

عملکرد ستون سنگی مسلح به ژئوتکستایل و ژئوگرید در آزمایش سه محوری

مسعود نصیری* (دانشجوی دکتری)

محمد حاجی عزیزی (دانشیار)

دانشکده فنی همدسی، دانشگاه رازی

مهندسی عمران شریف، تابستان (۱۴۰۰)
دوری ۲ - ۳۷، شماره ۲/۱، ص. ۱۳۱-۱۳۷، (پادداشت فنی)

به کارگیری ستون های سنگی یکی از راهکارهای مؤثر در افزایش ظرفیت باربری خاک ها و کاهش میزان نشست است. در شرایطی که بستر خاکی به محصورکنندگی بیشتری نیاز داشته باشد، استفاده از غلاف هایی از جنس ژئوتکستایل و ژئوگرید یکی از روش های بهبود عملکرد این اعضای باربر محسوب می شود. هدف از انجام این پژوهش مقایسه ی رفتار غلاف های ژئوتکستایل و ژئوگرید در مسلح کردن ستون های سنگی در آزمایش سه محوری در شرایط تحکیم یافته ی زهکشی نشده است. در آزمایش ها از ستون سنگی در ماسه استفاده شده است. در این پژوهش یک سری آزمایش های سه محوری در حالت زهکشی نشده انجام شده است. نتایج نشان داد که در شرایط یکسان، غلاف ژئوگرید نسبت به ژئوتکستایل عملکرد بهتری دارد؛ به طوری که در کمترین تنش محصورکننده، افزایش ظرفیت باربری برای ستون مسلح به ژئوگرید و ژئوتکستایل به ترتیب ۱/۳۱ و ۱/۱۸ برابر است.

واژگان کلیدی: ماسه، ستون سنگی، غلاف ژئوستنتیکی، آزمایش سه محوری.

۱. مقدمه

و هم چنین کمتر شدن میزان خمره یی شدن این اعضا چشم گیرتر خواهد بود. نتایج تحقیقات میراندا و داکوستا^[۱۳،۱۴] روشن کرد که اگر سنگ دانه های ستون در غلاف ژئوتکستایل پیچیده شوند، عملکرد بهتر (به ویژه در تنش های محصورکننده ی کمتر) در مقایسه با ستون سنگی غیرمسلح خواهند داشت. نتایج آزمایش های کوچک مقیاس بر روی ظرفیت باربری ستون های سنگی مسلح با لایه های ژئوتکستایل نشان دهنده ی کارایی مطلوب این روش در بهسازی و تثبیت بسترهای سست است.^[۱۴-۱۶]

گو و همکاران^[۱۷] با انجام یک سری مدل سازی آزمایشگاهی، سازگار انتقال بار و الگوی تغییر شکل های خمره یی شدن ستون های سنگی مسلح به ژئوگرید را بررسی کردند. نتایج پژوهش آن ها نشان داد که طول مؤثر برای غلاف ژئوگرید، در حدود سه تا چهار برابر قطر ستون سنگی است. گو و همکاران^[۱۸] با انجام تحلیل سه بعدی اجزای مجزا، رفتار ستون سنگی مسلح به ژئوگرید را تحت فشار محصور نشده بررسی کردند و نشان دادند که ژئوگرید با سختی کششی بیشتر، می تواند تنش های محصورکننده بالاتری را فراهم کند و در نتیجه ظرفیت باربری ستون افزایش خواهد یافت. اندازه ی ذرات در تغییر شکل های کوچک، اثر ناچیزی بر منحنی تنش - کرنش ستون های سنگی مسلح دارد؛ اما در تغییر شکل های بزرگ، سنگ دانه های بزرگتر، موجب افزایش سختی ستون می شوند. از همین رو، انتخاب دانه های با ابعاد درشت تر از ابعاد چشمه های ژئوگرید، راه حلی مناسب برای قفل و بست بهتر بین سنگ دانه ها و ژئوگرید و لغزش کمتر ستون مسلح تحت بار است. نتایج پژوهش های انجام شده در زمینه ی ظرفیت باربری بسترهای خاکی تقویت شده با ستون سنگی مسلح با غلاف ژئوگرید، مبین اثربخشی قابل توجه این عناصر سازه یی در افزایش

استفاده از ستون های سنگی در بسترهای خاکی یکی از روش های کاربردی برای افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست است.^[۱۹] در برخی مواقع شرایط بستر به گونه یی است که ستون سنگی به مسلح شدن به کمک روش های خاصی نیاز دارد. علت این موضوع آن است که در صورت مناسب نبودن شرایط خاک اطراف ستون سنگی، به محصورکنندگی بیشتری برای ستون سنگی احتیاج است تا عملکرد فرایند مسلح سازی مناسب تر شود. محصورکنندگی بیشتر را می توان با استفاده از ژئوگرید یا ژئوتکستایل ایجاد کرد. هر چند ستون های سنگی، خود مسلح کننده ی خاک هستند، اما با مسلح کردن ستون های سنگی با استفاده از ژئوگرید یا ژئوتکستایل، تسلیح خاک افزایش می یابد.

از جمله ی این روش ها می توان به ایجاد صلبیت در ستون های سنگی (استفاده از دوغاب سیمان^[۲]) و استفاده از دورپیچ های مقاوم (انواع ژئوستنتیک ها) اشاره کرد. در بین انواع ژئوستنتیک هایی که به عنوان غلاف می توان به دور ستون سنگی پیچید، ژئوتکستایل و ژئوگرید راه حلی قابل قبول است. پژوهشگران مختلفی استفاده از لایه های ژئوتکستایل^[۲-۶] و ژئوگرید^[۷-۱۰] را برای افزایش کارایی ستون های سنگی پیشنهاد داده اند.

نتایج پژوهش های ژانگ و ژائو^[۱۱] مشخص کرد که هر قدر سختی غلاف ژئوتکستایل بیشتر باشد، عملکرد ستون سنگی مسلح در کاهش میزان نشست بستر

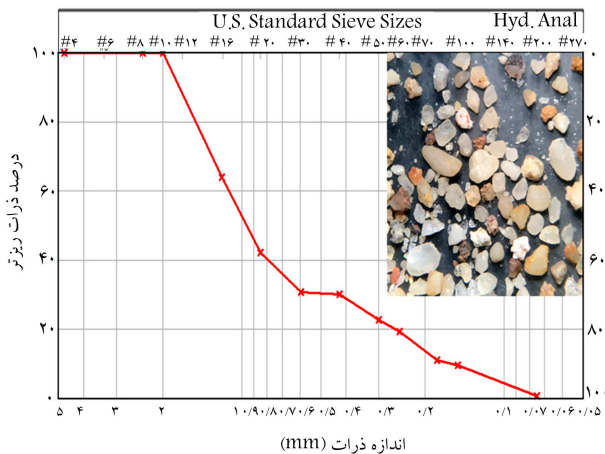
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۳/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۹/۵/۱۹، پذیرش ۱۳۹۹/۷/۵

DOI:10.24200/J30.2020.55894.2788

جدول ۱. مشخصات ماسه.

۷,۲۳۱	ضریب یکنواختی (Cu)
۱,۰۱۰	ضریب انحنای (Cc)
SW	نام خاک در سیستم طبقه‌بندی متحد
۲,۶۶۰	چگالی ویژه (Gs)
۰,۵۶۹	نسبت تخلخل بیشینه (e_{max})
۰,۳۵۲	نسبت تخلخل کمینه (e_{min})
۳۰,۷	زاویه اصطکاک (ϕ)
≈ 0	چسبندگی (کیلو پاسکال) (C)
۸۲۱۳	مدول برشی (کیلو پاسکال) (G)



شکل ۱. نتایج آزمایش دانه‌بندی روی ماسه به همراه تصویر دانه‌های آن زیر میکروسکوپ نوری.



شکل ۲. دستگاه سه محوری.

را به دست آورد. روش بارش به دو پارامتر بستگی دارد، یکی شدت بارش (میزان ماسه‌ی ریخته شده در حجم مشخص و در زمان مشخص) است و دیگری ارتفاع سقوط ماسه است که فاصله‌ی بین خروجی ماسه از مخزن بارش تا بستر ماسه است. نکته‌ی مهم آن است که برای رسیدن به یک تخلخل یکسان باید این فاصله در طول فرایند بارش همواره ثابت نگه داشته شود. پس از اتمام عملیات بارش و تکمیل فرایند ساخت نمونه‌ی با تخلخل تقریباً یکسان، ابتدا کپ زیرین تحت مکش قرار داده می‌شود و سپس قالب جداشونده از دور نمونه باز می‌شود. هدف از اعمال مکش به کپ زیرین جلوگیری از جابه‌جایی نمونه در حین بازکردن قالب محافظ، نصب کپ بالا و انجام آزمایش است. پس از انجام این مرحله، آزمایش بر اساس

توان باربری خاک است. [۱۹-۲۱] نتایج پژوهش شمسی و مقدس تفرشی [۲۲] نشان داد که استفاده از ستون سنگی غیرمسلح و مسلح با ژئوتکستایل می‌تواند ضمن کنترل نشست بستر، باربری آن را به میزان قابل ملاحظه‌ی افزایش دهد.

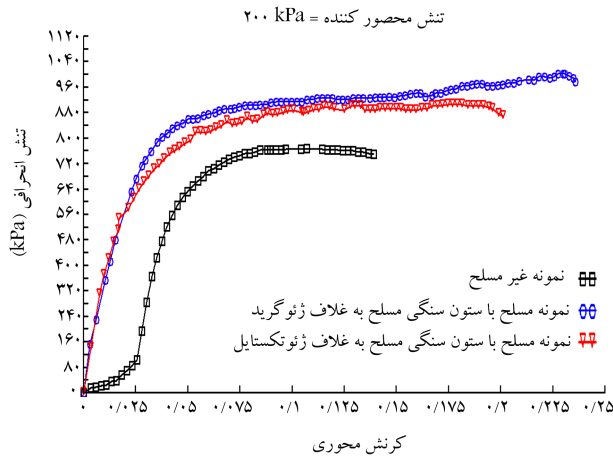
هدف از انجام پژوهش ارائه شده، مقایسه‌ی عملکرد ستون‌های سنگی مسلح به غلاف ژئوتکستایل و ژئوگرید در ماسه‌ی بی با مشخصات جدول ۱ است. در این تحقیق از آزمایش‌های سه‌محوری در حالت زهکشی نشده کمک گرفته شده است، تا بتوان رفتار این ستون‌های مسلح را در افزایش ظرفیت باربری (در شرایط یکسان) بررسی کرد. هدف اصلی از انجام آزمایش‌ها در این پژوهش که نوآوری آن نیز محسوب می‌شود، استفاده از ستون سنگی برای تقویت بستر ماسه‌ی بی است. تاکنون پژوهش‌های متعددی در رابطه با بهبود عملکرد خاک‌های رسی با ستون سنگی به انجام رسیده است، در حالی که توجه به این مطلب ضروری به نظر می‌رسد که آیا ظرفیت باربری و عملکرد خاک‌های ماسه‌ی بی را نیز به کمک همین روش می‌توان بهبود بخشید؟ پرسشی که در انتهای این پژوهش به آن پاسخ داده شده است.

مدل‌سازی نمونه‌ی ستون سنگی در آزمایش سه‌محوری، شبیه‌سازی برای نمونه‌ی بی است که تحت فشار هم‌جانبه قرار دارد و با افزایش تنش محوری، سازوکار گسیختگی تحلیل می‌شود. این شبیه‌سازی بر اساس شرایط واقعی، الگو برداری شده است اما در مقیاس کوچک، به عبارت دیگر در شرایط واقعی، یک ستون سنگی که تحت فشار هم‌جانبه قرار دارد با افزایش سربار تغییر شکل می‌دهد و ممکن است به آستانه‌ی گسیختگی برسد که در این مقاله ساز و کار گسیختگی بررسی می‌شود.

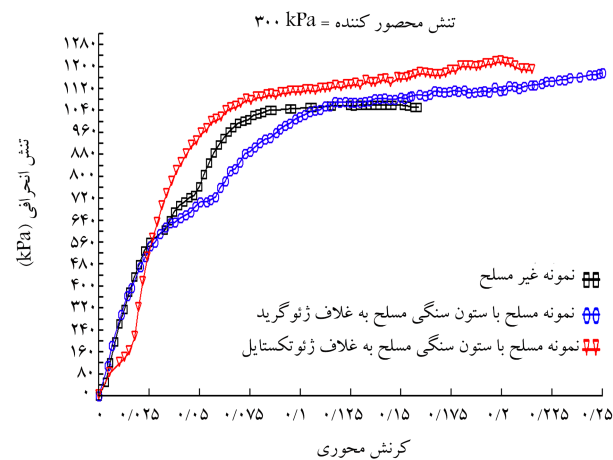
۲. مواد و مصالح پژوهش

مشخصات ماسه‌ی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ و جدول ۱ مشاهده می‌شود. زاویه‌ی اصطکاک مصالح ستون سنگی ۴۷٫۸ درجه است. مقدار زاویه‌ی اصطکاک داخلی با استفاده از دستگاه سه‌محوری نشان داده شده در شکل ۲ اندازه‌گیری شده است. مشخصات غلاف‌های ژئوتکستایل و ژئوگرید در جدول ۲ آمده است. آزمایش‌ها در دستگاه سه‌محوری انجام شده است که در شکل ۲ قابل مشاهده است. تمام نمونه‌ها در آزمایش‌های سه‌محوری دارای ابعاد یکسان (قطر ۱۰ سانتی‌متر و ۲۰ ارتفاع سانتی‌متر) بوده‌اند. به منظور رعایت اثرات مرز (رعایت فاصله‌ی پنج برابری شعاع ستون سنگی از کناره‌های نمونه [۲۳]) قطر ستون سنگی ۲ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۲۰ سانتی‌متر انتخاب شده است. دانه‌بندی مصالح ستون سنگی به گونه‌ی بی بوده است که ذرات شن از الک شماره ۵/۵ اینچ عبور کرده و روی الک شماره ۸ اینچ باقی مانده‌اند. به علت محدودیت‌های اجرایی در آزمایشگاه و هم‌چنین شبیه‌سازی هر چه بیشتر شرایط طبیعی، وزن مخصوص نمونه‌های ماسه‌ی بی و ستون سنگی به ترتیب ۱۵ و ۱۷ کیلو نیوتن بر متر مکعب انتخاب شده است.

پیش از شرح آزمایش‌های انجام شده، لازم است که روش نمونه‌سازی برای ماسه‌ها در آزمایش سه‌محوری به صورت مختصر توضیح داده شود. به منظور تهیه و آماده‌سازی نمونه‌های ماسه‌ی بی برای آزمایش سه‌محوری از روش بارش خشک استفاده می‌شود. در این روش ابتدا غشا به دور کپ زیرین دستگاه سه‌محوری متصل می‌شود و قالب دوکفه‌ی جداشونده به دور غشا محکم می‌شود و به کمک پمپ خلأ با ایجاد مکشی در حدود ۲ بار، غشا محکم به جداره‌های قالب جداشونده متصل می‌شود و سپس یک صفحه‌ی مشبک با قطر داخلی ۱۰ سانتی‌متر روی استوانه‌ی ساخت نمونه قرار داده می‌شود. هدف از این کار ایجاد یک نمونه همگن با سرعت بارش یکنواخت است تا بتوان نمونه‌ی بی با تخلخل تا حد ممکن همسان



شکل ۵. نمودار تنش - کرنش در شرایط تنش محصورکننده ۲۰۰ کیلو پاسکال.



شکل ۶. نمودار تنش - کرنش در شرایط تنش محصورکننده ۳۰۰ کیلو پاسکال.

آزمایش‌های سه‌محوری از سه بازه‌ی متفاوت فشار محصورکننده (۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلو پاسکال) استفاده شده است. آزمایش تحکیم‌یافته‌ی زهکشی نشده معمول‌ترین نوع آزمایش سه‌محوری است. در این آزمایش نمونه‌ی خاک اشباع ابتدا توسط فشار محفظه‌ی هم‌جانبه تحکیم می‌یابد (شیر زهکشی باز است). پس از زائل شدن کامل اضافه فشار حفره‌ی ایجاد شده توسط فشار محفظه‌ی، تنش انحرافی قائم افزایش داده می‌شود تا جایی که باعث گسیختگی نمونه شود. در حین این مرحله از آزمایش، شیر زهکشی بسته است. از آنجایی که به نمونه اجازه‌ی زهکشی داده نمی‌شود، فشار آب حفره‌ی افزایش خواهد یافت. در این آزمایش، تنش‌های کل و مؤثر با هم برابر نیستند؛ زیرا تمام بار به دانه‌های جامد رسیده است و بنابراین تنش کل حاکم خواهد بود.

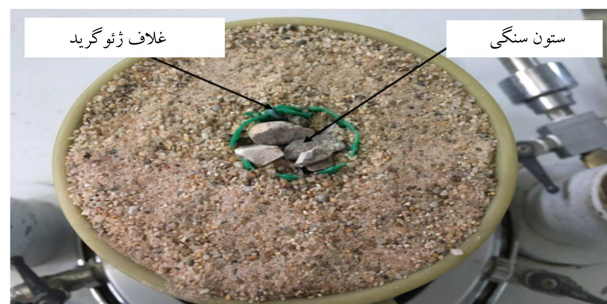
در شکل‌های ۵ تا ۷ نمودارهای تنش - کرنش برای حالات مختلف و در شکل ۸ مقایسه‌ی دو مسلح‌کننده‌ی ژئوتکستایل و ژئوگرید نمایش داده شده است. شکل ۹ انواع گسیختگی نمونه‌های غیرمسلح، مسلح با ژئوتکستایل و مسلح با ژئوگرید را در انتهای آزمایش نشان می‌دهد. می‌توان دریافت که مود گسیختگی در شکل ۹ الف (نمونه‌ی غیرمسلح) به صورت خمه‌ی است. در حالی که عملکرد غلاف‌های ژئوستنتیکی منجر به تغییر مود به سمت برشی می‌شود. در شکل زیر با خطوطی که بر روی تصویر کشیده شده، این موضوع نشان داده شده است. خطوط قرمز رنگ در شکل‌های ۹ ب و ۹ ج نشان‌دهنده‌ی صفحه‌ی برش‌خورده در این نمونه‌ها پس از

جدول ۲. مشخصات ژئوتکستایل و ژئوگرید.

لایه‌ی ژئوتکستایل	
۲/۱	ضخامت میلی‌متر (t)
۳۰۰	وزن (g/cm)
PET	نوع مصالح
۱۷/۲	مقاومت کشش نهایی (k/m)
۴۰۰	سختی (J) (k/m)
لایه‌ی ژئوگرید	
CE۱۲۱C	نام مدل
۶ × ۸	ابعاد چشمه (mm)
۷۳۰	وزن (g/cm)
	نوع مصالح
	پلی‌اتیلن با چگالی بالا
۷/۶۸	مقاومت کششی نهایی (k/m)
۱۰۰۰	سختی (J) (k/m)



شکل ۳. ساخت ستون سنگی مسلح با غلاف ژئوتکستایل در آزمایش سه‌محوری.



شکل ۴. ساخت ستون سنگی مسلح با غلاف ژئوگرید در آزمایش سه‌محوری.

استاندارد ASTM D۷۱۸۱-۱۱ انجام می‌گیرد. شکل‌های ۳ و ۴ نمونه‌های ساخته شده‌ی ستون سنگی مسلح با غلاف ژئوتکستایل و ژئوگرید را در قالب سه‌محوری نشان می‌دهند.

۳. آزمایش‌های انجام شده

در این بخش نتایج آزمایش‌های سه‌محوری در شرایط زهکشی نشده (آزمایش CU) بر روی ماسه در شرایط غیرمسلح، مسلح با ستون سنگی مسلح با غلاف ژئوتکستایل و مسلح با ستون سنگی مسلح با غلاف ژئوگرید شرح داده خواهند شد. در سری

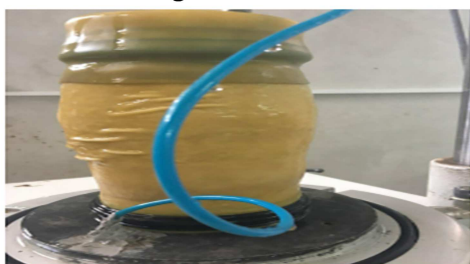
جدول ۳. نتایج آزمایش سه محوری.

غیر مسلح			ستون مسلح با غلاف			
			ژئوتکتایل		ژئوگرید	
σ_3	σ_1	$\Delta\sigma_d$	σ_1	$\Delta\sigma_d$	σ_1	$\Delta\sigma_d$
(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)
۲۰۰	۹۶۷,۷۶	۷۶۷,۷۶	۱۱۰۵,۲۷	۹۰۵,۲۷	۱۲۰۳,۳۱	۱۰۰۳,۳۱
۳۰۰	۱۳۶۰,۶۱	۱۰۶۰,۶۱	۱۵۱۸,۴۹	۱۲۱۸,۴۹	۱۴۷۹,۰۱	۱۱۷۹,۰۱
۴۰۰	۱۸۰۰,۵۶	۱۴۰۰,۵۶	۱۷۹۵,۸۲	۱۳۵۹,۸۲*	۱۹۶۶,۰۸	۱۵۶۶,۰۸
σ_3	غیر مسلح / ژئوتکتایل		غیر مسلح / ژئوگرید		ژئوتکتایل / ژئوگرید	
(kPa)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
۲۰۰	۱,۱۴	۱,۱۸	۱,۲۴	۱,۳۱	۱,۰۹	۱,۱۱
۳۰۰	۱,۱۲	۱,۱۵	۱,۰۹	۱,۱۱	۰,۹۷	۰,۹۷
۴۰۰	۰,۹۸	۰,۹۷	۱,۱۰	۱,۱۲	۱,۱۲	۱,۱۵

* برای اطمینان از نتیجه آزمایش دو بار تکرار شد.



الف) نمونه غیر مسلح؛



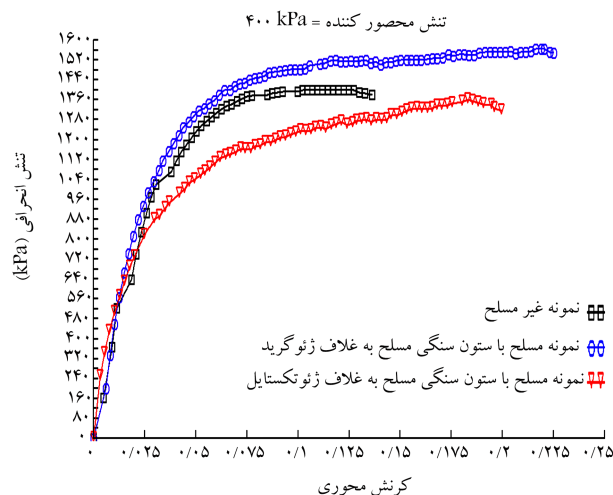
ب) نمونه مسلح با ستون سنگی مسلح با غلاف ژئوتکتایل؛



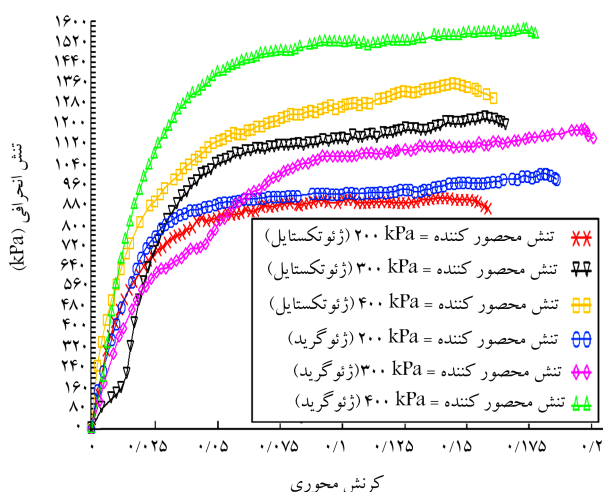
ج) نمونه مسلح با ستون سنگی مسلح با غلاف ژئوگرید.

شکل ۹. انواع گسیختگی ها.

آزمایش است. شکل های ۹ ب و ۹ ج مربوط به ستون های سنگی مسلح با غلاف های ژئوتکتایل و ژئوگرید است. نتایج نهایی آزمایش های سه محوری و مقایسه ای آنها در جدول ۳ ارائه شده است. برای کسب اطمینان از نتایج، سومین آزمایش در ستون مسلح با ژئوتکتایل مجدداً تکرار و از صحت داده ها اطمینان حاصل شد.



شکل ۷. نمودار تنش - کرنش در شرایط تنش محصور کننده ای ۴۰۰ کیلو پاسکال.



شکل ۸. مقایسه ای نمودار تنش - کرنش برای ستون های مسلح با غلاف های ژئوتکتایل و ژئوگرید.

جدول ۴. تبدیل مدل واقعی به آزمایشگاهی به کمک ضریب مقیاس. [۲۴]

جرم	نیرو	مساحت	طول	زمان	
M	F	A	L	T	مدل واقعی
$S^3 M$	$S^2 F$	$S^2 A$	SL	\sqrt{ST}	مدل آزمایشگاهی

می‌کنند؛ هرچند که آزمایش‌های بزرگ مقیاس کنترل بهتری در مورد پارامترهای کلیدی مشخصات مسئله‌ی مورد نظر دارند. نکته‌ی مهم در این زمینه آن است که نتایج آزمایش‌های کوچک مقیاس وابسته به مقیاس هستند و نتایج به دست آمده در شرایط آزمایش‌های $1-g$ مستقیماً برای حالت نمونه‌ی اصلی قابل کاربرد نیستند. نتایج آزمایش‌های کوچک مقیاس را می‌توان با استفاده‌ی دقیق از قوانین مقیاس برای نمونه‌های اصلی هم به کار برد، هر چند که به دلیل پیچیدگی‌های موجود قضاوت مهندسی در این زمینه نقشی اساسی و مهم خواهد داشت. در نظر گرفتن اثر اندازه‌ی واقعی به مبحث تحلیل ابعادی مربوط می‌شود که از نسبت‌هایی که در جدول ۴ آمده است، استفاده می‌شود؛ در این جدول S نسبت مقیاس است. [۲۴] بنابراین به کمک جدول ۴ می‌توان هر مدل آزمایشگاهی را تبدیل به مدل واقعی کرد و نیز هر مدل واقعی را در آزمایشگاه مدل‌سازی کرد. خواص مقاومتی خاک مانند چسبندگی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و وزن مخصوص، در مدل‌های واقعی و آزمایشگاهی ثابت هستند و تغییر نمی‌کنند.

۳.۳. مقایسه‌ی نتایج پژوهش ارائه شده و تحقیقات میراندا و

داکوستا [۱۲]

در این قسمت مقایسه‌ی بین یافته‌های این پژوهش و یافته‌های میراندا و داکوستا [۱۲] انجام خواهد شد. تحقیقات میراندا و داکوستا بر روی ستون‌های شنی غیرمسلح و مسلح با ژئوتکتایل به کمک آزمایش سه‌محوری زهکشی شده انجام شد. در آن تحقیق نویسندگان از دو نوع ژئوتکتایل متفاوت استفاده کردند. یافته‌های این پژوهشگران نشان داد که اثر محصورکنندگی غلاف‌های ژئوتکتایل در افزایش ظرفیت باربری نسبت به ستون‌های شنی غیرمسلح قابل توجه است و در حالی که این اثر در تنش‌های محصورکنندگی پایین محسوس‌تر است. در پژوهش ارائه شده، نمونه‌های ماسه‌ی در حالت غیرمسلح و مسلح با ستون‌های سنگی مسلح شده با غلاف‌های ژئوگرید و ژئوتکتایل در آزمایش سه‌محوری زهکشی نشده بررسی و ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که در تنش‌های همه‌جانبه‌ی پایین، کارایی غلاف‌ها بهتر خواهد بود. بر اساس یافته‌های این پژوهش می‌توان بیان کرد که برای خاک‌های ماسه‌ی نیز ستون سنگی مسلح (در شرایط تنش همه‌جانبه‌ی پایین) عملکرد مناسبی دارد. هر چند که نمی‌توان انتظار داشت که بهبود عملکرد همانند خاک‌های نرم رسی باشد. اما نتایج به دست آمده از این آزمایش‌ها به خوبی مبین کارایی قابل قبول این روش در افزایش ظرفیت باربری ماسه‌هاست.

۴. بحث و بررسی

بررسی نتایج به دست آمده از آزمایش‌های سه‌محوری نشان می‌دهد که در پایین‌ترین سطح تنش محصورکننده (۲۰۰ کیلوپاسکال)، ظرفیت باربری ستون سنگی مسلح به ژئوتکتایل و ژئوگرید به ترتیب ۱/۱۸، ۱/۳۱ برابر نمونه‌ی غیرمسلح است. در تنش محصورکننده‌ی ۳۰۰ کیلوپاسکال نسبت تنش انحرافی ستون مسلح به غیرمسلح برای ژئوتکتایل ۱/۱۵ برابر و برای ژئوگرید ۱/۱۱ برابر خواهد بود. علت این اختلاف

با توجه به ماهیت خاک‌های ماسه‌ی (که ریزشی هستند)، با استفاده از غلاف در زمان حفاری و پُر کردن درون آن با مصالح ستون سنگی و سپس بیرون کشیدن غلاف، می‌توان ستون‌های سنگی را در چنین بستریابی احداث کرد. اساس کار غلاف‌گذاری همانند سیستم حفاری شمع‌های با غلاف است، با این تفاوت که به جای شمع از مصالح ستون سنگی (چه ستون سنگی غیرمسلح و چه ستون سنگی مسلح با پوشش ژئوگرید یا ژئوتکتایل) استفاده می‌شود.

۱.۳. تفسیر آزمایش‌ها

در این بخش، آزمایش‌های انجام گرفته ارزیابی و تحلیل خواهند شد. با توجه به شکل ۵ می‌توان بیان کرد که در کمترین تنش محصورکننده، ستون سنگی مسلح با ژئوگرید دارای بیشترین ظرفیت باربری است و با اختلاف کمی ستون سنگی مسلح با ژئوتکتایل قرار دارد (افزایش ظرفیت باربری ستون سنگی مسلح با ژئوگرید، ۱/۱۱ برابر ستون سنگی مسلح با ژئوتکتایل بوده است). در حالی که در چنین شرایطی نمونه‌ی غیرمسلح با اختلاف چشم‌گیری کمترین ظرفیت باربری را به خود اختصاص داده است. نکته‌ی قابل توجه دیگر آن است که تا تغییر شکل ۴ میلی‌متر، نمودار ستون‌های مسلح بر هم منطبق هستند و عملاً ظرفیت باربری یکسانی دارند؛ اما در تغییر شکل‌های بزرگتر کارایی غلاف ژئوگرید محسوس‌تر می‌شود. با افزایش تنش محصورکننده (شکل ۶)، با اینکه تا حدود ۴ میلی‌متر جابه‌جایی، عملکرد غلاف ژئوگرید بهتر است اما در نهایت ظرفیت باربری ستون سنگی مسلح با ژئوتکتایل دارای بیشینه‌ی ظرفیت باربری خواهد بود (افزایش ظرفیت باربری ستون سنگی مسلح با ژئوگرید، ۰/۹۷ برابر ستون سنگی مسلح با ژئوتکتایل بوده است). نکته‌ی دیگر این است که در چنین شرایطی، کمینه‌ی ظرفیت باربری هم‌چنان به نمونه‌ی غیر مسلح تعلق دارد. در سومین حالت (اعمال بیشترین تنش محصورکننده به نمونه‌ها، یعنی شکل ۷)، با وجود رفتار بهتر غلاف ژئوگرید در کرنش‌های پایین (تا جابه‌جایی در حدود ۴ میلی‌متر) عملکرد غلاف ژئوگریدی بسیار بهتر از غلاف ژئوتکتایل است (افزایش ظرفیت باربری این دو حالت ۱/۱۵ برابر است). نکته‌ی مهم دیگر که از این آزمایش مشخص شد آن بود که در شرایط بیشترین تنش همه‌جانبه و در کرنش‌های بزرگتر، عملکرد ستون سنگی مسلح با غلاف ژئوتکتایل غیرمطلوب و نامناسب است. در حالی که وجود غلاف ژئوگریدی حتی در شرایط فشار همه‌جانبه‌ی بالا هم به خوبی کارایی دارد. نکته‌ی قابل توجه این است که در استفاده از غلاف‌های ژئوستتیک‌ی باید به شرایط محصورکنندگی توجه ویژه‌ای داشت، چرا که عملکرد این غلاف‌ها با توجه به تنش‌های همه‌جانبه‌ی اعمال شده به نمونه‌های مسلح بسیار متفاوت و در مواردی متضاد است.

۲.۳. اثر مقیاس

در این بخش به بررسی اثرات مقیاس و نقش آن در نتایج آزمایش‌ها پرداخته می‌شود. مشخص است که به دلیل تأثیر مقیاس، خاک‌های ماسه‌ی ممکن است همان نقشی را که در مدل‌های آزمایشگاهی دارند در نمونه‌ی اصلی نداشته باشند. علت این اختلاف‌ها نیز تفاوت در تراز تنش بین مدل‌های آزمایشگاهی و آزمون‌های صحرایی است. بدین منظور محققان مختلف راهکارهای متنوعی ارائه می‌کنند. اما همگی در مورد یک اصل کلی اشتراک نظر دارند که استفاده از مدل‌های $1-g$ می‌تواند فقط در پیش‌بینی رفتارهای کلی و عمومی نمونه‌های اصلی به کار برود. چرا که آزمایش‌های کوچک مقیاس در شرایط $1-g$ ساده‌تر از آزمایش‌های بزرگ مقیاس به دستیابی تقریب مناسب اطلاعات در مورد رفتار کلی نمونه‌های اصلی کمک

جزئی را شاید بتوان با ابعاد سنگ‌دانه‌های ستون سنگی توجیه کرد؛ چرا که شن دانه‌بندی کاملاً یکنواخت و یک‌دستی نداشته است. اما در تنش محصورکننده‌ی ۴۰۰ کیلوپاسکال، وضعیت کاملاً متفاوت است. در چنین شرایطی، کارایی ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل ۰/۹۷٪ حالت غیرمسلح است؛ در حالی که برای ستون مسلح با ژئوگرید ۱/۱۲ برابر می‌شود. مقایسه‌ی دو حالت مسلح و غیرمسلح اهمیت و نقش تنش‌های محصورکننده در میزان ظرفیت باربری را به خوبی روشن می‌سازد. در شرایطی که مجبور به استفاده از غلاف‌های ژئوستتیک در تنش‌های محصورکننده‌ی بالا باشیم، استفاده از غلاف ژئوتکستایل روش مناسبی محسوب نمی‌شود. در چنین شرایطی استفاده از ستون سنگی مسلح با غلاف ژئوگرید کارایی بهتری دارد؛ زیرا مقایسه‌ی عملکرد دو ستون سنگی مسلح، افزایش ۱/۱۵ برابر ستون مسلح با ژئوگرید را در افزایش ظرفیت باربری (نسبت به ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل) نشان می‌دهد. پس می‌توان بیان کرد که عملکرد غلاف ژئوگرید در هر شرایطی بهتر از غلاف ژئوتکستایل خواهد بود.

همان‌گونه که در شکل ۵ تا ۷ مشخص است، با افزایش فشار محصورکنندگی، نمودارهای مسلح با ژئوتکستایل و ژئوگرید رفته‌رفته از یکدیگر فاصله می‌گیرند. بر اساس نتایج به‌دست آمده مشخص است که در تنش‌های همه‌جانبه‌ی کم، غلاف ژئوتکستایل و ژئوگرید نقش پررنگ‌تری در افزایش ظرفیت باربری نسبت به حالت غیرمسلح دارند (۱/۱۸ برابر در حالت وجود ژئوتکستایل و ۱/۳۱ برابر در شرایط وجود ژئوگرید در فشار همه‌جانبه‌ی ۲۰۰ کیلوپاسکال). این مسئله برای ستون‌های شنی توسط میراندا و داکوستا^[۱۱] نیز به اثبات رسیده است. با مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌های این محققان و نتایج پژوهش حاضر، می‌توان اظهار داشت که وجود غلاف‌های ژئوستتیک به عنوان مسلح‌کننده‌ی ستون‌های سنگی، به عنوان دورپیچ، در هر دو نوع خاک ماسه‌یی و رسی، در تنش‌های محصورکننده‌ی پایین، بیشترین عملکرد را در افزایش ظرفیت باربری خواهند داشت. نکته‌ی مهم دیگری که باید در اینجا به آن اشاره کرد آن است که نحوه‌ی گسیختگی در نمونه‌های مسلح شده با غلاف‌های ژئوستتیک در مقایسه با نمونه‌ی غیرمسلح، از نظر ظاهری علامت مشخص‌تری دارند. همان‌طوری که در شکل ۹ مشخص است، سطح گسیختگی و ناحیه‌ی برش خورده در نمونه‌ی مسلح با ژئوتکستایل کاملاً قابل مشاهده است. با توجه به معیار گسیختگی دراکر - پراگر در تنش‌های محصورکننده‌ی کم، فاصله‌ی بیشتری تا پوش گسیختگی وجود دارد و حاشیه‌ی امن برای نزدیک نشدن به ناحیه‌ی گسیختگی وجود دارد. اما در تنش‌های با محصورکنندگی زیاد، فاصله‌ی محور قطری تا پوش گسیختگی خیلی کم می‌شود و حاشیه‌ی امن برای وارد شدن به باند گسیختگی یا وجود ندارد یا ناچیز است. نبود یا کمبود حاشیه‌ی امن موجب می‌شود که در تنش‌های با محصورکنندگی بالا عملکرد بهتری دیده نشود.

همان‌طور که در تحقیقات پیشین بر روی خاک رسی و این پژوهش در خاک ماسه‌یی نشان داده شد، نقش تنش محصورکننده برای ستون معمولی قابل توجه است. اگر تنش همه‌جانبه زیاد باشد، ستون سنگی معمولی به خوبی جوابگوست و نیازی به استفاده از غلاف ندارد؛ چون این غلاف عملاً تنش محصورکننده‌ی اضافه‌یی برای سیستم ستون سنگی فراهم نمی‌کند. اما در شرایط تنش همه‌جانبه‌ی کم، نقش غلاف

قابل توجه است و فقدان فشار همه‌جانبه را جبران خواهد کرد. علت عملکرد بهتر غلاف در تنش‌های پایین در این پژوهش نیز همین موضوع است. علت اینکه غلاف ژئوگرید عملکرد بهتری نسبت به غلاف ژئوتکستایل دارد، به سختی‌شان بازمی‌گردد. ژئوگرید از نظر ساختار، دارای سختی و صلبیت بیشتری نسبت به ژئوتکستایل است که ماهیتی نرم دارد. بر همین اساس است که ژئوگرید عملکرد بهتری در افزایش ظرفیت باربری ستون سنگی مسلح با این ژئوستتیک دارد. صلبیت لایه‌های ژئوگرید منجر به افزایش مقاومت توده‌ی مسلح‌شده خواهد شد که همین امر علت عملکرد بهتر این ورقه‌های ژئوستتیک در افزایش ظرفیت باربری است.

برای نمونه می‌توان به مسلح‌سازی زمین‌های ماسه‌یی به‌ویژه در نزدیکی سواحل به منظور افزایش ظرفیت باربری برای احداث سازه یا شیب‌های ماسه‌یی به‌منظور افزایش ضریب اطمینان اشاره کرد. استفاده از ستون سنگی مسلح به ژئوگرید یا ژئوتکستایل موجب افزایش ظرفیت باربری در زمین‌های ماسه‌یی و ضریب اطمینان در شیب‌های ماسه‌یی می‌شود. همان‌گونه که در نتایج آمده است، در پایین‌ترین سطح تنش محصورکننده، ظرفیت باربری ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل و ژئوگرید به ترتیب ۱/۱۸ و ۱/۳۱ برابر نمونه‌ی غیرمسلح است. با افزایش تنش محصورکننده، نسبت تنش انحرافی ستون مسلح به غیرمسلح برای ژئوتکستایل ۱/۱۵ برابر و برای ژئوگرید ۱/۱۱ برابر خواهد بود. هم‌چنین در بالاترین سطح تنش محصورکننده نیز افزایش ظرفیت باربری نسبت به حالت غیرمسلح برای ستون مسلح با ژئوگرید ۱/۱۲ برابر بوده است.

۵. نتیجه‌گیری

بر اساس یافته‌های این پژوهش که با استفاده از تعدادی آزمایش سه‌محوری بر روی ماسه در شرایط غیرمسلح و مسلح با ستون سنگی تسلیح‌شده با غلاف‌های ژئوتکستایل و ژئوگرید انجام شد، می‌توان بیان کرد که: وجود غلاف‌های ژئوستتیک یکی عامل بسیار مؤثر در افزایش ظرفیت باربری است. اما نکته‌ی قابل تأمل و اساسی این پژوهش آن است که در شرایطی که فشار محصورکنندگی کمتر باشد، این غلاف‌ها کارایی بهتری در مقایسه با شرایط غیرمسلح در افزایش ظرفیت باربری خاک‌های ماسه‌یی خواهند داشت. بدین معنی که در حالت تنش محصورکننده‌ی پایین نقش غلاف چشم‌گیرتر از حالت‌های با تنش محصورکنندگی بالا است. دیگر دستاورد این پژوهش آن است که در تنش‌های محصورکننده‌ی بالا، غلاف ژئوتکستایل راهگشا نخواهد بود. یک راه‌حل مناسب در چنین شرایطی، به کارگیری غلاف ژئوگرید مؤثر است. بررسی نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های سه‌محوری نشان می‌دهد که در پایین‌ترین سطح تنش محصورکننده، ظرفیت باربری ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل و ژئوگرید به ترتیب ۱/۱۸ و ۱/۳۱ برابر نمونه‌ی غیرمسلح است. با افزایش تنش محصورکننده، نسبت تنش انحرافی ستون مسلح به غیرمسلح برای ژئوتکستایل ۱/۱۵ برابر و برای ژئوگرید ۱/۱۱ برابر خواهد بود. هم‌چنین در بالاترین سطح تنش محصورکننده نیز افزایش ظرفیت باربری نسبت به حالت غیرمسلح برای ستون مسلح با ژئوگرید ۱/۱۲ برابر بوده است.

منابع (References)

1. Hajiazizi M. and Nasiri M., "Experimental studies on cohesion effect on stability of soil slopes reinforced

with stone column", *Modares Civil Engineering Journal (M. C. E. J.)*, **16**(5), pp. 65-78, (In Persian) (2016).

2. Moghaddas Tafreshi, S.N. and Ahmadian, A.F. "Experimental investigation of the behaviour of sand-EPS

- beads mixture reinforced by Geotextile layers encapsulated with lens layers”, *Sharif Journal of Civil Engineering*, **36.2**(1.1), pp.57-68 (In Persian) (2020).
3. Hajiazizi M. and Nasiri M., “Experimental and numerical study of earth slope reinforcement using ordinary and rigid stone columns.” *International Journal of Mining & Geo-Engineering*, **52**(1), pp .23-30 (2018).
 4. Tandel Y.K., Solanki C.H. and Desai, A.K. “Field behavior geotextile reinforced sand column”, *Geomechanics and Engineering*, **6**(2), pp. 195-211 (2014).
 5. Tavangar Y. and Shooshpasha, I. “Experimental and numerical study of bearing capacity and effect of specimen on uniform sand with medium density, reinforced with nonwoven geotextile”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, **41**, pp. 4127-4137 (2016).
 6. Hong Y.S., Wu C.S. and Yu Y.S. “Model tests on geotextile-encased granular columns under 1-g and undrained conditions”, *Geotextiles and Geomembranes*, **44**(1), pp. 13-27 (2016).
 7. Keyghobadi, M.H. Asakereh, A. Kalantari, B. and et al. “Experimental investigation of ring footing on reinforced soil with granulated rubber and geogrid under repeated loading”, *Sharif Journal of Civil Engineering*, **35**(2), 43-53 (In Persian) (2020).
 8. Lai H.J., Zheng J.J., Zhang J. and et al. “DEM analysis of “soil”-arching within geogrid-reinforced and unreinforced pile-supported embankments”, *Computers and Geotechnics*, **61**, 13-23 (2014).
 9. Zhang C., Jiang G., Liu X. and et al. “Arching in geogrid-reinforced pile-supported embankments over silty clay of medium compressibility: Field data and analytical solution”, *Computers and Geotechnics*, **77**, pp. 11-25 (2016).
 10. Mahdi, M., Katebi, H., Moradi, Gh. and et al. “The effects of soil reinforcement with geogrid and grid-anchor systems on uplift capacity of buried pipelines”, *Sharif Journal of Civil Engineering*, **35**(2), pp. 43-53 (In Persian) (2019).
 11. Zhang L. and Zhao, M. “Deformation analysis of geotextile-encased stone columns”, *International Journal of Geomechanics*, **15**(3), pp. 1-10 (2015).
 12. Miranda M. and Da Costa A., “Laboratory analysis of encased stone columns”, *Geotextiles and Geomembranes*, **44**, pp. 269-277 (2016).
 13. Miranda M., Da Costa, A., Castro J. and et al. “Influence of geotextile encasement on the behaviour of stone columns: Laboratory study”, *Geotextiles and Geomembranes*, **45**, pp. 14-22 (2017).
 14. Hajiazizi M. and Nasiri M., “Experimental and numerical investigation on stability of sandy slope reinforced by using geotextile reinforced stone column”, *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, **32**(1), pp. 55-72 (In Persian) (2019).
 15. Nasiri M. and Hajiazizi, M., “Earth slopes reinforced by stone column and geotextile”, *Geotechnical Engineering Journal*, (Article in Press) (2019).
 16. Nasiri M. and Hajiazizi, M. “An experimental and numerical investigation of reinforced slope using geotextile encased stone column”, *International Journal of Geotechnical Engineering*, **15**(5), pp.543-552 (2021).
 17. Gu, M., Zhao M., Zhang L., and et al. “Effects of geogrid encasement on lateral and vertical deformations of stone columns in model tests”, *Geosynthetics International*, **23**(2), pp. 100-112, (2016).
 18. Gu, M., Han, J. and Zhao, M., “Three-dimensional DEM analysis of single geogrid-encased stone columns under unconfined compression: a parametric study”, *Acta Geotechnica*, **12**(3), pp. 559-572 (2017).
 19. Fattah, M.Y., Zabar, B.S. and Hassan, H.A., “Experimental Analysis of Embankment on Ordinary and Encased Stone Columns”, *International Journal of Geomechanics*, **16**(4), pp. 1-13 (2016).
 20. Hajiazizi, M. and Nasiri, M. “3D numerical investigation of slope stability using geogrid reinforced stone column”, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, **52**(3), pp.1-19 (In Persian) (2020).
 21. Hajiazizi, M. and Nasiri, M. “Experimental and numerical investigation of reinforced sand slope using geogrid encased stone column”, *Civil Engineering Infrastructures Journal*, **52**(1), pp. 85-100 (2019).
 22. Shamsi, M. and Moghaddas Tafreshi, S.N. “Experimental and numerical investigations on the behavior of stone column reinforced by geotextile encasement and geotextile layers”, *Sharif Journal of Civil Engineering*, **34**(2), pp. 111-122 (In Persian) (2018).
 23. PLAXIS Software version 8, Tutorial Manual.