



## مطالعه آزمایشگاهی ستون‌های سنگی منفرد و گروهی محصور شده با ژئوتکستایل

سید حمید لاجوردی\*، سعید انعامی، حمیدرضا شمس، محمد حمیدی

دانشکده مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۳۰ فروردین ۱۳۹۶  
بازنگری: ۵ آذر ۱۳۹۶  
پذیرش: ۱۱ دی ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۲۳ دی ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

ستون سنگی منفرد و گروهی  
ژئوتکستایل  
مطالعه آزمایشگاهی  
بهسازی خاک

**چکیده:** ستون‌های سنگی یکی از روش‌های بهسازی خاک‌های نرم به منظور افزایش ظرفیت باربری هستند. لذا یافتن راه‌هایی برای افزایش کارایی آنها مورد توجه می‌باشد. با توجه به اینکه یکی از اصلی‌ترین علل کاهش باربری ستون‌های سنگی پدیده‌ی خمره‌ای شدن می‌باشد، می‌توان از پوشش مسلح‌کننده پیرامون این ستون‌ها استفاده نمود. در این مقاله ستون‌های سنگی منفرد و گروهی در دو حالت معمولی و با پوشش ژئوتکستایل پیرامون آن، مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته‌اند. ستون‌های سنگی منفرد با قطر ۶۳ و ۸۰ میلی‌متر با نسبت طول به قطر ۵، تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. نتایج حاکی از افزایش ظرفیت باربری ستون با قرار دادن پوشش ژئوتکستایل پیرامون آن است. در ادامه همچنین ستون‌های سنگی با قطر ۶۳ میلی‌متر بصورت گروهی در چیدمان‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفته و ظرفیت باربری آنها مقایسه گردیده است.

### ۱- مقدمه

ظرفیت باربری و نشست دو معیار اصلی در مطالعه و طراحی فونداسیون سازه‌ها در نظر گرفته می‌شوند. ساخت سازه‌ها بر روی خاک‌های نرم باعث بوجود آمدن نشست‌های مخرب و عدم پایداری سازه می‌شود. بنابراین توسعه روش‌های بهسازی خاک‌های نرم و نامناسب مورد توجه مهندسان بوده است. ستون‌های سنگی به عنوان روشی مؤثر و دوستدار محیط زیست برای بهسازی خاک‌های نرم رسی، لای، ماسه لای‌دار و دیگر موارد بکار گرفته می‌شوند. نقش اصلی ستون‌های سنگی کمک به کاهش فشار آب حفره‌ای اضافه و کاهش سطح بار منتقل شده به خاک نرم است. استفاده از ستون‌های سنگی از حدود سال ۱۹۶۰ میلادی در اروپا آغاز شد و امروزه نیز ادامه دارد. اصلی‌ترین عامل خرابی ستون‌های سنگی بوجود آمدن پدیده‌ی خمره‌ای شدن در بالای ستون در اثر بارگذاری و در نتیجه کاهش ظرفیت باربری آن می‌باشد. هیوج<sup>۱</sup> و ویتیر<sup>۲</sup> (۱۹۷۴) ساز و کار خمره‌ای شدن ستون‌های سنگی منفرد را شرح دادند [۱]. همچنین علل دیگر خرابی ستون‌سنگی بر اثر شکست برشی در ستون [۲] و در اثر کمانش و سوراخ شدگی بیان شد [۳]. برای کاهش خمره‌ای شدن ستون سنگی بر اثر بارگذاری از پوشش‌های

مسلح‌کننده پیرامون ستون مثل ژئوتکستایل استفاده می‌شود. موراگسان<sup>۳</sup> و راجاکوپال<sup>۴</sup> (۲۰۱۰) یک سری آزمایشات برای مقایسه ظرفیت برشی ستون سنگی معمولی با ستون‌های محصور شده با پوشش ژئوتکستایل انجام دادند [۴]. نتایج حاکی از افزایش ظرفیت باربری برشی ستون‌های سنگی با قرار دادن پوشش ژئوتکستایل پیرامون ستون سنگی است. مطالعات دیگری بر روی ستون‌های با پوشش ژئوتکستایل انجام گرفته است [۵-۱۰]. مطالعات آزمایشگاهی در مقیاس کوچک اکثراً با تمرکز بر روی تحلیل رفتار بار-نشست ستون‌های سنگی انجام گرفته است [۱۱ و ۱۲]. ساز و کارهای مختلف شکست ستون‌های سنگی نیز توسط بعضی محققین مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۳-۱۵]. دسته‌ای از مطالعات آزمایشگاهی بر روی ستون‌های سنگی از طریق بارگذاری سه محوری انجام گرفته است [۱۶-۱۸]. همچنین با استفاده از روش سانتریفیوژ برخی مطالعات بر روی ستون‌های سنگی انجام گرفته است [۱۹]. آزمایش بر روی ستون‌های سنگی در جعبه بزرگ می‌تواند بهترین شبیه‌سازی شرایط ستون‌های سنگی را در آزمایشگاه ایجاد کند [۲۰ و ۲۱].

در این مقاله مطالعات آزمایشگاهی بر روی ستون‌های سنگی در جعبه بزرگ انجام گرفته است. تأثیر افزایش قطر و قرار دادن پوشش ژئوتکستایل پیرامون ستون سنگی منفرد مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تعدادی

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sh-lajvardi@iau-arak.ac.ir

**جدول ۱: مشخصات آزمایشات ستون‌های سنگی منفرد و گروهی**

Table 1. Properties of experimental tests on single and group of stone columns

فاصله مراکز ستون‌ها	قطر صفحه بارگذاری (میلیمتر)	قطر ستون (میلیمتر)		نوع آزمایش
		۸۰	۶۳	
-	-	۱	۱	بستر رسی
-	۱۸۰	۱	۱	منفرد بدون پوشش
-	-	-	۱	منفرد با پوشش
-	-	-	۱	گروهی ۷ تایی
-	-	-	۱	گروهی ۳ تایی
۲/۵ برابر قطر	-	-	۱	گروهی ۱۲ تایی بدون پوشش
-	۲۷۰	-	۱	گروهی ۱۲ تایی با پوشش
-	-	-	۱	گروهی ۴ تایی آرایش مثلثی
۱/۷ برابر قطر	-	-	۱	گروهی ۴ تایی آرایش مربعی

بارگذاری روی نمونه‌ها تا رسیدن به میزان ۵۰ میلیمتر نشست انجام گرفته است. کلیه آزمایش‌ها با سیستم کنترل جابجایی با نرخ ثابت سرعت به میزان ۲ میلیمتر بر دقیقه انجام گردید. مقیاس کلیه آزمایشات ۱:۱۰ ابعاد واقعی بوده و برای کلیه ستون‌ها نسبت طول به قطر ۵ در نظر گرفته شده است. برای اطمینان از نتایج، هر آزمایش دو بار تکرار گردیده است.

**۲-۳- مواد و مصالح**

**۲-۳-۱- خاک رس**

مشخصات رُس مورد استفاده در این تحقیق به وسیله آزمایش‌های مختلف از جمله آزمایش‌های تک محوری و حدود اتربرگ بدست آمده‌اند که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است. برای انتخاب درصد رطوبت مورد نیاز رُس نرم برای رسیدن به مقاومت برشی زهکشی نشده ۱۳ کیلوپاسکال، آزمایش‌های فشاری محدودنشده روی درصد رطوبت‌های مختلف انجام گرفت. نمونه‌های استوانه‌ای دارای قطر ۳۸ میلیمتر و ارتفاع ۹۰ میلیمتر بودند. نتایج حاصل بیانگر آن بود که برای رسیدن به مقاومت برشی زهکشی نشده ۱۳ کیلو پاسکال درصد رطوبت ۲۱ مورد نیاز است (شکل ۲).

آزمایش برروی ستون‌های سنگی گروهی با تعداد و آرایش مختلف برای بررسی تأثیر پوشش ژئوتکستایل در گروه ستون، اثر ستون‌های کناری بر ظرفیت باربری ستون‌های منفرد و گروهی و تأثیر چیدمان ستون‌های سنگی در بارگذاری گروهی روی ظرفیت باربری آنها، مورد تحلیل قرار گرفته است که می‌تواند نوآوری در این تحقیق را نشان دهد.

**۲- مطالعات آزمایشگاهی**

**۲-۱- دستگاه آزمایش**

برای انجام آزمایش‌ها بر روی ستون‌های سنگی منفرد و گروهی، دستگاه شبیه‌ساز پی ساخته شد. دستگاه شامل یک جعبه‌ی بزرگ فلزی به ابعاد ۳۰۰×۱۸۰×۹۰ سانتیمتر مکعب است که برروی ریلی به ابعاد ۳۰۰×۱۸۰ سانتیمتر حرکت می‌کند (شکل ۱). ابعاد جعبه به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که شرایط مرزی برروی نتایج آزمایش‌ها تأثیرگذار نباشد. بار روی نمونه‌ها توسط یک سیستم جک هیدرولیکی با ظرفیت ۳ تن در مرکز جعبه اعمال می‌شود. در دستگاه دو نوع ابزار سنجش استفاده شده است که هر دو قبل از آزمایش‌ها کالیبره شده‌اند. یکی برای اندازه‌گیری جابجایی با دقت ۱ میلیمتر و دیگری برای اندازه‌گیری میزان بار وارده به خاک که از یک نیروسنج<sup>۱</sup> با دقت ۱ نیوتن بین جک و صفحه بارگذاری استفاده شده است.

**۲-۲- مدل آزمایشگاهی**

در این تحقیق ۱۰ آزمایش برروی ستون‌های سنگی منفرد و گروهی انجام شده است (جدول ۱).



شکل ۱: دستگاه شبیه ساز پی

Fig. 1. Foundation simulator machine

1 sensor  
2 loadcell

برابر توان دوم مقیاس آزمایش‌ها می‌باشد که در اینجا برابر ۱:۱۰۰ در نظر گرفته شده است. مشخصات مقاومت کششی ژئوتکستایل بر اساس آزمایش کشش استاندارد مطابق با ASTM D 4595-05 بدست آمده است.

جدول ۳: مشخصات شن

Table 3. Properties of gravel

مقدار	واحد	نماد	مشخصات
۴۰	%	$\phi$	زاویه اصطکاک داخلی
۲/۷	-	Gs	چگالی دانه‌ها
۱۵/۵	kN/m <sup>3</sup>	$\gamma$	وزن مخصوص
۱۴/۱	kN/m <sup>3</sup>	$\gamma_{dmin}$	وزن مخصوص خشک حداقل
۱۶	kN/m <sup>3</sup>	$\gamma_{dmax}$	وزن مخصوص خشک حداکثر
۰/۹۴	-	C <sub>c</sub>	ضریب خمیدگی
۱/۵۷	-	C <sub>u</sub>	ضریب یکنواختی
		GP	طبقه بندی یونیفاید

جدول ۴: مشخصات ژئوتکستایل

Table 4. Properties of geotextile

۹	kN/m	مقاومت کششی نهایی
۵۵	%	کرنش در مقاومت نهایی
۱۶/۵	kN/m	سختی سکانت در کرنش نهایی
۳	mm	ضخامت
۱۴۰	g/m <sup>2</sup>	جرم

۲-۴- آماده سازی مصالح

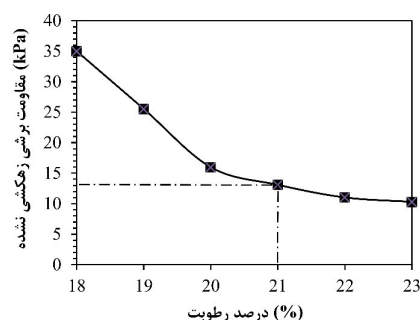
۲-۴-۱- بستر رسی

ابتدا میزان رطوبت مورد نیاز لایه‌ای به ضخامت ۲ سانتیمتر بر اساس مقامت برشی زهکشی نشده برابر ۱۳ کیلو پاسکال در جعبه‌هایی به ابعاد ۱۵×۱۵×۰/۵ مترمکعب محاسبه گردید. سپس همزمان با ایجاد لایه‌های خاک ۲ سانتیمتری در این جعبه‌ها رطوبت بصورت کاملاً یکنواخت در جعبه

جدول ۲: مشخصات خاک رس

Table 2. Properties of clay

مقدار	واحد	نماد	مشخصات
۳۵	%	LL	حد روانی
۲۰	%	PL	حد خمیری
۱۵	%	PI	نشانه خمیری
۲/۷	-	Gs	چگالی دانه‌ها
۶	%	w <sub>0</sub>	رطوبت اولیه
۱۹	kN/m <sup>3</sup>	$\gamma$	وزن مخصوص در رطوبت ۲۱%
۱۳	kN/m <sup>2</sup>	Cu	مقاومت برشی زهکشی نشده
CL			طبقه بندی USCS



شکل ۲: مقاومت برشی زهکشی نشده رس در درصد رطوبت‌های مختلف

Fig. 2. Variation of unconfined compressive strength for clay with water content

۲-۳-۲- سنگدانه

برای مصالح شنی به منظور پر کردن ستونها در جعبه آزمایش، از شنی با حداکثر بعد ۶/۱ قطرستون استفاده شده است (حداقل و حداکثر بعد دانه‌ها به ترتیب ۲ و ۱۱ میلی‌متر می‌باشد). سپس بر روی نمونه شن، آزمایشات مختلف دانه‌بندی و برش مستقیم جهت تعیین ویژگی‌های آن انجام شد که نتایج آن در جدول ۳ ارائه گردیده است.

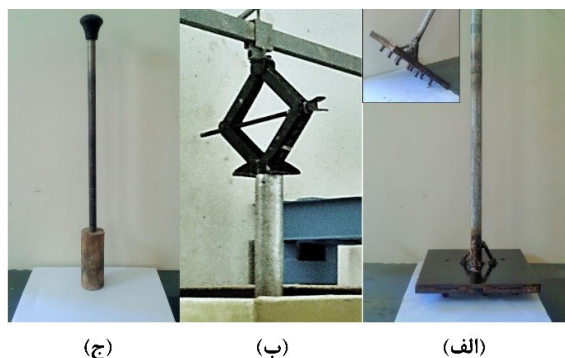
۲-۳-۳- ژئوتکستایل

در تعدادی از آزمایش‌ها از ژئوتکستایل به عنوان پوشش پیرامون ستونها استفاده شده است که در جدول ۴ مشخصات آن آمده است. با توجه به قانون مقیاس [۲۲]، مقیاس سختی ژئوتکستایل در آزمایشگاه نسبت به واقعیت،

ذکر شده اضافه شده است. خاک در جعبه‌های آماده‌سازی توسط پوشش چند لایه نایلونی که امکان تبادل رطوبت با محیط را نمی‌دهد حفاظت گردید و مدت ۷ روز به نمونه جهت یکنواختی رطوبت در لایه‌های مختلف فرصت داده شد.

پس از اطمینان از میزان صحیح رطوبت خاک تهیه شده به وسیله انجام آزمایش تعیین درصد رطوبت در قسمت‌ها و اعماق مختلف، با توجه به وزن مخصوص خاک ( $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ )، خاک وزن شده طی چند مرحله و در چند لایه وارد جعبه اصلی شد. کوبش هر لایه تا رسیدن به وزن مخصوص تعیین شده انجام شد و این عمل تا پر شدن کامل جعبه ادامه یافت.

کوبش لایه‌ها توسط کوبنده‌ای با وزن ۱۰ کیلوگرم و به ابعاد  $30 \times 30$  سانتیمترمربع که در زیر آن ۹ عدد میلگرد بطول ۲ سانتیمتر جهت کوبش بهتر و دوختن لایه‌های مختلف جوش شده بود انجام گرفت (شکل ۳-الف). از نایلونهای چند لایه برای پوشش جعبه آزمایش و جلوگیری از تبادل رطوبت نیز استفاده گردید. پس از پر کردن جعبه به نمونه ۲ روز برای حصول یکنواختی خاک زمان داده شد و سپس آزمایش‌ها روی آنها صورت گرفت.



شکل ۳: الف) کوبنده بستر رُسی ب) لوله فلزی ج) کوبنده ستون‌ها

Fig. 3. a) Tamper for clay b) Metal cylinder c) Tamper for stone columns

## ۲-۴-۲- ستون در رُسی

پس از پر نمودن جعبه با خاک رُسی، جهت ایجاد ستونهای سنگی در مرکز جعبه از لوله‌هایی با قطر برابر قطر ستون و یک قاب فلزی که روی جعبه اصلی قرار می‌گیرد و یک جک دستی که از یک طرف به قاب فلزی تکیه کرده و از طرف دیگر لوله را به آرامی درون خاک فشار میدهد، استفاده گردید. شکل ۳-ب قاب فلزی و جک دستی استفاده شده را نمایش میدهد. لوله فلزی قبل از استفاده کاملاً آغشته به روغن شد تا با توجه به سرعت آرام فرورفتن قالب هیچ اغتشاش مهمی در خاک صورت نپذیرد. وضعیت شاقولی بودن قالب در هنگام فرورفتن آن نیز کنترل گردید تا ستون ایجاد

شده شاقول باشد.

پس از جایگذاری هر کدام از لوله‌ها، خاک درون آنها توسط اوگر<sup>۱</sup> خارج گردید و پس از بیرون کشیدن لوله‌ها به وسیله سنگدانه‌ها با وزن مخصوص ۱۵/۵ کیلونیوتن بر مترمکعب پرگردید. جهت رسیدن به این وزن مخصوص از کوبنده با وزن ۲ کیلوگرم که از ارتفاع ۱۰ سانتی متر رها شد، استفاده گردید (شکل ۳-ج).

با توجه به اینکه ستونهای سنگی به دلیل پدیده خمره‌ای شدن گسیخته میشوند جهت تقویت دیواره‌های جانبی از ژئوتکستایل استفاده شد. لایه‌های ژئوتکستایل به صورت استوانه درآمده و پس از قرارگیری در جداره ستونها، داخل آن با شن پر می‌شوند. برای اینکه بتوان مقایسه صحیحی بین ستونهای گروهی پوشش دار (با ژئوتکستایل) با ستونهای بدون پوشش انجام داد وزن مخصوص مصالح ستونها در هر دو حالت یکسان در نظر گرفته شود.

## ۲-۳- نتایج آزمایشگاهی

### ۳-۱- ستون سنگی منفرد

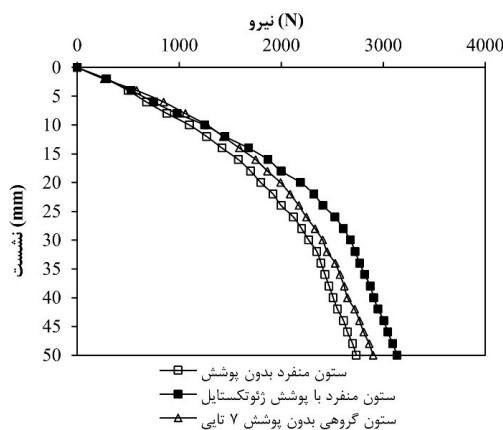
در مطالعات آزمایشگاهی ابتدا برای بررسی میزان تأثیر ستون سنگی در ظرفیت باربری خاک‌های نرم رُسی تعدادی آزمایش بر روی ستون سنگی منفرد انجام گردید.

در این قسمت ستون سنگی منفرد بدون پوشش ژئوتکستایل با قطرهای ۶۳ و ۸۰ میلیمتر درون خاک رُسی تحت بارگذاری قرار گرفتند. با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود با استفاده از ستون سنگی ظرفیت باربری خاک افزایش یافته است. این مقدار افزایش برابر ۱۰/۹ درصد می‌باشد. از طرفی مقایسه ستون ۶۳ با ۸۰ میلیمتر افزایش ظرفیت باربری با افزایش قطر ستون سنگی را به مقدار ۱۴/۷ درصد نشان می‌دهد.

در ادامه ستون سنگی منفرد ۶۳ میلیمتر با پوشش ژئوتکستایل پیرامون آن تحت بارگذاری واقع شد و با توجه به شکل ۴، ظرفیت باربری آن ۱۴/۶ درصد افزایش یافته است. این افزایش درصد ظرفیت باربری با مقاله آقایان قضاوی و نظری‌افشار (۲۰۱۳) مقایسه شد و نشان داد که همخوانی خوبی دارد. آنها از ستون سنگی منفرد با قطر ۶۰ میلیمتر با و بدون پوشش ژئوتکستایل استفاده کردند و نتیجه گرفتند که استفاده از پوشش ژئوتکستایل پیرامون ستون باعث افزایش ۱۵٪ در ظرفیت باربری ستون سنگی شده است. علت این امر را می‌توان کاهش پدیده‌ی خمره‌ای شدن ستون سنگی در اثر استفاده از پوشش مسلح کننده بیان نمود. نکته قابل توجه در این قسمت این است که ظرفیت باربری ستون سنگی منفرد ۶۳ میلیمتر با پوشش ژئوتکستایل با ستون سنگی بدون پوشش ۸۰ میلیمتر اختلاف خیلی ناچیز دارد. از این نکته می‌توان در پروژه‌ها بهره جست و با توجه به مصالحی که در محل وجود دارد بهترین روش را برای افزایش ظرفیت باربری اتخاذ نمود.

1 auger

شکل ۶ رفتار بار-نشست گروه ۷ تایی ستون را با ستون سنگی منفرد بدون پوشش و با پوشش ژئوتکستایل را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل آرایش ۷ تایی ستون‌ها افزایش ۶/۳ درصدی را در ظرفیت باربری نشان می‌دهد که گویای تأثیر ستون‌های پیرامونی در ظرفیت باربری ستون منفرد می‌باشد. از طرفی با مقایسه ظرفیت باربری ستون سنگی منفرد با پوشش ژئوتکستایل با گروه ۷ تایی ستون، مشاهده میشود قرار دادن پوشش مسلح کننده پیرامون ستون سنگی منفرد اثر بیشتری (۱۴/۶٪) در افزایش ظرفیت باربری آن نسبت به قرار گرفتن ستون‌های پیرامونی دارد.



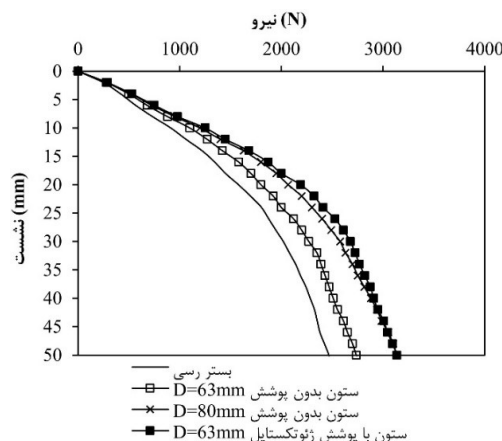
شکل ۶: رفتار بار-نشست ستون سنگی گروهی (۷ تایی)

Fig. 6. Load-settlement behavior of groups of 7 stone columns

۳-۲-۲- اثر پوشش ژئوتکستایل در ستون‌های گروهی  
برای بررسی تأثیر پوشش ژئوتکستایل در ستون‌های گروهی، آزمایش‌هایی بر روی ستون‌های گروهی ۱۲ تایی در دو حالت بدون پوشش و با پوشش ژئوتکستایل انجام شد (شکل ۷-الف و ج). شکل ۸ منحنی بار-نشست برای حالت‌های گفته شده را نشان می‌دهد. قرار دادن پوشش ژئوتکستایل پیرامون ستون‌های سنگی در آرایش ۱۲ تایی، باعث افزایش ظرفیت باربری به میزان ۲۹/۷ درصد شده است.

۳-۲-۳- اثر ستون‌های سنگی پیرامونی بر ۳ ستون میانی در حالت گروهی

به منظور مطالعه‌ی تأثیر ستون‌های سنگی پیرامون بر ظرفیت باربری گروهی ستون‌ها، آزمایشی بر روی گروه ۳ تایی از ستون‌ها انجام شده و با نتایج گروهی ۱۲ تایی مقایسه گردیده است (شکل ۷-الف و ب).



شکل ۴: رفتار بار - نشست ستون سنگی منفرد

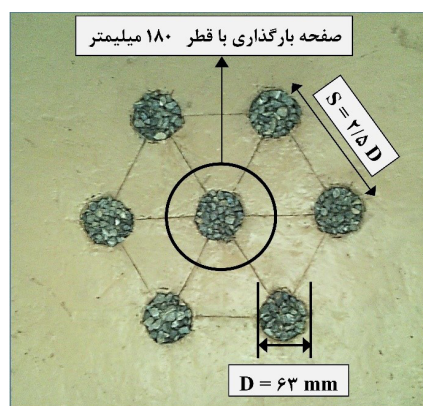
Fig. 4. Load-settlement behavior of single column

### ۳-۲- ستون‌های سنگی گروهی

ستون‌های سنگی در پروژه‌های عمرانی بصورت گروهی مورد استفاده قرار می‌گیرند، لذا در این پژوهش آزمایش‌های متفاوتی در خصوص بررسی توان باربری گروهی ستون‌ها صورت گرفت. این آزمایش‌ها شامل ستون‌های سنگی بدون پوشش و با پوشش ژئوتکستایل و آرایش مثلثی و مربعی می‌باشند. در انجام کلیه آزمایش‌ها قطر ستون‌ها ۶۳ میلی‌متر و صفحه بارگذاری با دو قطر ۱۸ و ۲۷ سانتیمتر می‌باشد.

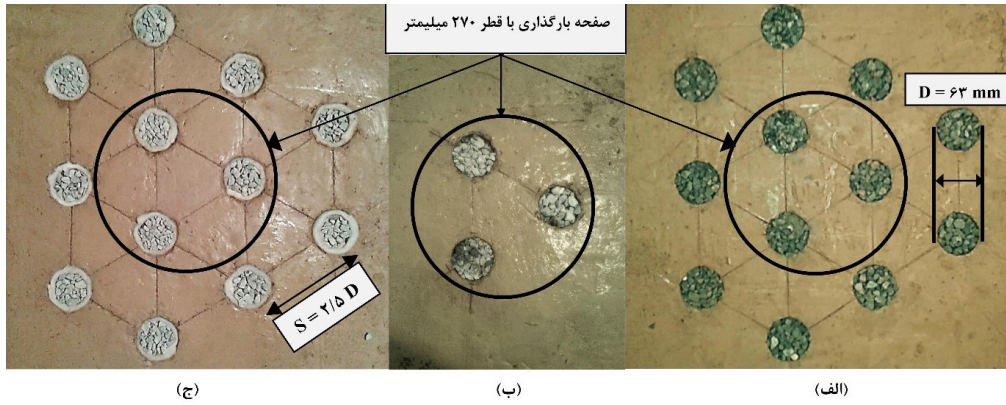
### ۳-۲-۱- اثر ستون‌های سنگی پیرامونی بر ستون منفرد

برای بررسی تأثیر ستون‌های پیرامونی بر ظرفیت باربری ستون سنگی منفرد، یک آرایش گروهی با ۷ عدد ستون سنگی درون خاک ایجاد گردید. بارگذاری بر روی ستون منفرد در مرکز ستون‌ها تا رسیدن به نشست ۵ سانتیمتر انجام گرفت. شکل ۵ آرایش گروهی ۷ عدد ستون را نشان می‌دهد.



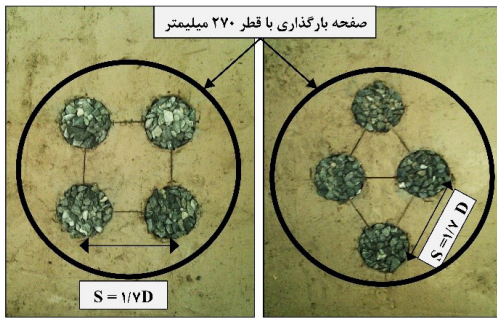
شکل ۵: آرایش گروهی با ۷ عدد ستون

Fig. 5. Arrangement of groups of 7 stone columns



شکل ۷: آرایش ستون‌های گروهی (الف) ۱۲ ستون بدون پوشش (ب) ۳ ستون بدون پوشش (ج) ۱۲ ستون با پوشش ژئوتکستایل

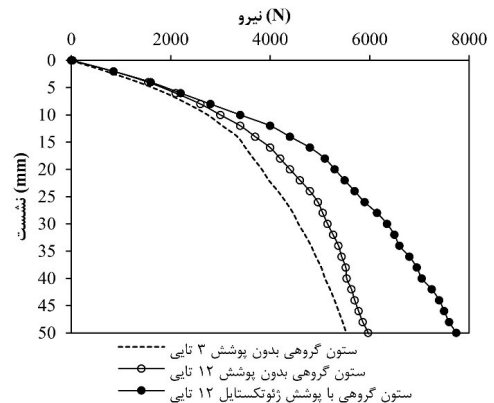
Fig. 7. Arrangement of groups of stone columns : a) 12 stone columns without encasement b) 3 stone columns without encasement c) 12 stone columns with geotextile encasement



شکل ۹: آرایش مثلثی و مربعی گروه با ۴ عدد ستون

Fig. 9. Square and triangular arrangement of groups of 4 stone columns

با مقایسه نتایج آزمایش ستون‌های ۳ تایی با ۱۲ تایی در شکل ۸، مشاهده می‌شود ستون‌های اطراف گروه ستون ۳ تایی باعث افزایش درصدی ظرفیت باربری ستون‌ها شده‌اند.



شکل ۸: رفتار بار-نشست ستون سنگی گروهی ۳ و ۱۲ تایی

Fig. 8. Load-settlement behavior of groups of stone columns (3 and 12 stone columns)

رفتار بار-نشست آزمایش بر روی ستون‌های گروهی چهارتایی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به این شکل چیدمان مربعی افزایش ظرفیت باربری در حدود ۵٪ نسبت به حالت مثلثی دارد که ناچیز می‌باشد. اگر صفحه بارگذاری را به چهار قسمت مساوی تقسیم کنیم، مشاهده می‌شود که در چیدمان مربعی ستون سنگی در وسط هر ربع دایره قرار می‌گیرد و باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش در این چیدمان شده است ولی در چیدمان مثلثی این توزیع یکنواخت وجود ندارد.

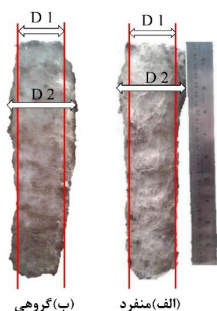
در قسمت‌های قبل در تمامی آزمایشات بر روی ستون‌های سنگی گروهی، از آرایش مثلثی با فواصل مرکز تا مرکز  $2/5$  برابر قطر استفاده شده است. در این بخش برای بررسی اثر آرایش در ظرفیت باربری گروه ستون‌ها، دو آرایش مثلثی و مربعی با فواصل  $1/2$  برابر قطر مورد آزمایش قرار گرفته است (شکل ۹). برای هر دو حالت، تعداد ستون‌ها و سطح بارگذاری ثابت فرض شده است.

۳-۳-۳ ضریب بازده ستون‌های سنگی گروهی  
 بطور کلی بازده ستون‌های سنگی گروهی را می‌توان از رابطه ۱ بدست آورد.

$$\eta = Q_g / (\sum Q_{ii}) = n \times \text{ظرفیت باربری نهایی گروه ستون} / \text{بارنهایی هر ستون} \quad (1)$$

### ۳-۴- تغییر شکل ستون‌های سنگی منفرد و گروهی

پس از اتمام آزمایش، تغییر شکل ستون‌های سنگی در حالت منفرد و گروهی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۱-الف تغییر شکل ستون سنگی منفرد را پس از بارگذاری نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود این تغییر شکل بصورت خم‌های نمایان شده است. خرابی ستون‌های سنگی در خاک‌های همگن معمولاً بصورت انبساط جانبی (خم‌های) در بالای ستون رخ می‌دهد چراکه در نزدیکی سطح زمین فشار جانبی مقاوم خاک کم می‌باشد. در اثر این انبساط جانبی سنگدانه‌های ستون در خاک فرو رفته و نیرو را به طور برشی به خاک منتقل می‌کنند. شکل ۱۱-ب تغییر شکل ستون سنگی را پس از بارگذاری در حالت گروهی نشان داده است. با مقایسه این دو شکل مشخص است که در حالت گروهی تغییر شکل ستون علاوه بر خم‌های شدن شامل کمانش جانبی می‌باشد که علت وقوع کمانش جانبی را می‌توان خارج از مرکزیت ستون‌ها نسبت به مرکز صفحه بارگذاری بیان نمود.



شکل ۱۱: تغییر شکل ستون سنگی

Fig. 11. Deformation of stone column

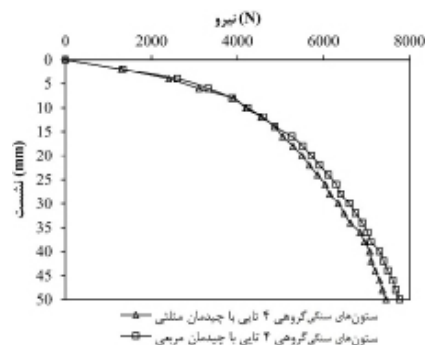
### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تعدادی آزمایش بر روی ستون‌های سنگی منفرد و گروهی به منظور بررسی بعضی پارامترهای مؤثر بر ظرفیت باربری انجام شد. ستون‌های منفرد با قطرهای مختلف و همچنین با پوشش ژئوتکستایل تحت بارگذاری قرار گرفتند. همچنین ستون‌های گروهی با تعداد و آرایش مختلف در جعبه بزرگ مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به آزمایش‌های مختلف انجام شده، نتایج زیر قابل بیان می‌باشند:

- با افزایش قطر و همچنین قرار دادن پوشش ژئوتکستایل پیرامون ستون سنگی منفرد، ظرفیت باربری آن افزایش می‌یابد که مقدار آن برای ستون با قطر ۶۳ میلیمتر برابر ۱۴/۶٪ می‌باشد.

- در بارگذاری روی ستون‌های سنگی منفرد، قرار گرفتن ستون‌های مجاور باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود (۶/۳٪) اما تأثیر آن کمتر از اثر پوشش ژئوتکستایل پیرامون ستون سنگی است.

- در بارگذاری روی ستون‌های سنگی گروهی، وجود ستون‌های سنگی مجاور باعث افزایش ظرفیت باربری شده (۸٪) و این مقدار نسبت به حالت بارگذاری روی ستون منفرد بیشتر است.



شکل ۱۰: رفتار بار-نشست ستون سنگی گروهی ۴ تایی

Fig. 10. Load-settlement behavior of groups of 4 stone columns

### جدول ۵: بازده ستون‌های سنگی گروهی

Table 5. Efficiency of group of stone columns

بازده (%)	نوع آزمایش‌ها
۰/۶۷	ستون‌های سنگی گروهی ۳ تایی با چیدمان مثلثی
۰/۷۳	ستون‌های سنگی گروهی ۱۲ تایی* با چیدمان مثلثی
۰/۸۲	ستون‌های سنگی گروهی ۱۲ تایی* با چیدمان مثلثی با پوشش ژئوتکستایل
۰/۶۸	ستون‌های سنگی گروهی ۴ تایی با چیدمان مثلثی
۰/۷۲	ستون‌های سنگی گروهی ۴ تایی با چیدمان مربعی

\*توضیح: بارگذاری روی سه ستون مرکزی انجام شده است.

در آزمایشات ذکر شده در بخش‌های قبل را نشان می‌دهد. جدول ۵ بازده ستون‌های سنگی گروهی در آزمایشات ذکر شده در ستون‌های سنگی گروهی بدون پوشش با ستون‌های سنگی گروهی با پوشش ژئوتکستایل مقایسه گردیده‌اند. مشاهده می‌شود در آرایش مثلثی در ستون‌های گروهی ۱۲ تایی، پوشش ژئوتکستایل باعث افزایش بازده گروه ستون به میزان ۱۲ درصد شده است.

$$\eta = Q_g / (\sum Q_u) = (4 \times (Q - 3 Q / 16)) / (4 \times Q) = 0.81 \quad (2)$$

طبق قاعده فلد<sup>۱</sup> به ازای وجود هر ستون مجاور، به میزان ۱/۱۶ ظرفیت باربری از ستون کم می‌شود. لذا با استفاده از رابطه فلد بازده ستون‌های سنگی گروهی ۴ تایی با چیدمان مربعی به روش زیر بدست می‌آید:

مشاهده می‌شود عدد بدست آمده از رابطه فلد به میزان ۱۲ درصد بیشتر از نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.

1 Feld rule

- [11] MY. Fattah, KT. Shlash, MJM. Al-Waily, Stress concentration ratio of model stone columns in soft clays. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 34(1) (2011) 1-11.
- [12] H. Yung-Shan, W. Cho-Sen, Y. Yi-Sheng, Model tests on geotextile-encased granular columns under 1-g and undrained conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(1) (2016) 13-27.
- [13] K. Ali, J.T. Shahu, K.G. Sharma, Model tests on geosynthetic-reinforced stone columns: a comparative study. *Geosynthetic International*, 19(4) (2012) 292-305.
- [14] K. Ali, J.T. Shahu, K.G. Sharma, Model tests on single and groups of stone columns with different geosynthetic reinforcement arrangement. *Geosynthetic International*, 21(2) (2014) 103-118.
- [15] 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.
- [16] V. Sivakumar, DKNM. Jeludine, A. Bell, DT. Glyn, P. Mackinnon, The pressure distribution along stone columns in soft clay under consolidation and foundation loading. *Geotechnique*, 61(7) (2011) 613-620.
- [17] CS. Wu, YS. Hong, Laboratory tests on geosynthetic encapsulated sand columns. *Geotextiles and Geomembranes*, 27 (2009) 107-120.
- [18] SS. Najjar, S. Sadek, T. Maakaroun, Effect of sand columns on the undrained load response of soft clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 136(9) (2010) 1263-1277.
- [19] BI. Kim, SH. Lee, Comparison of bearing capacity characteristics of sand and gravel compaction pile treated ground. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 9(3) (2005) 197-203.
- [20] A. Cimentada, A. Da Costa, J. Canizal, C. Sagaseta, Laboratory study on radial consolidation and deformation in clay reinforced with stone columns. *Canadian Geotechnical Journal*, 48 (2011) 36-52.
- [21] M. Ghazavi, J.N. Afshar, Bearing capacity of geosynthetic encased stone columns. *Geotextiles and Geomembranes*, 38 (2013) 26-36.
- [22] S. Lai, Similitude for shaking table tests on soil structure fluid models in 1g gravitational field. *Soils and Foundations*, 29(1) (1989) 105-118.
- در ستون‌های سنگی گروهی نیز به مانند ستون منفرد، قرار دادن پوشش ژئوتکستایل باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود. مقدار این افزایش برابر ۲۹/۷٪ است.
- با بررسی آرایش مثلثی و مربعی روی ستون‌های سنگی گروهی، اختلاف ناچیزی به مقدار ۵٪ در ظرفیت باربری آن‌ها مشاهده شد.

### مراجع

- [1] J.M.O. Huges, N.J. Withers, Reinforcing of cohesive soils with stone columns. *Ground Eng*, (1974) 7 (3) 42-49.
- [2] M. Madhav, P. Vitkar, Strip footing on weak clay stabilized with a granular trench or pile. *Canadian geotechnical journal*, (1978) 15(4) 605-609.
- [3] H. Aboshi, E. Ichimoto, K. Harada, M. Emoki, The composer—A method to improve the characteristics of soft clays by inclusion of large diameter sand columns. *Proc., Int. Conf. on Soil Reinforcement. E.N.P.C., 1, Paris*, (1979) 211-216.
- [4] S. Murugesan, K. Rajagopal, Studies on the behaviour of single and group of geosynthetic encased stone columns. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 136(1) (2010) 129-139.
- [5] V. Sivakumar, D. McKelvey, J. Graham, D. Hughes, Triaxial tests on model sand columns in clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(2) (2004) 299-312.
- [6] A. Ambily, S.R. Gandhi, Behavior of stone columns based on experimental and FEM analysis. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 133(4) (2007) 405-415.
- [7] J. Gniel, A. Bouazza, Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(3) (2009) 167-175.
- [8] J. Castro, C. Sagaseta, Deformation and consolidation around encased stone columns. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(3) (2011) 268-276.
- [9] S.K. Dash, M.C. Bora, Improved performance of soft clay foundations using stone columns and geocellsand mattress. *Geotextiles and Geomembranes*, 41 (2013) 26-35.
- [10] S.R. Mohapatra, IK. Rajagopa, J. sharma, Direct shear tests on geosynthetic-encased granular columns. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(3) (2016) 396-405.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

S. H. Lajevardi, S. Enami, H. R. Shamsi, M. Hamidi, Experimental study of single and groups of stone columns encased by geotextile, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(6) (2019) 1053-1060.

DOI: 10.22060/ceej.2018.12789.5269

