر ماسه‌ای سست غیرمسلح مشاهده نشد.

### ۱- مقدمه

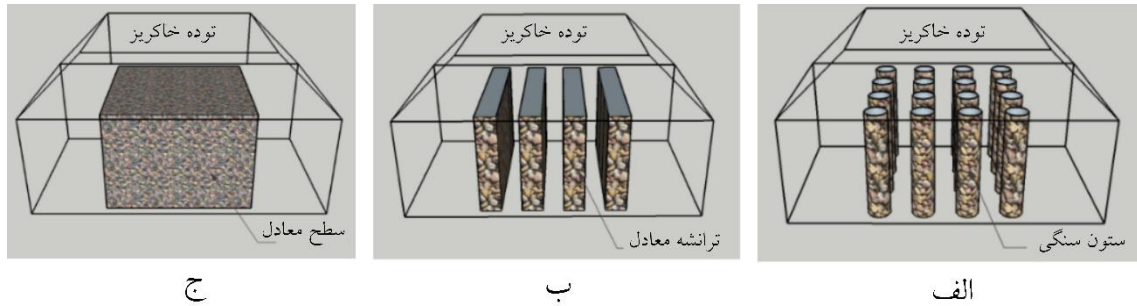
[۷] و مدل‌سازی آزمایشگاهی [۱۹-۱۳] انجام شده‌است. نتایج حاکی از آن است که مهم‌ترین عامل در افزایش ظرفیت باربری ستون‌های سنگی نسبت ناحیه اصلاح‌شده، نوع خاک بستر، زاویه اصطکاک مصالح ستون سنگی و طول ستون‌های سنگی می‌باشد. اما تاکنون مطالعات محدودی در خصوص بررسی مقاومت برشی زمین‌های بهسازی با ستون سنگی انجام شده‌است.

راجاکوپال و همکاران [۲۰] تعدادی آزمایش به‌منظور بررسی رفتار ستون‌های سنگی مسلح و غیرمسلح تحت بارگذاری برشی انجام دادند که نتایج بیانگر افزایش مقاومت برشی به دلیل وجود ستون‌های سنگی غیرمسلح و مسلح در خاک می‌باشد. موهاپاترا و همکاران [۲۱] تعدادی آزمایش در آرایش‌ها و نسبت‌های ناحیه اصلاح‌شده مختلف

افزایش ارزش زمین و کمبود دسترسی به زمین‌های مناسب برای ساخت مهندسین را به سمت بهسازی خاک موجود در محل ترقیب نموده‌است. به‌منظور بهسازی خاک‌های محل روش‌های مختلفی ارائه شده‌است که به تجربه استفاده از ستون‌های سنگی در بهسازی خاک ثابت شده‌است [۱ و ۲]. از جمله کاربردهای استفاده از ستون سنگی در افزایش پایداری شیروانی‌ها، ظرفیت باربری و مقاومت برشی در خاک‌های رسی و سیلتی و کاهش نشست‌پذیری و زمان تحکیم خاک می‌باشد [۳-۶]. در خصوص تاثیر ستون‌های سنگی در افزایش ظرفیت باربری قائم تحقیقات متعددی بوسیله روش‌های عددی [۱۲-

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: j.nazariafshar@qodsiau.ac.ir





شکل ۱. مدل‌های هندسی در بررسی ستون‌های سنگی (الف) ستون سنگی مجزا (ب) ترانشه معادل (ج) سطح معادل

Fig. 1. View of stone column-supported embankment on soft soil: a) Individual columns; b) Equivalent trench. c) Homogenized area

حالت سطح معادل می‌باشد. از این روش‌ها برای محاسبات ظرفیت باربری، محاسبات پایداری شیب و کاهش نشست زمین‌های بهسازی با ستون سنگی استفاده می‌شود.

نتایج موجود بیانگر آن است که تاکنون تفاوت بین حالت ستون سنگی مجزا (سه‌بعدی) در آرایش‌های مختلف و روش‌های ترانشه معادل و سطح معادل به‌صورت مدل‌سازی فیزیکی و آزمایشگاهی بررسی نشده‌است. با توجه به مرور ادبیات فنی مشخص می‌باشد که بیشترین بررسی در خصوص بررسی مقاومت برشی زمین‌های بهسازی با ستون سنگی و همچنین تبدیل پارامترهای سه‌بعدی به حالت ترانشه معادل و سطح معادل در حالت دو بعدی به‌صورت تحلیل‌های عددی بوده‌است و بررسی‌های آزمایشگاهی انجام گرفته به‌صورت محدود و در نسبت‌های ناحیه اصلاح‌شده پایین انجام و خلا تحقیقاتی به‌صورت آزمایشگاهی در این زمینه احساس می‌شود. در این مقاله با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی به بررسی و مقایسه مقاومت برشی و پارامترهای مقاومت برشی در آرایش‌های ستون سنگی مجزا، ترانشه معادل و حالت سطح معادل پرداخته شده‌است و ضرایب مناسب برای تبدیل مقاومت برشی از حالت سطح معادل به آرایش‌های ستون سنگی مجزا و آرایش ترانشه معادل ارائه شده‌است.

## ۲- مدل‌های هندسی

به‌منظور ساده سازی در هندسه مدل‌سازی زمین بهسازی شده با تعداد زیادی از ستون سنگی در حالت ستون سنگی مجزا (ISC<sup>1</sup>) (شکل ۱-الف) می‌توان از مدل‌های ترانشه معادل (ETM<sup>2</sup>) (شکل

در دستگاه برش مستقیم، به‌منظور بررسی رفتار ستون‌های سنگی مسلح و غیرمسلح تحت بارگذاری برشی انجام دادند. نتایج بیانگر آن بود که استفاده از ستون‌های سنگی مسلح و غیرمسلح باعث افزایش مقاومت برشی در خاک بهسازی می‌شود. ابوشرار و هان [۲۲] با استفاده از تحلیل عددی به مطالعه بررسی پایداری توده خاکریز قرار مستقر بر روی بستر بهسازی‌شده با ستون سنگی در حالت دو بعدی با استفاده از آرایش ترانشه معادل و سطح معادل پرداختند. نتایج بیانگر آن است که ضریب اطمینان محاسبه‌شده با روش سطح معادل از ضریب اطمینان محاسبه‌شده با روش ترانشه معادل بزرگتر می‌باشد. لذا یک ضریب اصلاحی برابر ۰/۹ برای تبدیل ضریب اطمینان از حالت سطح معادل به حالت ترانشه معادل در حالت مدل‌سازی دو بعدی پیشنهاد شده‌است. در یک مطالعه مشابه ژانگ و همکاران [۲۳] به بررسی پایداری توده خاکریز مستقر بر روی بستر بهسازی‌شده با ستون سنگی در حالت دو بعدی و سه‌بعدی با استفاده از روش ترانشه معادل و روش سطح معادل پرداختند. نتایج حاصل نشان داد در شرایط کوتاه‌مدت ضریب اطمینان محاسبه‌شده در سطح معادل با و یا بدون در نظر گرفتن نسبت تمرکز تنش از ضریب اطمینان روش ترانشه معادل بیشتر می‌باشد ولی اختلاف ضرایب اطمینان در حالت بلندمدت کمتر می‌شود. بهسازی زمین با استفاده از ستون‌های سنگی نیاز به استفاده از مقدار قابل توجهی از ستون‌های سنگی به‌صورت گروه ستون‌های سنگی می‌باشد. این موضوع به معنی مدل‌سازی پیچیده هندسه واقعی مسئله می‌باشد. روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی عددی و تحلیلی ستون سنگی وجود دارد که عبارتند از: (۱) مدل‌سازی ستون‌های سنگی در حالت سه‌بعدی (۲) مدل‌سازی ستون سنگی در حالت ترانشه سنگی معادل (۳) مدل‌سازی خاک و ستون سنگی در

1 Individual Stone Column

2 Equivalent Trench Method

بین نتایج حاصل از آزمایش‌ها با نتایج حاصل از روابط تحلیلی انجام شده‌است.

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

$$\tan \phi_{ave} = A_r \tan \phi_c + (1 - A_r) \tan \phi_s \quad (2)$$

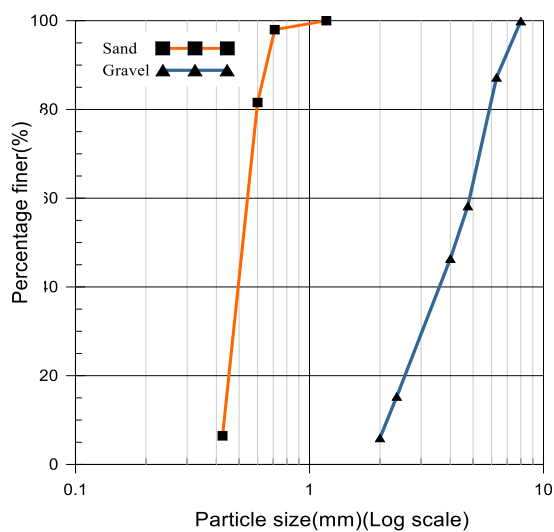
در روابط فوق:  $\phi_{ave}$  = زاویه اصطکاک معادل،  $\phi_c$  = زاویه اصطکاک مصالح بستر،  $\tau_{ave}$  = مقاومت برشی معادل،  $A_r$  = نسبت ناحیه اصلاح‌شده و  $\tau_c$  = تنش برشی مصالح ستون سنگی،  $\tau_s$  = تنش برشی مصالح بستر می‌باشند.

### ۳- مصالح و انجام آزمایش

#### ۳-۱- مصالح ماسه بستر و ستون سنگی

در این مطالعه از مصالح ماسه با اندازه دانه‌بندی بین ۰/۴۲۵ میلی‌متر تا ۱/۱۸ میلی‌متر برای ساخت بستر سست ماسه‌ای و مصالح سنگی با اندازه دانه‌بندی بین ۲ تا ۸ میلی‌متر برای ساخت ستون‌های سنگی، استفاده شده‌است. در شکل ۲ منحنی دانه‌بندی مصالح مورد استفاده نشان داده شده‌است.

برای به دست آوردن مشخصات مصالح بستر و ستون سنگی از آزمایش برش مستقیم مقیاس بزرگ استفاده شد که نتایج در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده‌است. با توجه به اینکه ستون‌های سنگی



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مصالح ماسه (S) و شن (G)

Fig. 2. Particle size distribution for sand and gravels

۱-ب) و سطح معادل (EAM<sup>1</sup>) (شکل ۱-ج) استفاده نمود [۲۴ و ۲۵]. در این مقاله آرایش ستون‌های سنگی در حالت‌های مجزا و ترانشه و سطح معادل مورد بررسی قرار گرفته‌است. در ادامه به دلیل اهمیت موضوع به صورت خلاصه به معرفی روش ترانشه معادل و سطح معادل پرداخته شده‌است.

#### ۲-۱- روش‌های معادل‌سازی در حالت دوبعدی

##### ۲-۱-۱- ترانشه معادل

در این روش ستون‌های سنگی قرار گرفته در شکل ۱-الف را می‌توان با آرایش ترانشه معادل مطابق شکل ۱-ب برای تحلیل در حالت کرنش مسطح جایگزین نمود. نسبت‌های ناحیه اصلاح‌شده در هر دو روش ستون سنگی مجزا و ترانشه معادل یکسان در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه مشخصات مصالح مورد استفاده در ترانشه معادل و ستون سنگی با یکدیگر برابر و عرض ترانشه متناسب با نسبت ناحیه اصلاح‌شده محاسبه می‌شود.

##### ۲-۱-۲- روش سطح معادل

روش سطح معادل شامل معادل نمودن ستون‌های سنگی و خاک سست اطراف آن با خاک معادل با خواص بهبودیافته می‌باشد. در این روش ستون‌های سنگی قرار گرفته در شکل ۱-الف را می‌توان با آرایش سطح معادل مطابق شکل ۱-ج جایگزین نمود. این حالت باعث ساده‌سازی در ساخت هندسه مدل می‌شود. در مسائل طراحی این روش اجازه تغییر در نسبت ناحیه اصلاح‌شده را بدون تغییر در هندسه مدل فراهم می‌سازد. خواص مصالح معادل بر اساس معدل‌گیری وزنی پارامترهای مربوط به مصالح ستون سنگی و خاک اطراف در نسبت ناحیه اصلاح‌شده مربوط تعیین می‌شوند.

در ادبیات فنی روابط تحلیلی به منظور محاسبه مقاومت برشی و پارامترهای مقاومت برشی خاک مرکب (خاک مسلح‌شده با ستون سنگی) ارائه شده‌است. بارکسدال و باچوز [۱] رابطه ۱ را برای محاسبه مقاومت برشی و رابطه ۲ را برای محاسبه زاویه اصطکاک معادل در زمین‌های بهسازی‌شده با ستون سنگی ارائه نمودند. روابط ارائه‌شده بر اساس میانگین‌گیری پارامترهای خاک بستر و مصالح ستون سنگی محاسبه می‌شوند. با توجه به روابط ارائه‌شده در این مطالعه مقایسه

1 Equivalent Area Method

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

Table 1. Properties of fine sand used for construction of bed

مقادیر	پارامتر
۲/۶۶	چگالی ویژه
۱۷/۵	وزن مخصوص خشک حداکثر ( $\text{kN/m}^3$ )
۱۵/۴	وزن مخصوص خشک حداقل ( $\text{kN/m}^3$ )
۱۶	وزن مخصوص خشک در تراکم نسبی ۳۲/۵ ( $\text{kN/m}^3$ )
۳۳	زاویه اصطکاک در حالت حداکثر و تراکم نسبی ۳۲/۵ (درجه)
۳۰	زاویه اصطکاک در جابجایی ۳۰/۵ میلی متر و تراکم نسبی ۳۲/۵ (درجه)
SP	طبقه بندی بر اساس سیستم متحد

جدول ۲. مشخصات مصالح ستون سنگی (G) استفاده شده برای ساخت ستون سنگی

Table 2. Properties of granular material(s) used for construction of stone columns

پارامتر	مقادیر
۲/۷۰	چگالی ویژه
۱۷	وزن مخصوص خشک حداکثر ( $\text{kN/m}^3$ )
۱۴/۷	وزن مخصوص خشک حداقل ( $\text{kN/m}^3$ )
۱۶/۵	وزن مخصوص خشک در تراکم نسبی ۸۰ ( $\text{kN/m}^3$ )
۴۵	زاویه اصطکاک در حالت حداکثر و تراکم نسبی ۸۰ (درجه)
۳۵	زاویه اصطکاک در جابجایی ۳۰/۵ میلی متر و تراکم نسبی ۸۰ (درجه)
GP	طبقه بندی بر اساس سیستم متحد

برشی در طول آزمایش، از دو عدد لودسل کلاس S با ظرفیت ۲۰ کیلونیوتن استفاده شد. برای اندازه گیری جابجایی های افقی از یک عدد خطکش دیجیتالی ( $\text{LVDT}^1$ ) با قابلیت سنجش جابجایی حداکثر برابر با ۱۰ سانتی متر استفاده شد. تمام نمونه های مورد آزمایش در نرخ جابه جایی افقی یکنواخت معادل ۱ میلی متر در دقیقه تحت اعمال برش قرار گرفتند.

### ۳-۳- برنامه آزمایش ها

با توجه موضوع مطالعه برنامه آزمایش ها مطابق جدول ۳ تهیه شده است. در این مطالعه تعداد ۲۱ سری آزمایش برش مستقیم انجام شده است. به منظور رسم پوش گسیختگی آزمایش های برش مستقیم در ۳ تنش قائم ۵۵، ۷۵ و ۱۰۰ کیلو پاسکال انجام شد. در جدول ۳

مورد بررسی در این مطالعه دارای قطر کمتری نسبت به موارد اجرایی در محل است، برای انتخاب مناسب اندازه مصالح ستون سنگی مطابق با پیشنهاد نظری فشار و همکارانش [۱۴]، نایاک [۲۶] و فتاح و همکارانش [۱۷] در این مطالعه حداکثر نسبت قطر دانه ها به قطر ستون سنگی برابر با  $\frac{1}{6}$  انتخاب شد. بر اساس قطر ستون های سنگی ارائه شده در جدول ۳ حداکثر قطر مصالح مورد استفاده می تواند در محدوده ۱۰ تا ۲۳ میلی متر قرار بگیرد لذا بر این اساس قطر مصالح سنگی در محدوده ۲ تا ۸ میلی متر انتخاب شد.

### ۳-۲- ابزار انجام آزمایش

برای انجام آزمایش های مورد نظر از دستگاه برش مستقیم بزرگ با ابعاد افقی جعبه برابر با  $305 \times 305$  میلی متر مربع و عمق ۱۵۲ میلی متر استفاده شده است. برای اندازه گیری و ثبت نیروهای قائم و

1 Linear Variable Differential Transformer

جدول ۳. لیست انجام آزمایش‌ها در دستگاه برش مستقیم

Table 3. Summary of experimental tests

اسم آزمایش	آرایش قرارگیری	نسبت ناحیه اصلاح‌شده (درصد)
S	بستر ماسه‌ای سست - بدون بهسازی	۰
S-G-C-۲۵٪	بستر ماسه‌ای با ستون سنگی منفرد - قطر ۱۷۲ میلی‌متر	۲۵
S-G-C-۱۶٪	بستر ماسه‌ای با ستون سنگی منفرد - قطر ۱۳۹/۵ میلی‌متر	۱۶/۴
S-G-C-۱۲٪	بستر ماسه‌ای با ستون سنگی منفرد - قطر ۱۱۹ میلی‌متر	۱۲
S-G-C-۸٪	بستر ماسه‌ای با ستون سنگی منفرد - قطر ۱۰۰ میلی‌متر	۸/۴
S-G-SQ-۱۶٪	بستر ماسه‌ای با ستون سنگی با آرایش مربعی - قطر ۷۰ میلی‌متر	۱۶/۴
S-G-SQ-۱۲٪	بستر ماسه‌ای با ستون سنگی با آرایش مربعی - قطر ۶۰ میلی‌متر	۱۲
S-G-SQ-۸٪	بستر ماسه‌ای با ستون سنگی با آرایش مربعی - قطر ۵۰ میلی‌متر	۸/۴
S-G-TR-۱۶٪	بستر ماسه‌ای با ستون سنگی با آرایش مثلثی - قطر ۸۰/۵ میلی‌متر	۱۶/۴
S-G-C-W-۲۵٪	ترانشه معادل (یک ترانشه، ضخامت ترانشه ۲۶ میلی‌متر)	۲۵
S-G-C-W-۱۶٪	ترانشه معادل (یک ترانشه، ضخامت ترانشه ۳۶/۴ میلی‌متر)	۱۶/۴
S-G-C-W-۱۲٪	ترانشه معادل (یک ترانشه، ضخامت ترانشه ۵۰ میلی‌متر)	۱۲
S-G-C-W-۸٪	ترانشه معادل (یک ترانشه، ضخامت ترانشه ۷۶ میلی‌متر)	۸/۴
S-G-SQ-W-۱۶٪	ترانشه معادل (دو ترانشه، ضخامت ترانشه ۲۵ میلی‌متر)	۱۶/۴
S-G-SQ-W-۱۲٪	ترانشه معادل (دو ترانشه، ضخامت ترانشه ۱۸/۲ میلی‌متر)	۱۲
S-G-TR-W-۱۶٪	ترانشه معادل (دو ترانشه، ضخامت ترانشه ۳۳/۴ و ۱۶/۷ میلی‌متر)	۱۶/۴
S-G-MIX-۲۵٪	سطح معادل	۲۵
S-G-MIX-۱۶٪	سطح معادل	۱۶/۴
S-G-MIX-۱۲٪	سطح معادل	۱۲
S-G-MIX-۸٪	سطح معادل	۸/۴
G	مصالح سنگی	۱۰۰

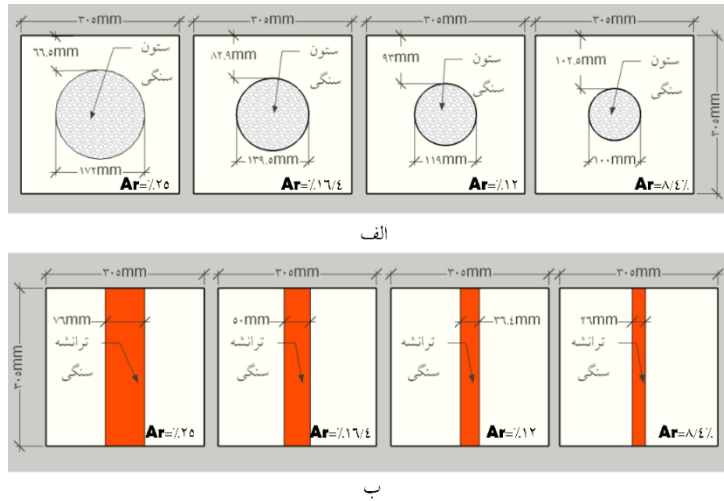
W= آرایش مثلث-TR= آرایش مربع-SQ= آرایش منفرد-C= آرایش سطح معادل-MIX= آرایش ترانشه معادل  
S= ماسه- G= مصالح سنگی

ترانشه معادل در شکل‌های ۳ تا ۵ نشان داده شده‌است. جهت اعمال برش در حالت ترانشه معادل عمود بر ترانشه می‌باشد. در شکل ۶ نمونه‌های ساخته‌شده در دستگاه برش مستقیم در آرایش‌های مختلف نشان داده شده‌است.

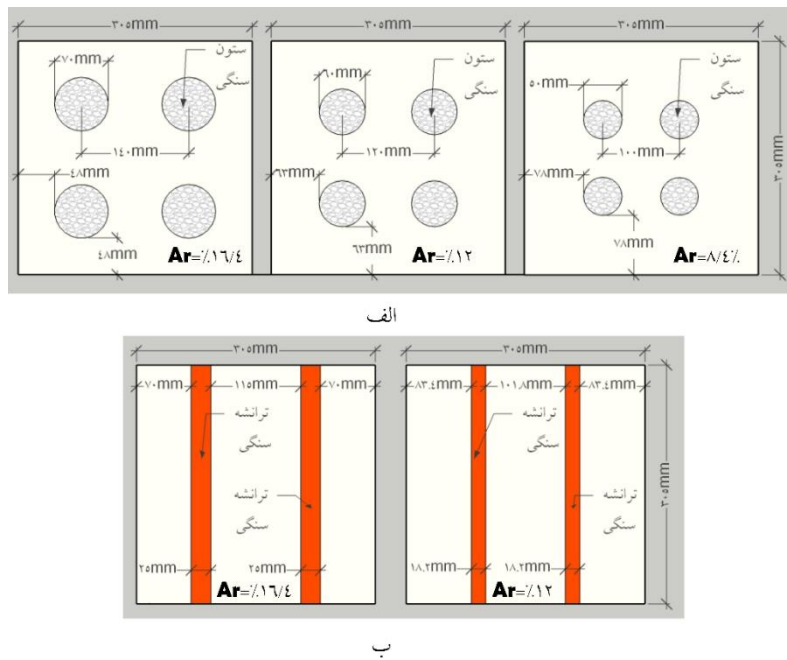
#### ۳-۴- آماده‌سازی بستر و ستون سنگی

برای ساخت ستون سنگی از لوله‌های مخصوص با قطر داخلی معادل با قطر ستون سنگی و برای ساخت ترانشه معادل از قالب‌های مخصوص با ضخامت مورد نظر ترانشه معادل استفاده شد. برای ساخت

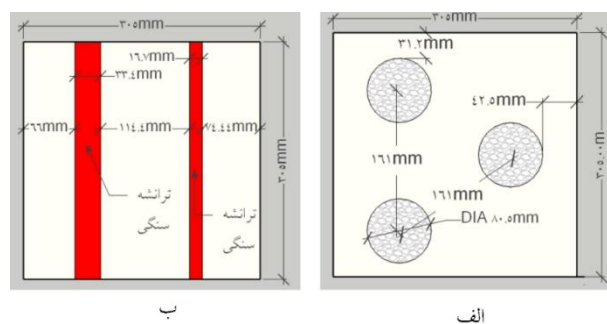
برای مشخص نمودن نام آزمایش‌ها از علامت‌های اختصاری استفاده شده‌است. در علامت‌های اختصاری، حرف اول نشان‌دهنده مصالح خاک بستر و حرف دوم نشان‌دهنده مصالح ستون سنگی و حرف سوم نشان‌دهنده نوع آرایش ستون سنگی و عدد آخر نشان‌دهنده نسبت ناحیه اصلاح‌شده می‌باشد. در آرایش ترانشه معادل حرف چهارم (W) به نامگذاری آزمایش‌ها اضافه شده‌است. تعداد ۵ عدد آزمایش به‌منظور کنترل تکرارپذیری نتایج آزمایش‌ها انجام شد و نتایج حاصل بیانگر تطابق بسیار خوب بین آزمایش‌های انجام شده می‌باشد. پلان آرایش قرارگیری ستون‌های سنگی در آرایش منفرد، مربع و مثلث و



شکل ۳. الف) پلان آرایش قرارگیری ستون سنگی مجزا در آرایش منفرد ب) پلان قرارگیری ترانشه معادل متناظر با آرایش منفرد  
Fig. 3. a) Plan of individual columns in a single arrangement b) Equivalent trench plan equal to a single arrangement area

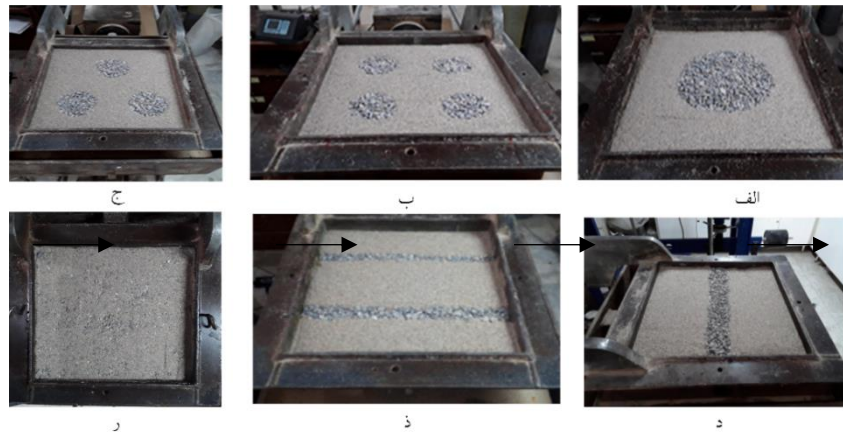


شکل ۴. الف) پلان آرایش قرارگیری ستون سنگی مجزا در آرایش مربع ب) پلان قرارگیری ترانشه معادل متناظر با آرایش مربع  
Fig. 4. a) Plan of individual columns in a square arrangement b) Equivalent trench plan equal to a square arrangement



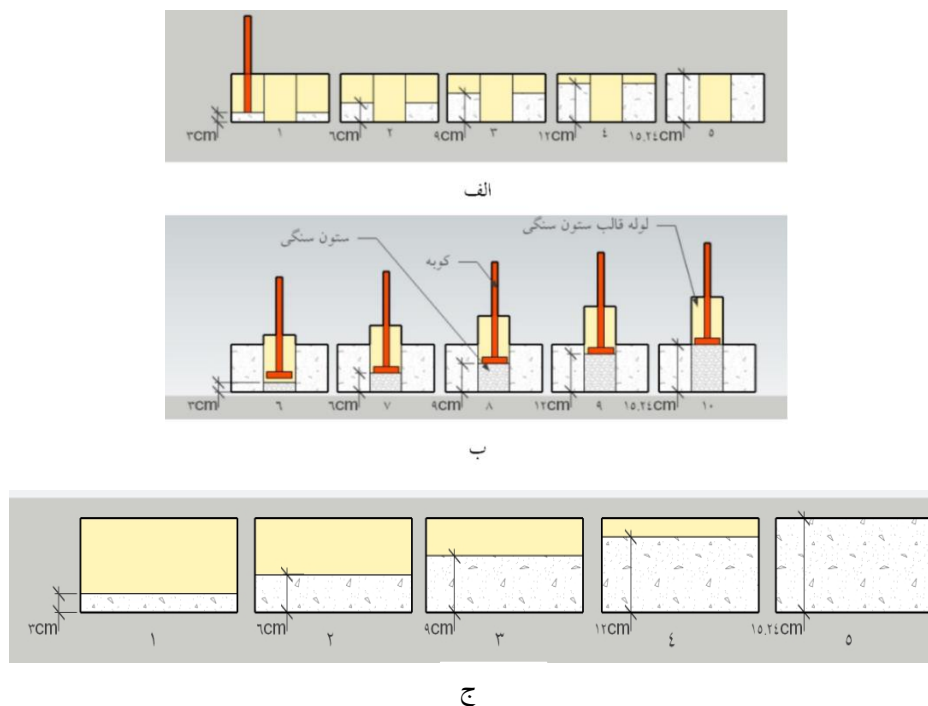
شکل ۵. الف) پلان آرایش قرارگیری ستون سنگی مجزا در آرایش مثلثی ب) پلان قرارگیری ترانشه معادل متناظر با آرایش مثلث  
Fig. 5. a) Plan of individual columns in a triangle arrangement b) Equivalent trench plan equal to a triangle arrangement





شکل ۶. نمونه مدل ساخته شده در داخل جعبه دستگاه برش مستقیم بزرگ (الف) آرایش منفرد (ب) آرایش مربع (ج) آرایش مثلث (د) تبدیل آرایش منفرد به ترانشه معادل (ذ) تبدیل آرایش مربع و مثلث به ترانشه معادل (ر) آرایش سطح معادل

Fig. 6. Model in large direct shear test (a) single stone columns (b) square stone columns (c) triangle stone columns (d) single stone columns converted to Equivalent trench (e) square and triangle stone column converted to equivalent trench (f) Homogenized area

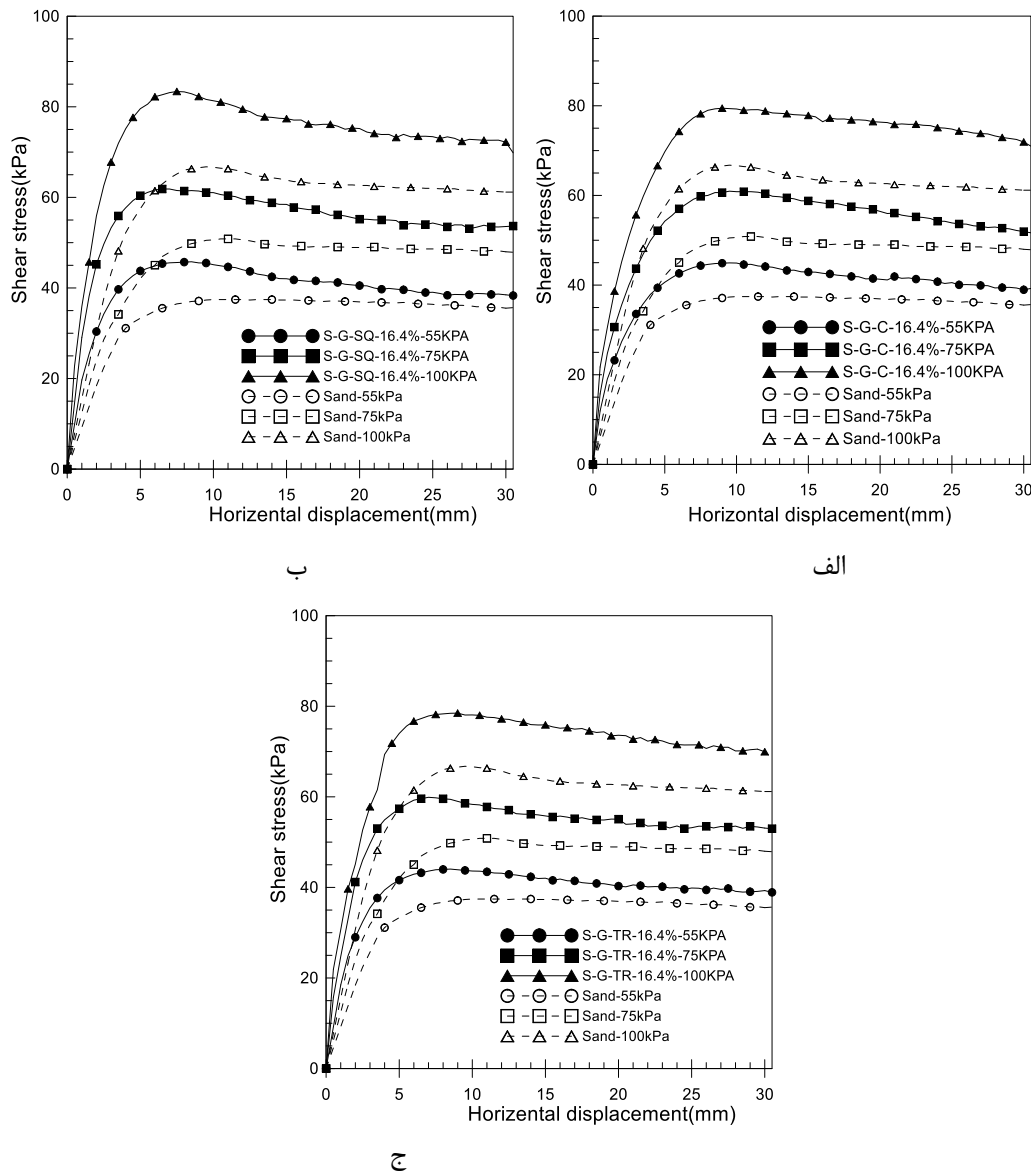


شکل ۷. مراحل آماده سازی (الف) بستر در حالت ستون سنگی و ترانشه معادل (ب) ستون سنگی و ترانشه معادل (ج) سطح معادل

Fig. 7. Preparation steps of a) bed b) construction of individual stone columns and equivalent trench c) Homogenized area

لایه‌های به ضخامت ۳ سانتی‌متر در داخل جعبه دستگاه برش مستقیم در اطراف لوله‌ها و قالب مورد نظر ریخته شد (شکل ۷-الف). با توجه به این نکته که هدف مطالعه بررسی مقاومت برشی در زمین‌های سست می‌باشد لذا روی مصالح بستر هیچ‌گونه عملیات تراکمی انجام اعمال نشد. پس از ساخت بستر ماسه‌ای، مصالح ستون سنگی و

نمونه‌ها در ابتدا لوله‌ها و قالب‌های تهیه شده، مطابق با آرایش مورد نظر در داخل جعبه خالی دستگاه برش مستقیم قرارگرفت و توسط شابلون‌های مخصوص از جابجایی آن‌ها هنگام ساخت جلوگیری شد. در هر آزمایش ماسه خشک بر اساس وزن مخصوص ۱۶ کیلونیوتن بر مترمکعب از قبل وزن شده و به ۵ قسمت مساوی تقسیم و در



شکل ۸. تنش برشی در برابر جابجایی افقی برای نسبت ناحیه اصلاح ۱۶٪ در حالت آرایش مجزای الف) منفرد ب) مربعی ج) مثلثی  
 Fig. 8. Shear stress vs. horizontal displacement in individual columns  $A_r = 16\%$ : a) single b) square c) triangle

وزن مخصوص یکسان در کل طول ساخت، انرژی کوبشی یکسانی برای مصالح در نظر گرفته شد. مقدار انرژی تراکم به گونه‌ای انتخاب گردید که از انبساط جانبی ستون سنگی و در نتیجه دست‌خوردگی خاک اطراف جلوگیری شود. بر اساس استاندارد ASTM-D-3080 نسبت سطح کوبه به سطح ستون‌های سنگی در آرایش‌های مختلف برابر با ۰/۵ یا کمتر در نظر گرفته شد. در حالت اجرای ترانشه معادل برای تراکم مصالح از یک میله مخصوص تراکم با ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر و قطر ۱۶ میلی‌متر با وزن ۱۰ نیوتن مطابق با استاندارد ASTM-C29 استفاده شد.

ترانشه معادل از جنس شن با توجه به حجم موردنیاز و وزن مخصوص ۱۶/۵ کیلو نیوتن بر مکعب وزن شده و مصالح مورد نیاز به ۵ قسمت تقسیم شده و در داخل لوله‌ها ریخته شده و در ضخامت‌های ۳ سانتی‌متری متراکم شد (شکل ۷-ب).

در آرایش سطح معادل مصالح بستر و ستون سنگی متناسب با نسبت ناحیه اصلاح شده با یکدیگر مخلوط شده و مورد آزمایش قرار گرفت. مصالح ترکیب شده به پنج قسمت مساوی تقسیم و در لایه‌های ۳ سانتی‌متری در داخل جعبه‌دستگاه برش مستقیم مطابق شکل ۷-ج ریخته شد. برای ساخت ستون سنگی و ترانشه معادل با



جدول ۴. درصد افزایش مقاومت برشی نسبت به بستر ماسه‌ای در آرایش مجزای منفرد، مربع و مثلث

Table 4. Percentage of increase in shear strength compared to sand bed in single, square and triangle arrangement

آرایش قرارگیری	حالت حداکثر		حالت متناظر با جابجایی ۱۰ درصد			
	تنش قائم (کیلو پاسکال)					
	۵۵	۷۵	۱۰۰	۵۵	۷۵	۱۰۰
S-G-C-۲۵٪	٪۲۸	٪۲۹	٪۳۱	٪۱۰	٪۱۵	۱۹٪
S-G-C-۱۶٪۴	۱۷٪	٪۱۹	٪۱۹	٪۱۰	۱۱٪	٪۱۴
S-G-C-۱۲٪	٪۱۵	٪۱۵	۱۶٪	٪۱۰	٪۱۳	۱۴٪
S-G-C-۸٪۴	٪۱۲	٪۱۱	٪۱۰	۷٪	۱۱٪	۱۲٪
S-G-SQ-۱۶٪۴	۲۲٪	٪۲۳	٪۲۵	۷٪	٪۱۳	۱۴٪
S-G-SQ-۱۲٪	۲۰٪	٪۱۹	٪۲۲	۷٪	٪۱۱	۱۲٪
S-G-SQ-۸٪۴	۱۷٪	٪۱۷	٪۱۷	۱۳٪	٪۱۱	۱۲٪
S-G-TR-۱۶٪۴	۲۰٪	٪۲۱	٪۲۲	٪۱۰	٪۱۱	۱۴٪

#### ۴- نتایج حاصل از آزمایش‌ها

##### ۴-۱- مقاومت برشی در حالت آرایش منفرد و مربع و مثلث

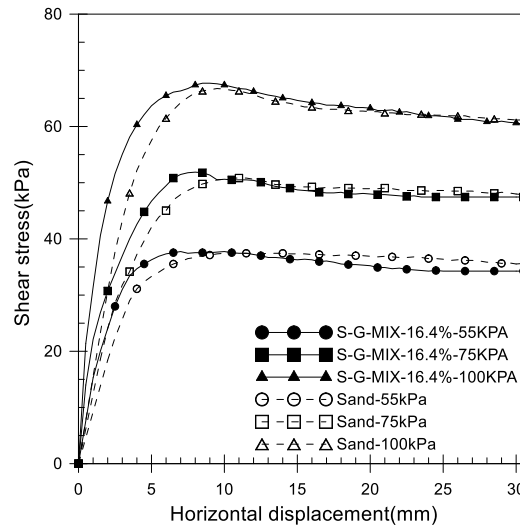
نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه بیانگر افزایش مقاومت برشی بستر ماسه‌ای بهسازی شده با ستون سنگی مجزا در آرایش‌های منفرد و مربع و مثلث به دلیل مقاومت برشی بالای ترکیب خاک-ستون سنگی می‌باشد (شکل ۸). ترکیب خاک و ستون سنگی به صورت یک جسم مرکب عمل نموده و موجب افزایش مقاومت برشی نسبت به حالت بستر ماسه‌ای سست می‌شود. هم‌چنین مقاومت برشی با افزایش نسبت ناحیه اصلاح شده ستون سنگی نیز افزایش می‌یابد و دلیل آن افزایش سطح تاثیر ستون سنگی در صفحه برش می‌باشد. در جدول ۴ درصد افزایش مقاومت برشی در آرایش‌های منفرد و مربع و مثلث نسبت به بستر سست ماسه‌ای برای درصدهای مختلف نسبت ناحیه اصلاح ارائه شده است. نتایج فوق بیانگر آن است که افزایش مقاومت برشی حداکثر (پیک) به ازای نسبت ناحیه اصلاح شده یکسان در حالت آرایش مربع و مثلثی بیشتر از آرایش منفرد است و بیشترین آن در آرایش مربع می‌باشد. این نتیجه بیانگر تاثیر هندسه آرایش قرارگیری ستون سنگی به ازای یک ناحیه اصلاح شده یکسان می‌باشد. افزایش مقاومت برشی در آرایش مربع و مثلثی نسبت به آرایش منفرد به دلایل زیر باشد که عبارتند از:

۱. یکی از دلایل افزایش مقاومت برشی در آرایش مربع و مثلث،

افزایش فشار محدودکننده توسط ستون‌های سنگی در خاک مقید شده در بین ستون‌های سنگی می‌باشد که باعث افزایش مقاومت در این خاک می‌شود [۲۰].

۲. از دلایل دیگر افزایش سطح جانبی ستون‌های سنگی با تغییر آرایش از حالت منفرد به مثلث و مربع می‌باشد که این افزایش سطح جانبی باعث وارد شدن نیروی جانبی بیشتر به مصالح ستون سنگی شده و در نتیجه باعث بسیج شدن بیشتر مقاومت برشی مصالح ستون سنگی می‌شود.

هم‌چنین با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که شیب نمودارهای تنش برشی-جابجایی افقی افزایش یافته است که نشان دهنده افزایش سختی مصالح به دلیل حضور ستون سنگی می‌باشد. هم‌چنین به طور کلی می‌توان گفت که نوع چیدمان ستون سنگی در افزایش سختی مؤثر بوده و حالت آرایش مربع بیشترین افزایش سختی را ایجاد کرده است. برای نمونه در شکل ۸ نمودارهای تنش برشی در برابر جابجایی در آرایش‌ها و نسبت ناحیه اصلاح شده ۱۶/۴ درصد در تنش‌های قائم ۵۵، ۷۵ و ۱۰۰ کیلوپاسکال ارائه شده است. نتایج ارائه شده در جدول ۴ نشان می‌دهد که مقاومت برشی با افزایش کمی در نسبت‌های ناحیه اصلاح شده زیر ۱۵ درصد همراه می‌باشد و در نسبت‌های ناحیه اصلاح شده بالای ۱۵ درصد افزایش بیشتری نشان می‌دهد.



شکل ۹. تنش برشی در برابر جابجایی افقی برای آرایش سطح معادل در نسبت ناحیه اصلاح شده ۱۶/۴ درصد

Fig. 9. Shear stress vs. horizontal displacement in homogenized area  $Ar=16.4$

جدول ۵. درصد افزایش مقاومت برشی نسبت به بستر ماسه‌ای در آرایش سطح معادل در نسبت ناحیه اصلاح شده ۱۶/۴ درصد

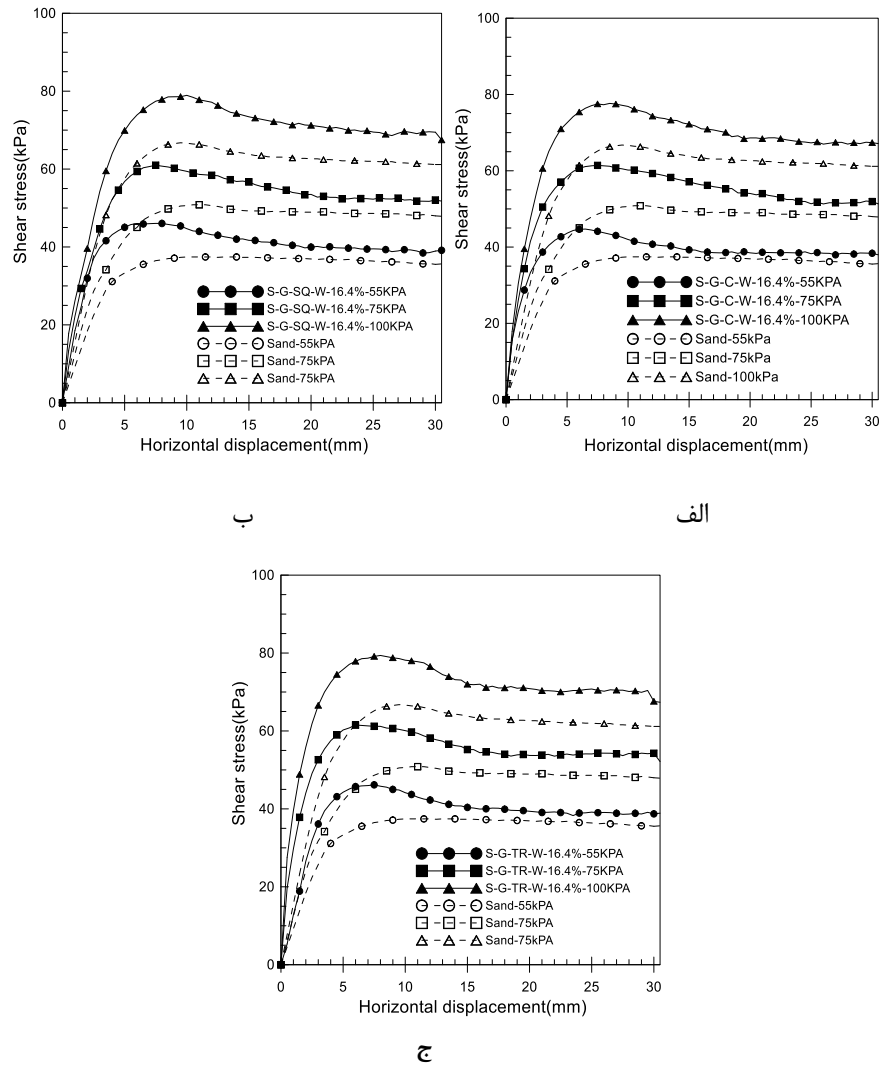
Table 5. Percentage of increase in shear strength compared to sand bed in homogenized area  $Ar:16.4\%$

آرایش قرارگیری	حالت متناظر با جابجایی ۱۰ درصد		تنش قائم (کیلو پاسکال)			
	حالت حداکثر		۵۵		۷۵	
	۵۵	۷۵	۱۰۰	۵۵	۷۵	۱۰۰
S-G-mix-۲۵٪	۵٪	۲٪	۱٪	۰	۰	۰
S-G-mix-۱۶/۴٪	۳٪	۲٪	۱٪	۰	۰	۰
S-G-mix-۱۲٪	۳٪	۲٪	۱٪	۰	۰	۰
S-G-mix-۸/۴٪	۳٪	۲٪	۱٪	۰	۰	۰

#### ۲-۴- مقاومت برشی در حالت سطح معادل

در شکل ۹ نمودار تنش برشی تنش در برابر جابجایی افقی برای آرایش سطح معادل و نسبت ناحیه اصلاح شده ۱۶/۴ درصد نشان داده شده است. با توجه به شکل ۹ مشخص می‌باشد که در آرایش سطح معادل افزایش مقاومت برشی قابل توجه نسبت به بستر سست ماسه‌ای مشاهده نمی‌شود. در نسبت‌های ناحیه اصلاح شده ۸/۴ تا ۲۵ درصد مورد استفاده حجم مصالح سنگی مورد استفاده در آرایش سطح معادل پایین بوده و عملاً مصالح سنگی به صورت شناور در میان مصالح ماسه می‌باشند و امکان ارتباط دانه به دانه بین مصالح سنگی وجود نداشته است و این امر باعث عدم افزایش مقاومت برشی و بالطبع عدم

افزایش در زاویه اصطکاک داخلی در این آرایش شده است. در جدول ۵ درصد تغییرات مقاومت برشی در آرایش سطح معادل نسبت به بستر سست ماسه‌ای در هر دو حالت حداکثر و حالت متناظر با جابجایی افقی ۱۰ درصد در تمامی نسبت‌های ناحیه اصلاح شده نشان داده شده است. بررسی‌های انجام گرفته توسط ابوشرار و همکارانش [۲۲] و ژانگ و همکاران [۲۳] نشان داده است که مقاومت برشی حاصل از سطح معادل از روش‌های ستون سنگی مجزا و ترانسه معادل بیشتر می‌باشد. ولی نتایج آزمایش این مطالعه نشان داده است که مقاومت برشی در روش سطح معادل در نسبت‌های جایگزینی مورد استفاده در ستون‌های سنگی نسبت به آرایش‌های دیگر کمتر می‌باشد.



شکل ۱۰. تنش برشی در برابر جابجایی افقی برای نسبت جایگزینی ۱۶/۴٪ در حالت آرایش ترانشه معادل الف) S-G-C-W ب) S-G-SQ-W ج) S-G-TR-W

افزایش مقاومت برشی بستر ماسه‌ای با وجود ترانشه معادل به دلیل مقاومت برشی بالای ترکیب خاک ترانشه معادل می‌باشد. ترکیب خاک ماسه‌ای سست و ترانشه معادل به صورت یک جسم مرکب عمل نموده و مقاومت برشی بالاتری نسبت به حالت بستر ماسه‌ای سست ایجاد می‌نماید. نتایج بیانگر آن است که با افزایش نسبت ناحیه اصلاح سختی و مقاومت برشی افزایش می‌یابد. هم‌چنین نتایج حاصل نشان می‌دهد که در یک نسبت ناحیه اصلاح شده یکسان مقدار افزایش مقاومت برشی ترانشه معادل حاصل از آرایش مربع (دو ترانشه) از مقادیر مقاومت برشی ترانشه معادل حاصل از آرایش منفرد (یک ترانشه) بیشتر می‌باشد. با توجه به این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که نوع چیدمان ترانشه معادل در افزایش سختی مؤثر بوده و

۳-۴- مقاومت برشی در حالت آرایش ترانشه معادل  
مقدار نسبت ناحیه اصلاح شده در آزمایش‌های ستون سنگی با آرایش ترانشه معادل برابر با نسبت ناحیه ستون‌های سنگی مجزا و مربعی و مثلثی نظیر آن در نظر گرفته شد تا به لحاظ مقایسه مبنای صحیحی در نظر گرفته شود به عبارتی دیگر آرایش ستون‌های سنگی مجزا در هر آرایش و نسبت ناحیه اصلاح شده با ترانشه معادل جایگزین شده است. در شکل ۱۰ نمودار تنش برشی در جابجایی افقی و در جدول ۶ مقدار افزایش مقاومت برشی در آرایش ترانشه معادل نسبت به بستر سست ماسه‌ای در هر دو حالت حداکثر و حالت متناظر با جابجایی افقی ۱۰ درصد، نشان داده شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در حالت ترانشه معادل نشان‌دهنده

جدول ۶. درصد افزایش مقاومت برشی نسبت به بستر ماسه‌ای در آرایش ترانشه معادل

Table 6. Percentage of increase in shear strength compared to sand bed in equivalent trench arrangement

آرایش قرارگیری	حالت حداکثر			حالت متناظر با جابجایی ۱۰ درصد		
	تنش قائم (کیلو پاسکال)					
	۵۵	۷۵	۱۰۰	۵۵	۷۵	۱۰۰
S-G-C-W-۲۵٪	٪۲۴	٪۲۵	٪۲۶	٪۱۴	٪۸	٪۱۵
S-G-C-W-۱۶٪/۴	٪۲۱	٪۲۱	٪۱۸	٪۸	٪۶	٪۱۰
S-G-C-W-۱۲٪	٪۱۸	٪۱۷	٪۱۵	٪۸	٪۶	٪۱۰
S-G-C-W-۸٪/۴	٪۱۶	٪۱۳	٪۱۲	٪۸	٪۶	٪۱۰
S-G-SQ-W-۱۶٪/۴	٪۲۴	٪۱۹	٪۲۱	٪۱۱	٪۸	٪۱۱
S-G-SQ-W-۱۲٪	٪۲۱	٪۱۵	٪۱۶	٪۶	٪۱۰	٪۱۱
S-G-TR-W-۱۶٪/۴	۲۰٪	٪۱۵	٪۱۶	٪۴	٪۱۱	٪۱۱

جدول ۷. درصد افزایش مقاومت برشی ستون سنگی مجزا در آرایش منفرد و مربع به آرایش ترانشه معادل متناظر

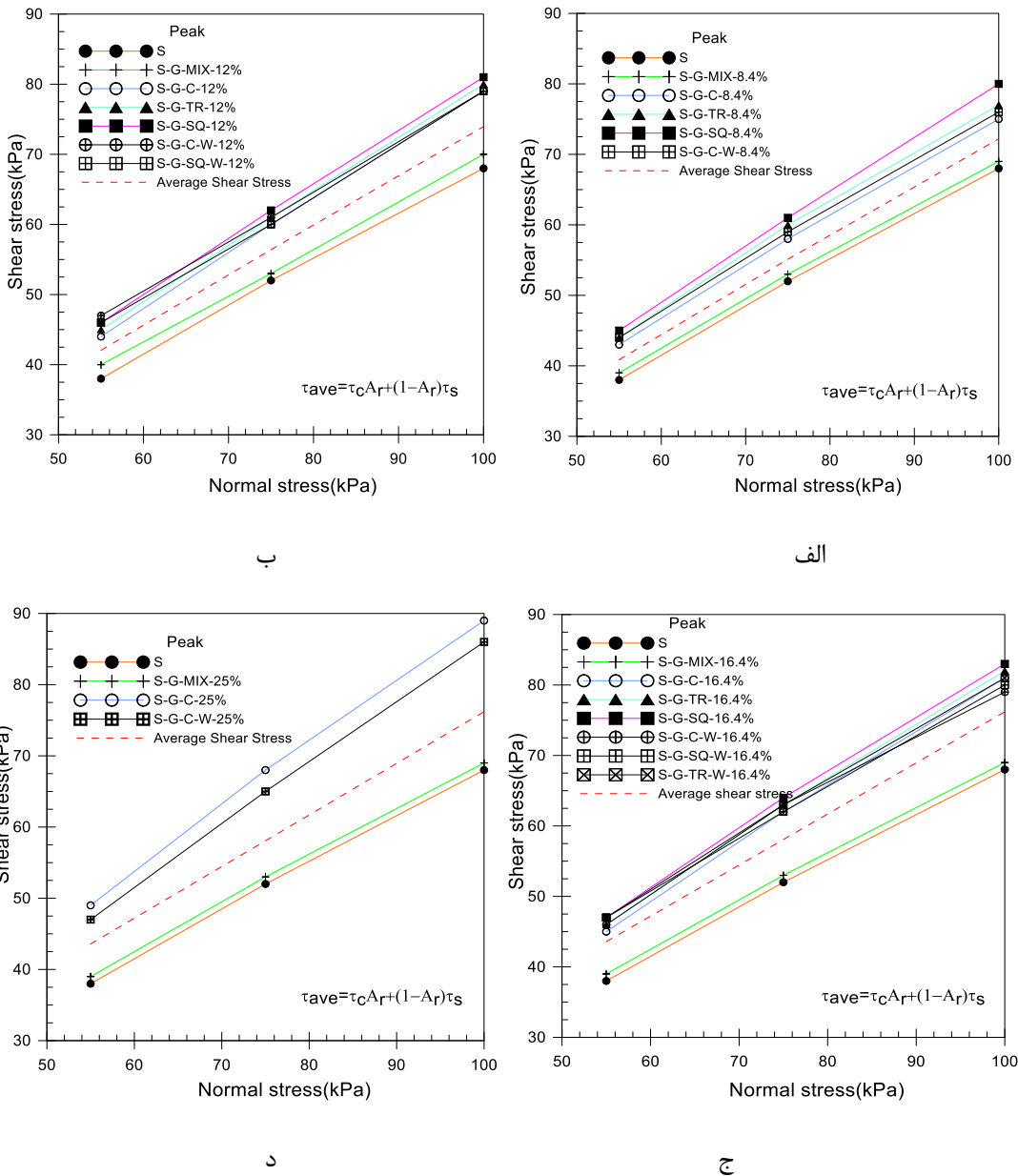
Table 7. Percentage of increase in shear strength in single and square arrangement corresponding to equivalent trench arrangement

نوع آرایش ترانشه معادل	حالت حداکثر			حالت متناظر با جابجایی ۱۰ درصد		
	۵۵	۷۵	۱۰۰	۵۵	۷۵	۱۰۰
S-G-C-W-۲۵٪	٪۴	٪۳	٪۳	۰	٪۶	٪۴
S-G-C-W-۱۶٪/۴	۰	۰	٪۱	٪۳	٪۴	٪۴
S-G-C-W-۱۲٪	۰	۰	٪۱	٪۳	٪۴	٪۱
S-G-C-W-۸٪/۴	۰	۰	۰	۰	٪۴	٪۳
S-G-SQ-W-۱۶٪/۴	۰	۳٪/۲	۳٪/۷	۰	۳٪/۸	٪۳
S-G-SQ-W-۱۲٪	۰	٪۳	٪۵	۲٪/۶	۰	۱/۴
S-G-TR-W-۱۲٪	۰	٪۲	٪۱	۰	٪۲	٪۳

صفر و با رسیدن به نسبت ناحیه اصلاح شده ۲۵ درصد اختلاف آن به ۴ درصد می‌رسد. در آرایش مربع متوسط اختلاف برابر ۴ درصد و در آرایش مثلث برابر ۲ درصد می‌باشد. در حالت جابجایی افقی معادل با ۱۰ درصد اختلاف به صورت متوسط برابر با ۴ درصد می‌باشد. با توجه به نتایج مشخص می‌باشد که اختلاف بین نتایج در آرایش ستون سنگی مجزا و ترانشه معادل متناظر با آن زیر ۵ درصد بوده و قابل توجه نمی‌باشد. عدم افزایش مقاومت برشی در آرایش‌های ترانشه معادل نسبت به آرایش‌های منفرد و مربع و مثل متناظر می‌تواند به دلیل ضخامت کمتر ترانشه معادل نسبت به قطر

ترانشه معادل حاصل از ستون سنگی مجزا در آرایش مربع (دو ترانشه) بیشترین افزایش سختی را ایجاد کرده است. ژانگ و همکاران [۲۳] در تحلیل‌های عددی انجام شده نشان دادند که از ترانشه معادل در حالت دو بعدی می‌توان به جای ستون‌های سنگی در آرایش سه بعدی استفاده نمود.

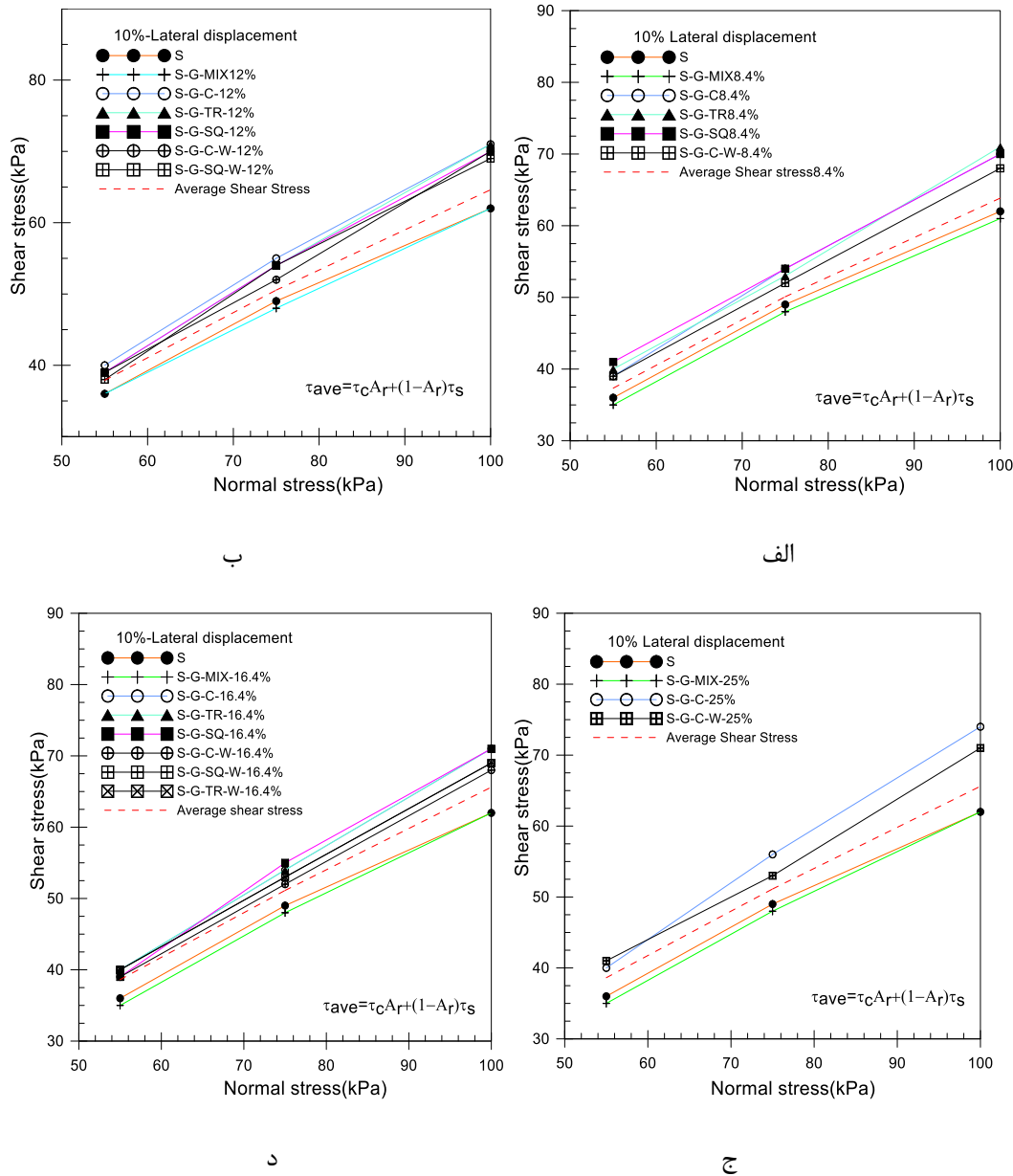
در جدول ۷ درصد افزایش مقاومت برشی در آرایش‌های ستون سنگی مجزا نسبت به ترانشه معادل متناظر آن در تمامی نسبت‌های ناحیه اصلاح شده ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در آرایش منفرد تا نسبت ناحیه اصلاح شده ۱۶/۴ درصد این اختلاف نزدیک



شکل ۱۱. تنش قائم در برابر تنش برشی در حالت حداکثر الف)  $A_r = 8.4\%$  ب)  $A_r = 12\%$  ج)  $A_r = 16.4\%$  د)  $A_r = 25\%$   
**Fig. 11. Vertical stress vs. Shear stress** a)  $A_r = 8.4\%$  b)  $A_r = 12\%$  c)  $A_r = 16.4\%$  d)  $A_r = 25\%$

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ پوش گسیختگی معیار موهر-کولمب برای مصالح بستر ماسه‌ای سست و ماسه سست مسلح‌شده با ستون سنگی برای آرایش‌های مختلف در حالت مقاومت برشی حداکثر (پیک) و مقاومت برشی متناظر با جابجایی افقی ۱۰ درصد ارائه شده است. نتایج بیانگر افزایش مقاومت برشی با افزایش تنش قائم و نسبت ناحیه اصلاح‌شده در حالت حداکثر و متناظر با جابجایی افقی ۱۰ درصد می‌باشد. همچنین نتایج بیانگر آن است که افزایش مقاومت برشی در حالت حداکثر نسبت به حالت معادل با ۱۰ درصد جابجایی

ستون‌های سنگی باشد و در نتیجه این عضو به‌عنوان یک عضو لاغر محسوب می‌شود. دومین دلیل عدم یکسان بودن فشار محدودکننده جانبی وارد بر سطح ستون سنگی با فشار وارد شده وارد بر ترانشه معادل می‌باشد. به دلیل تشابه نتایج حاصل از آرایش ستون سنگی در حالت مجزا و ترانشه معادل مطابق با نتایج ارائه شده از آزمایش‌ها در جدول ۷ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در برنامه‌های کامپیوتری برای مدل‌سازی ستون سنگی می‌توان از آرایش ترانشه معادل به جای آرایش ستون‌های سنگی مجزا استفاده نمود.



شکل ۱۲. تنش قائم در برابر تنش برشی در حالت معادل با ۱۰٪ جابجایی افقی (الف) ۸/۴٪ (ب) ۱۲٪ (ج) ۱۶/۴٪ (د) ۲۵٪

نشان می‌دهد که در حالت مقاومت برشی حداکثر و حالت مقاومت برشی متناظر جابجایی افقی ۱۰ درصد در همه آرایش‌های فرارگیری، مقاومت برشی حاصل از نتایج آزمایش‌ها بیشتر از مقاومت برشی حاصل از روابط تحلیلی (رابطه ۱) می‌باشد و استفاده از رابطه تحلیلی ۱ محافظه‌کارانه می‌باشد.

#### ۴-۴- بهبود پارامترهای مقاومت برشی

در جدول ۸ پارامترهای مقاومت برشی حاصل از نتایج آزمایش‌ها

بیشتر می‌باشد. در آرایش‌های ستون سنگی مجزا افزایش مقاومت برشی در آرایش مربع بیشترین مقدار و در آرایش منفرد کمترین مقدار می‌باشد. مقاومت برشی آرایش‌های ترانسه معادل تقریباً برابر با مقاومت برشی آرایش ستون سنگی متناظر مجزا می‌باشد و آرایش سطح معادل دارای کمترین مقدار افزایش مقاومت برشی در آرایش‌های مورد بررسی می‌باشد. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مقایسه نتایج مقاومت برشی معادل حاصل از آزمایش‌ها با مقاومت برشی معادل حاصل از روابط تحلیلی (رابطه ۱) نشان داده شده است. نتایج



جدول ۸. پارامترهای مقاومت برشی معادل به دست آمده از آزمایش‌های مختلف و رابطه تحلیلی

Table 8. Equivalent shear strength parameters obtained from experiments and analytical relationships

مشخصه آزمایش	نسبت ناحیه اصلاح شده	پارامترهای حالت حداکثر			پارامترهای متناظر با ۱۰ درصد جابجایی		
		چسبندگی معادل (کیلو پاسکال)	زاویه اصطکاک معادل داخلی (درجه)	زاویه اصطکاک داخلی رابطه (۲)	چسبندگی معادل (کیلو پاسکال)	زاویه اصطکاک معادل داخلی (درجه)	زاویه اصطکاک داخلی رابطه (۲)
S	۰	۲	۳۳	-	۵	۳۰	-
S-G-C-۰.۲۵	۲۵	۱	۴۲	۳۶	۰	۳۴	۳۱
S-G-C-۱۶/۴	۱۶/۴	۲	۳۹	۳۵	۱	۳۲	۳۱
S-G-C-۰.۱۲	۱۲	۰	۳۸	۳۵	۳	۳۱	۳۱
S-G-C-۸/۴	۸/۴	۳	۳۶	۳۴	۳	۳۱	۳۱
S-G-SQ-۱۶/۴	۱۶/۴	۰	۴۰	۳۵	۳	۳۲	۳۱
S-G-SQ-۰.۱۲	۱۲	۲	۳۹	۳۵	۲	۳۱	۳۱
S-G-SQ-۸/۴	۸/۴	۲	۳۸	۳۴	۴	۳۱	۳۱
S-G-TR-۱۶/۴	۱۶/۴	۴	۳۷	۳۵	۴	۳۱	۳۱
S-G-C-W-۲۵%	۲۵	۰	۴۱	۳۶	۴	۳۴	۳۱
S-G-C-W-۱۶/۴	۱۶/۴	۵	۳۷	۳۵	۲	۳۱	۳۱
S-G-C-W-۰.۱۲	۱۲	۶	۳۶	۳۵	۱	۳۱	۳۱
S-G-C-W-۸/۴	۸/۴	۵	۳۵	۳۴	۳	۳۱	۳۱
S-G-SQ-W-۱۶/۴	۱۶/۴	۷	۳۸	۳۵	۲	۳۳	۳۱
S-G-SQ-W-۰.۱۲	۱۲	۵	۳۶	۳۵	۴	۳۱	۳۱
S-G-TR-W-۱۶/۴	۱۶/۴	۶	۳۷	۳۵	۴	۳۰	۳۱
S-G-MIX-۰.۲۵	۲۵	۵	۳۴	۳۶	۵	۳۰	۳۱
S-G-MIX-۱۶/۴	۱۶/۴	۲	۳۴	۳۵	۳	۳۰	۳۱
S-G-MIX-۰.۱۲	۱۲	۳	۳۴	۳۵	۵	۳۰	۳۱
S-G-MIX-۸/۴	۸/۴	۲	۳۴	۳۴	۳	۳۰	۳۱
G	۱۰۰	۱۶	۴۵	-	۱۲	۳۵	-

معادل دارای کمترین مقدار افزایش زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد. هم‌چنین نتایج بیانگر آن است که اختلاف بین زاویه اصطکاک داخلی خاک بهسازی شده ستون‌های سنگی مجزا در آرایش‌های مختلف و ترانشه معادل متناسب با هر نوع آرایش قابل توجه نمی‌باشد و این اختلاف بین ۱ تا ۲ درجه می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که می‌توان از آرایش ترانشه معادل در حالت دوبعدی با تقریب مناسب به جای آرایش ستون سنگی مجزا استفاده نمود. نتایج نشان می‌دهد در آرایش سطح معادل هیچ‌گونه افزایش در پارامترها مقاومت برشی

و پارامتر مقاومت برشی میانگین محاسبه شده با رابطه تحلیلی ۲ ارائه شده است. نتایج حاصل بیانگر افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک مسلح شده در کلیه آرایش‌های ستون سنگی مجزا و ترانشه معادل می‌باشد، ولی در آرایش سطح معادل افزایش در پارامترهای مقاومت برشی نسبت به بستر سست ماسه‌ای دیده نمی‌شود. نتایج ارائه شده در جدول ۸ بیانگر آن است که در یک نسبت ناحیه اصلاح شده یکسان بیشترین مقدار افزایش زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب مربوط به آرایش مربع و آرایش مثلث و منفرد و پس از آن آرایش ترانشه

$$\tau_{(ISC,ETM)} = \alpha \tau_{EAM} \quad (3)$$

در رابطه بالا :  $\tau_{(ISC,ETM)}$  = مقاومت برشی در آرایش ستون سنگی مجزا (ISC) یا ترانشه معادل (ETM)،  $\tau_{EAM}$  = مقاومت برشی در آرایش سطح معادل می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد مقدار ضریب  $\alpha$  برای برشی حداکثر در محدوده ۱/۰۵ الی ۱/۲۶ و برای مقاومت برشی معادل با جابجایی افقی ۱۰ درصد در محدوده ۱/۱۰ الی ۱/۱۳ متغیر می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل در جدول ۹ مقدار متوسط ضریب  $\alpha$  بدون توجه به نوع آرایش منفرد و مربع و مثلثی در حالت مقاومت برشی حداکثر برابر با ۱/۱۷ و در حالت مقاومت برشی معادل با جابجایی افقی ۱۰ درصد برابر ۱/۱۲ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت ناحیه اصلاح شده ضریب  $\alpha$  افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که در یک نسبت ناحیه اصلاح شده یکسان مقدار ضریب  $\alpha$  در آرایش مربع بیشترین و در آرایش منفرد کمترین مقدار می‌باشد.

#### ۵- جمع بندی

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌ها و مقایسه داده‌های آزمایشگاهی نتایج حاصل از این مطالعه به شرح ذیل می‌باشد:  
با افزایش نسبت ناحیه اصلاح شده افزایش مقاومت برشی در تمام آرایش‌ها مشاهده شد. مقاومت برشی حاصل از آزمایش‌ها در حالت آرایش‌های ستون سنگی مثلثی و مربع به ازای نسبت‌های ناحیه اصلاح شده برابر نسبت به ستون سنگی منفرد بیشتر می‌باشد. در میان آرایش‌های مورد بررسی به ازای یک نسبت ناحیه اصلاح شده یکسان، مقاومت برشی در آرایش مربعی بیشترین مقدار و در آرایش منفرد کمترین مقدار حاصل شد. افزایش شیب نمودارهای مقاومت برشی در برابر جابجایی افقی نشان می‌دهد که ترکیب خاک-ستون سنگی دارای سختی بیشتری نسبت به خاک بستر سست ماسه‌ای بوده و این سختی با توجه به نسبت ناحیه اصلاح شده و هم‌چنین آرایش قرارگیری تغییر می‌کند که بیشترین سختی مربوط به آرایش مربع و کمترین مربوط به آرایش منفرد می‌باشد.

نتایج بیانگر افزایش مقاومت برشی در تمامی آرایش‌های ترانشه معادل نسبت به بستر ماسه‌ای است. مقاومت برشی در حالت آرایش ترانشه معادل متناظر با آرایش مربع بیشترین مقدار افزایش را داشته

دیده نمی‌شود و در نتیجه پارامترهای مقاومت برشی حاصل از روش سطح معادل کمتر از آرایش‌های دیگر می‌باشد و استفاده از پارامترهای مقاومت برشی در آرایش سطح معادل در انجام محاسبات محافظه‌کارانه می‌باشد. مقدار افزایش زاویه اصطکاک داخلی روند افزایشی با نسبت ناحیه اصلاح شده در هر دو حالت حداکثر و حالت متناظر با جابجایی افقی ۱۰ درصد دارد و این روند افزایشی در نسبت ناحیه اصلاح شده زیر ۱۵ درصد کم و در نسبت‌های بالای ۱۵ درصد نمود پیدا می‌کند.

مقایسه نتایج پارامترهای مقاومت برشی حاصل از نتایج آزمایش‌ها و پارامتر مقاومت برشی میانگین محاسبه شده با رابطه تحلیلی ۲ بیانگر آن است که در کلیه آرایش‌ها به غیر از آرایش سطح معادل مقادیر پارامترهای مقاومت برشی حاصل از آزمایش‌های انجام شده بیشتر از مقادیر حاصل از روابط تحلیلی (رابطه ۲) می‌باشد. به عبارتی دیگر استفاده از پارامترهای مقاومت برشی محاسبه شده توسط رابطه تحلیلی در تحلیل‌های مهندسی محافظه‌کارانه بوده و ممکن است موجب غیر اقتصادی شدن طرح مهندسی نیز شود.

#### ۴-۵- ضریب افزایش مقاومت برشی نسبت به آرایش سطح معادل

به دلیل پیچیدگی‌های موجود در مدل‌سازی ستون‌های سنگی در حالت سه‌بعدی مخصوصاً در زمانی که تعداد ستون‌های سنگی قابل توجه باشد، استفاده از حالت سطح معادل به عنوان یک روش مرسوم برای جایگزینی ستون‌های سنگی حداقل در برآوردهای اولیه طرح‌های مهندسی می‌باشد. نتایج ارائه شده در این مطالعه نشان داد که حالت سطح معادل دارای مقاومت برشی و پارامترهای مقاومت برشی کمتری نسبت به حالت ستون سنگی مجزا و ترانشه معادل می‌باشد. برای اصلاح این نقص ضریب اصلاحی مقاومت برشی ( $\alpha$ ) در ادامه ارائه شده است.

ضریب اصلاحی مقاومت برشی ( $\alpha$ ) نسبت مقاومت برشی آرایش ستون سنگی مجزا در آرایش‌های منفرد و مربع و آرایش ترانشه معادل به مقاومت برشی آرایش سطح معادل می‌باشد. ضریب اصلاحی مقاومت برشی ( $\alpha$ ) برای آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه بر اساس رابطه ۳، محاسبه و نتایج آن در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت ناحیه اصلاح شده ضریب  $\alpha$  افزایش می‌یابد.

جدول ۹. ضریب افزایش مقاومت برشی ( $\alpha$ )  
Table 9. Shear strength increase coefficient

آرایش قرارگیری	نسبت ناحیه اصلاح شده (درصد)	ضریب $\alpha$	
		حالت حداکثر	حالت متناظر با جابجایی ۱۰ درصد
S-G-C-۲۵٪	۲۵	۱/۲۶	۱/۱۳
S-G-C-۱۶٪	۱۶/۴	۱/۱۷	۱/۱۲
S-G-C-۱۲٪	۱۲	۱/۱۲	۱/۱۱
S-G-C-۸٪	۸/۴	۱/۰۹	۱/۱۰
S-G-SQ-۱۶٪	۱۶/۴	۱/۲۱	۱/۱۳
S-G-SQ-۱۲٪	۱۲	۱/۱۷	۱/۱۳
S-G-SQ-۸٪	۸/۴	۱/۱۵	۱/۱۳
S-G-TR-۱۶٪	۱۶/۴	۱/۱۹	۱/۱۴
S-G-C-W-۲۵٪	۲۵	۱/۱۹	۱/۱۳
S-G-C-W-۱۶٪	۱۶/۴	۱/۱۶	۱/۱۲
S-G-C-W-۱۲٪	۱۲	۱/۱۳	۱/۱۲
S-G-C-W-۸٪	۸/۴	۱/۱۱	۱/۱۱
S-G-SQ-W-۱۶٪	۱۶/۴	۱/۱۹	۱/۱۱
S-G-SQ-W-۱۲٪	۱۲	۱/۱۳	۱/۱۱
S-G-TR-W-۱۶٪	۱۶/۴	۱/۱۹	۱/۱۲
S-G-MIX-۲۵٪	۲۵	۱	۱
S-G-MIX-۱۶٪	۱۶/۴	۱	۱
S-G-MIX-۱۲٪	۱۲	۱	۱
S-G-MIX-۸٪	۸/۴	۱	۱

نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده بیانگر آن است که مقاومت برشی در آرایش سطح معادل کمتر از آرایش‌های ستون سنگی مجزا و ترانسه معادل می‌باشد و بر این اساس ضریب اصلاحی مقاومت برشی ( $\alpha$ ) که نسبت مقاومت برشی در آرایش‌های مختلف به آرایش سطح معادل می‌باشد ارائه شده است.

نتایج نشان می‌دهد مقدار ضریب اصلاحی مقاومت برشی ( $\alpha$ ) در حالت مقاومت برشی حداکثر در محدوده ۱/۰۵ الی ۱/۲۶ و در حالت مقاومت برشی معادل با جابجایی افقی ۱۰ درصد در محدوده ۱/۱۰ الی ۱/۱۳ متغیر می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل مقدار متوسط ضریب  $\alpha$  بدون توجه به نوع آرایش منفرد و مربع و مثلثی در حالت مقاومت برشی حداکثر برابر با ۱/۱۷ و در حالت مقاومت برشی معادل با جابجایی افقی ۱۰ درصد برابر ۱/۱۲ می‌باشد.

و مقاومت برشی در حالت آرایش ترانسه معادل متناظر با آرایش منفرد کمترین افزایش مقاومت برشی را دارد. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های آرایش ترانسه معادل و ستون سنگی مجزا در آرایش‌های متناظر نشان می‌دهد که اختلاف بین مقادیر مقاومت برشی و پارامترهای مقاومت برشی قابل توجه نبوده و در نتیجه می‌توان آرایش ترانسه معادل را جایگزین آرایش ستون سنگی مجزا نمود.

افزایش مقاومت برشی و پارامترهای مقاومت برشی در آرایش سطح معادل نسبت به بستر ماسه‌ای قابل توجه نمی‌باشد. مقدار متوسط افزایش مقاومت برشی و پارامترهای مقاومت برشی در آرایش سطح معادل در مقاومت برشی حالت حداکثر برابر ۲٪ و در حالت مقاومت برشی متناظر با جابجایی ۱۰ درصد مقدار آن به صفر درصد کاهش یافته است.

- conventional and geogrid-encased stone columns, based on FEM study, *Geosynth. Int.* 20 (4) (2013), 285-276.
- [13] J. Nazari afshar, N. Mehrannia, F. Kalantary, N. Ganjian, Bearing Capacity of Group of Stone Columns with Granular Blankets. *International Journal of Civil Engineering* (2017), doi.org/10.1007/s-0271-017-40999y.
- [14] J. Nazari afshar, N. Mehrannia, F. Kalantary, Experimental Investigation on the Bearing Capacity of Stone Columns with Granular Blankets, *Geotech Geol Eng J*, 1(1)36 (222-209) (2017).
- [15] K. Deb, N.K. Samadhiya, J.B. Namdeo, Laboratory model studies on unreinforced and geogrid-reinforced sand bed over stone column-improved soft clay, *Geotextiles and Geomembranes*, 196-190 (2011)(2)29
- [16] M.Y. Fattah, M.A. Al-neami, A.S. Al-Suhaily, Estimation of bearing capacity of floating group of stone columns". *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 1172-1166 (2017)(3)20
- [17] M.Y. Fattah, M.Y., K.T. ShLASH, M.J.M. Al-Waily, Stress Concentration Ratio of Model Stone Columns in Soft Clays". *Geotechnical Testing Journal*, 11-1(2010)(1)34
- [18] M. Ghazavi, J. Nazari Afshar, Bearing capacity of geosynthetic encased stone columns, *Geotextiles and Geomembranes*, 36-26 (2013)38
- [19] M. Ghazavi, A.E. Yamchi, J. Nazari Afshar, Bearing capacity of horizontally layered geosynthetic reinforced stone columns". *Geotextiles and Geomembranes*, 2018(46), 318-312
- [20] S. Murugesan, K. Rajagopal, Shear load tests on granular columns with and without geosynthetic encasement, *Geotech. Test. J.*, 44-35 (2008)(1)32
- [21] S.R. Mohapatra, K.R., Jitendra Sharma, Direct shear tests on geosynthetic-encased granular columns, *Geotextiles and Geomembranes*, 405-396 (2016)(3)44.
- [22] S.W. Abusharar, J. Han, Two-dimensional deep-seated slope stability analysis of embankments over stone column-improved soft clay, *Engineering Geology*, 2011(120), 110-103
- [23] Z. Zhang, J. Han, G. Ye, G., Numerical investigation on factors for deep-seated slope stability of stone column-
- [1] B. Dheerendra, S. Nayak, R. Shivashankar, A Critical Review of Construction, Analysis and Behaviour of Stone Columns, *Geotech Geol Eng J*, 2013(31) 22-1.
- [2] J.K. Mitchell, Soil improvement-state of the art report, in: *Proceedings of the 10th international conference on soil mech. and found. Eng.*, Stockholm, (1981) 565-509.
- [3] R.D Barksdale, R.C. Bachus, Design and Construction of Stone Column, VOL1, FHWA/RD(1983)
- [4] S. Murugesan, K. Rajagopal, Studies on the behavior of single and group of geosynthetic encased granular columns, *Geotech. Geoenvironmental Eng.* (2010)(1)136 .139-129
- [5] S. Murugesan, K. Rajagopal, Model tests on geosynthetic encased granular columns, *Geosynth. Int.*, (6)14 .354-346(2007)
- [6] S. Murugesan, Studies on the Behavior of Single and Group of Geosynthetic Encased Stone Columns, *GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 136 .139-129 (2010)
- [7] A.J. Choobbasti, A. Zahmatkesh, R. Noorzad, Performance of Stone Columns in Soft Clay: Numerical Evaluation, *Geotech Geol Eng J*, 684-675 (2011)29
- [8] K. Deb, Modeling of granular bed-stone column-improved soft soil, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, (-1267 (2008) 1288.
- [9] J. Nazari Afshar, M. Ghazavi, A simple analytical method for calculation of bearing capacity of stone column, *International Journal of Civil Engineering*, (2014)(1)12 .15
- [10] A.J. Choobbasti, A. Zahmatkesh, Investigation of Bearing Capacity and Settlement of Strip Footing on Clay Reinforced with Stone Columns, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3668-3658 (2010)(8)4
- [11] K. Ali, J.T. Shahu, K.G. Sharma, Model tests on geosynthetic-reinforced stone columns: a comparative study. *Geosynth. Int.* 19 (4) (2012), 305-292.
- [12] M.B.D. Elsway, Behaviour of soft ground improved by

- modeling of stone-column reinforced ground. *J. Geotech. Geoenviron*, 2)134) (2008), .194-185
- [26] N.V. Nayak, Recent Advances in Ground Improvements by Stone Column, in *In: Proceedings of Indian Geotechnical Conference, Madras* (1983). India.
- supported embankments over soft clay, *Engineering Geology*, 2014)168), .113-104
- [24] J. Castro, Review Modeling Stone Columns, *Materials*, 7)10) (2017), doi:10.3390/ma10070782.
- [25] S.A. Tan, S. Tjahyono, Oo, Kk, G., Simplified plane-strain

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*J. Nazariafshar, M. Aslani, Laboratory study of shear strength of loose sand in the case of Individual stone columns, Equivalent trench, and Equivalent area method, Amirkabir J. Civil Eng., 52(4) (2020) 949-968.*

DOI: [10.22060/ceej.2019.15104.5830](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15104.5830)



