

بهبودی خاک ماسه‌ای سست با بالشتک دانه‌ای و ستون سنگی در سلول واحد

علی شاهمندی^۱، کاظم برخوردار^۲، محمود قضاوی*^۳، محمود هاشمی^۴

^۱ دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

^۳ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

^۴ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه اصفهان

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۵، بازنگری: ۱۴۰۲/۱/۶، پذیرش: ۱۴۰۲/۱/۲۰، نشر آنلاین: ۱۴۰۲/۱/۲۰

چکیده

در این تحقیق تأثیر بالشتک دانه‌ای مسلح با ژئوگرید (Geogrid)، ستون سنگی و ترکیب این روش‌ها بر رفتار نمونه‌های خاک ماسه‌ای سست در سلول واحد با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این‌که تا کنون در مطالعات تجربی به گسیختگی مسلح‌کننده در بالشتک دانه‌ای مسلح پرداخته نشده، روشی نوین جهت نصب ژئوگرید در سلول واحد به کار رفته تا امکان گسیختگی مسلح‌کننده تحت تنش‌های وارده محقق گردد. طی مطالعات پارامتریک مدل‌های فیزیکی، تأثیر تغییر آرایش مسلح‌کننده ژئوگرید شامل تعداد و محل قرارگیری آن در بالشتک با ضخامت‌های متغیر مطالعه شده و بهترین محل قرارگیری ژئوگرید تک‌لایه و دولایه در ضخامت بالشتک گردید. از دیگر اهداف مورد بررسی، آشکارسازی مکانیسم گسیختگی لایه‌های ژئوگرید و اثر آن بر ویژگی‌های بارپذیری و نشست نمونه‌های بهسازی شده با ستون سنگی و بدون ستون بوده است. در مقایسه با بستر ماسه‌ای غیرمسلح، افزایش ۷/۹ و ۱۱/۳۸ برابری نسبت باربری در شرایط استفاده از بالشتک دانه‌ای مسلح با یک و دو لایه ژئوگرید (در آرایش بهینه) واقع بر بستر بهسازی شده با ستون سنگی مشاهده شده است. در ادامه، از طریق شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار المان محدود PLAXIS 2D V 8.6، ضخامت بهینه بالشتک مسلح، ۰/۱۶ برابر قطر پی تعیین گردیده است. مقایسه آرایش‌های تسلیح بالشتک نشان می‌دهد هرچه ژئوگرید به زیر پی نزدیک‌تر باشد نقش مؤثرتری در افزایش بارپذیری و کاهش نشست خواهد داشت.

کلیدواژه‌ها: بالشتک دانه‌ای، خاک ماسه‌ای سست، مسلح‌کننده ژئوگرید، ستون سنگی، سلول واحد.

۱- مقدمه

Alkhorshid و همکاران، ۲۰۲۱؛ Ehsani Yamchi و Ghazavi، ۲۰۲۱؛ Akosah و همکاران، ۲۰۲۲؛ Gu و همکاران، ۲۰۲۲؛ Kang و همکاران، ۲۰۲۳) یا کاهش تمرکز تنش در بالای ستون از طریق اجرای بالشتک دانه‌ای مسلح روی خاک سست و ستون سنگی (Ramadan و همکاران، ۲۰۲۲) مورد توجه قرار گرفته است. در ادامه مطالعات Deb و همکاران (۲۰۰۸)، مدل‌هایی با به-کارگیری چند لایه مسلح‌کننده در بالشتک مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تسلیح چند لایه‌ای بالشتک با ژئوسنتتیک در مقایسه با یک لایه تأثیر کمتری در کاهش نشست داشته است، چرا که کاهش قابل توجهی از نشست کل به دلیل وجود ستون سنگی بوده است. پس از آن Deb و همکاران

در میان تکنیک‌های بهسازی زمین، ستون‌های سنگی یکی از رایج‌ترین و ساده‌ترین روش‌ها محسوب می‌گردند. اجرای ستون سنگی در بهبود شرایط مهندسی خاک‌هایی چون رس‌های نرم، سیلت و ماسه‌های سیلتی نتایج قابل قبولی داشته است. فشار محصورکننده محیطی ایجاد شده توسط خاک اطراف ممکن است در خاک‌های بسیار نرم برای تحمل بار کافی نباشد. در نتیجه ستون سنگی دچار انبساط جانبی شده و خاک اطراف را به صورت شعاعی مورد فشار قرار داده و راندمان آن کاهش می‌یابد. از این رو به-کارگیری انواع ژئوسنتتیک‌ها^۱ به منظور تسلیح ستون سنگی و تأمین فشار محدودکننده در اطراف آن (Hataf و همکاران، ۲۰۲۰؛

1. Geosynthetics

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۲۱-۸۸۸۸۲۹۹۱

نادرست منتهی شود (Liu و همکاران، ۲۰۰۷؛ Zandieh و Abdi، ۲۰۱۴).

در حالی که اگر امکان تغییر شکل پلاستیک و گسیختگی ژئوسنتتیک تحت شرایط بارگذاری وجود داشته باشد، تعریف واقع گرایانه این مصالح به صورت الاستوپلاستیک است. این موضوع اهمیت توجه به جزئیات ساخت یک مدل فیزیکی منطبق بر مطالعات عددی که در آن‌ها رفتار الاستوپلاستیک برای ژئوسنتتیک مفروض بوده (Debnath و Dey، ۲۰۱۷؛ Ghazavi و Ehsaniyamchi، ۲۰۱۹) و ژئوگرید بر اساس بارهای وارده، امکان بروز رفتار مبتنی بر واقعیت را داشته باشد نشان می‌دهد. از آنجایی که مکانیسم گسیختگی پی‌های تقویت شده با ژئوسنتتیک ورقه‌ای هنوز به خوبی بررسی و درک نشده است، از این رو برای تحلیل بهتر مکانیسم‌های خرابی، بررسی پارگی لایه‌های تقویت‌کننده ژئوسنتتیک در حین بارگذاری متصور می‌شود.

در پژوهش حاضر ستون سنگی منفرد اتکایی، بالشتک دانه‌ای غیرمسلح و مسلح با ژئوگرید و ترکیب این روش‌ها در سلول واحد جهت بهسازی بستر سست ماسه‌ای رس‌دار مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه بر این روشی جدید به منظور نصب مسلح‌کننده بالشتک دانه‌ای در سلول واحد به کار رفته تا امکان گسیختگی المان تسلیح تحت تنش‌های وارده فراهم شود. با توجه به مکانیسم واقعی رفتار مسلح‌کننده در شرایط آزمایشگاهی، انتخاب مصالح الاستوپلاستیک برای ژئوگرید در تحلیل‌های عددی، گزینه مناسبی با توجه به مقایسه به دست آمده است. تمرکز مطالعات این پژوهش در راستای تعیین ضخامت بهینه بالشتک و مسلح، مناسب‌ترین آرایش تسلیح شامل تعداد و محل قرارگیری ژئوگرید در بالشتک در حالت‌های مختلف بهسازی و مسلح‌سازی مدل‌های عددی بوده است. از دیگر اهداف مطالعه حاضر، آشکارسازی مکانیسم گسیختگی ژئوگرید و تعیین تأثیر گسیختگی لایه‌های ژئوگرید بر ویژگی‌های بارپذیری و نشست نمونه‌ها بوده است.

۲- مدل‌سازی آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

۲-۱-۱- خاک‌ها

خاک‌های با منحنی دانه‌بندی واقع در سمت راست ناحیه هاشورخورده انتقالی (Transition Zone) در شکل (۱) به راحتی با تکنیک تراکم ارتعاشی بهسازی می‌شوند (Barksdale و Bachus، ۱۹۸۳). اگر منحنی دانه‌بندی خاک ماسه‌ای در ناحیه انتقالی و قبل از آن قرار گیرد ساخت ستون با مصالح سنگی به منظور بهسازی زمین ارجح است (Bachus و Barksdale، ۱۹۸۳).

در سال ۲۰۱۱، بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست بستر رسی بهسازی شده با ستون سنگی منفرد و بالشتک ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح به ژئوگرید را در شرایط آزمایشگاهی و در یک مخزن مکعبی بررسی نمودند. آن‌ها ضخامت بهینه بالشتک غیرمسلح و مسلح و قطر بهینه ژئوگرید قرار داده شده در پایین لایه بالشتک را تخمین زدند.

مدل‌سازی بالشتک ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح با ژئوگرید واقع بر گروه ستون سنگی شناور دورپیچ با ژئوتکستایل^۲ در خاک رس نرم در شرایط آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS 6.12 توسط Dey و Debnath (۲۰۱۷) انجام گرفته است. مقدار افزایش ظرفیت باربری، ضخامت بهینه بالشتک غیرمسلح و مسلح، قطر بهینه ژئوگرید قرار گرفته در پایین بالشتک و کاهش قابل توجه شکم‌دادگی و افزایش عمق آن در حالت استفاده از بالشتک مسلح و ستون سنگی دورپیچ از نتایج مورد اشاره است.

در پژوهش Mehrannia و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر ستون سنگی شناور، بالشتک دانه‌ای و ترکیب هر دو روش در حالت‌های غیرمسلح و مسلح بر بهبود باربری نمونه‌های آزمایشگاهی در مخزن مکعبی مورد مطالعه قرار گرفت. استفاده از ژئوگرید در وسط ضخامت بالشتک دانه‌ای به عنوان مسلح‌کننده و ژئوتکستایل دورپیچ به عنوان مسلح‌کننده ستون سنگی به طور قابل توجهی میزان کارایی آن‌ها را افزایش داده است.

اکثر مطالعات تجربی ستون‌های سنگی روی بستر رسی اشباع انجام شده است. همچنین مطالعه آزمایشگاهی روی ستون سنگی دارای بالشتک ماسه‌ای در سلول واحد از جمله موضوعاتی است که کمتر به آن پرداخته شده و نکته قابل توجه این که در هیچ‌یک از پژوهش‌های انجام شده تا کنون مسلح‌سازی بالشتک دانه‌ای با المان تسلیح صفحه‌ای در سلول واحد انجام نگرفته است. همچنین در تحقیقات کمی افزایش باربری بستر در شرایطی که بالشتک ماسه‌ای با ژئوسنتتیک صفحه‌ای مسلح گردیده، گزارش شده است (Edil و Abdullah، ۲۰۰۷؛ Deb و همکاران، ۲۰۱۱؛ Debnath و Dey، ۲۰۱۷).

در تحقیقات آزمایشگاهی قبلی، ستون سنگی منفرد به همراه بالشتک مسلح در مخازن مکعبی مدل‌سازی شده که علاوه بر در نظر نگرفتن مفهوم وجود ستون در گروه، مسلح‌کننده با قطرهای بزرگتر از ستون به عنوان ابعاد بهینه و با انتهای آزاد در ضخامت بالشتک به کار رفته است. علاوه بر این قرارگیری ژئوگرید در موقعیت نزدیک به بالای بالشتک مورد بررسی محققین نبوده است. در بسیاری از مدل‌سازی‌های عددی، صفحه ژئوسنتتیک به صورت مصالح الاستیک خطی تعریف شده است که می‌تواند به پاسخ‌های

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مصالح ماسه‌ای و سنگ‌دانه‌ای مورد استفاده در تست‌های آزمایشگاهی در جدول (۱) آورده شده است. از آنجایی که اطمینان از قطر یکنواخت ستون سنگی ساخته شده در تراکم بالاتر از ۵۰٪ بسیار دشوار است (Ali و همکاران، ۲۰۱۲) تراکم نسبی برای این مصالح ۵۰٪ در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مشخصات مصالح ماسه‌ای و سنگ‌دانه‌ای

مشخصه	ماسه بستر	ماسه بالشتک	ستون سنگی
چگالی ویژه	۲/۶۷	۲/۶۶	۲/۶۵
حداقل وزن مخصوص خشک (kN/m ³)	۱۴/۶۷	۱۳/۹۶	۱۴/۰۳
حداکثر وزن مخصوص خشک (kN/m ³)	۱۸/۷۱	۱۷/۳۶	۱۷/۲۱
حداکثر نسبت تخلخل (e _{max})	۰/۸۱	۰/۹۰۵	۰/۹۰۳
حداقل نسبت تخلخل (e _{min})	۰/۴۲	۰/۵۳	۰/۵۵
وزن مخصوص (kN/m ³)	۱۵/۵۱ (D _r =25%)	۱۶/۱۸ (D _r =70%)	۱۵/۴۶ (D _r =50%)
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳۲ (D _r =25%)	۳۵ (D _r =70%)	۴۱ (D _r =50%)
ضریب یکنواختی	۳۴/۸	۱/۴۸	۱/۴۳
ضریب انحنای	۱۵	۰/۹	۰/۹۱
طبقه‌بندی بر اساس سیستم متحد	SM	SP	GP

۲-۱-۲- آلمان تسلیح ژئوگرید

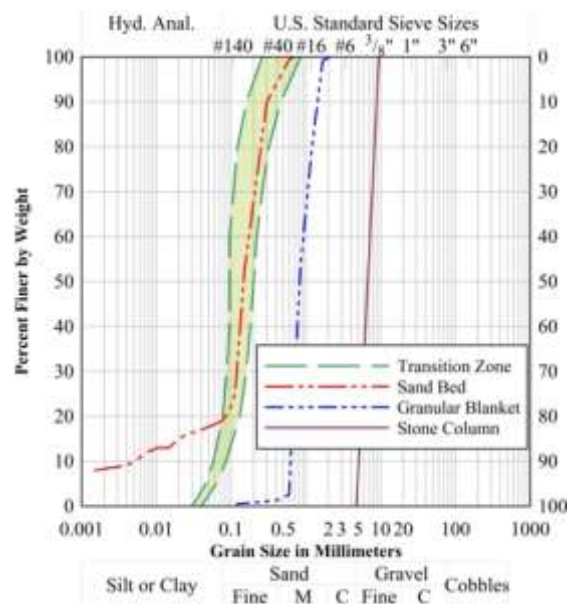
در پژوهش‌های مربوط به بهسازی بستر زیر فونداسیون، کارایی ژئوگرید بهتر از ژئوتکتایل نشان داده است (Guido و همکاران، ۱۹۸۶؛ Abu-Farsakh و همکاران، ۲۰۱۳) از این‌رو مسلح‌کننده‌ای از جنس توری فایبرگلاس با مشخصات مندرج در جدول (۲) جهت تسلیح بالشتک در تست‌ها به کار رفته و تعیین پارامترهای مقاومتی آن در آزمایشگاه و بر اساس استاندارد ASTM D۶۶۳۷ (۲۰۱۵) انجام شده است.

جدول ۲- خصوصیات مسلح‌کننده مورد استفاده در آزمایش‌ها

جنس	فایبرگلاس
مقاومت کششی (kN/m)	۸
کرنش گسیختگی (%)	۳/۱۷
سختی در کشش نهایی (kN/m)	۲۵۰
ابعاد چشمه‌ها (mm)	۵×۵
جرم در واحد سطح (gr/m ²)	۷۵

از آنجایی که هدف مسلح‌سازی خاک ماسه‌ای ریزدانه به کمک ستون سنگی است باید منحنی دانه‌بندی خاک مورد بهسازی از شروع ناحیه انتقالی در شکل (۱) به سمت چپ باشد. بر این اساس از ترکیب ماسه صحرا با رده‌بندی SP و خاک رس (CL)، خاک جدیدی به دست آمده تا منحنی دانه‌بندی آن در محدوده مناسب جایگزینی ارتعاشی قرار گیرد. رده‌بندی خاک ترکیبی از حدود ۸۰٪ ماسه صحرا و ۲۰٪ خاک رس، در سیستم متحد، SM تعیین گردیده است. منحنی‌های دانه‌بندی مصالح مورد استفاده به عنوان بستر ماسه‌ای سست، بالشتک دانه‌ای و ستون سنگی در شکل زیر ارائه شده است.

اندازه سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در ساخت ستون سنگی منطبق با پیشنهاد Nayak (۱۹۸۳)؛ Fattah و همکاران (۲۰۱۱)، باید ۱/۷ تا ۱/۶ قطر ستون سنگی باشد. بر اساس کارهای انجام شده توسط Fox (۲۰۱۱)؛ Stoeber (۲۰۱۲)؛ Mohapatra و همکاران (۲۰۱۶)، مقدار ۱/۶ برای این نسبت کافی دانسته شده است. طبق استاندارد ASTM ۲۸۵۰-۰۳ (۲۰۰۳) نسبت قطر نمونه در آزمایش سه‌محوری به حداکثر اندازه سنگ‌دانه ۶ ذکر شده است. در این راستا سنگ‌دانه‌های عبوری از الک شماره ۳/۸ اینچ و مانده روی الک شماره ۴ با ابعاد ۴/۷۵ تا ۹/۵ میلی‌متر در ساخت ستون سنگی مورد استفاده بوده که نسبت بزرگ‌ترین به کوچک‌ترین اندازه دانه این مصالح برابر با ۲ است. ماسه فیروزکوه که غالب اندازه دانه‌های آن در بازه ۰/۶ تا ۱/۷ میلی‌متر قرار دارد به عنوان مصالح دانه‌ای بالشتک با نسبت بزرگ‌ترین به کوچک‌ترین اندازه دانه برابر با ۲/۸ استفاده شده است. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مصالح ماسه‌ای و سنگ‌دانه‌ای مورد استفاده در تست‌های آزمایشگاهی در جدول (۱) آورده شده است.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی مصالح ماسه‌ای و سنگ‌دانه‌ای

همچنین برای اطمینان از عمود ماندن لوله پی‌وی‌سی مورد استفاده در ساخت ستون سنگی، شیاری هم قطر و هم ضخامت لوله در ورق فولادی کف سلول تعبیه شده تا در جایگذاری اولیه، ته لوله در آن قرار گیرد. ضمن این‌که شبکه‌ای نگهدارنده مطابق شکل (۲-ب) که روی سر سلول قرار داده شده بالای لوله را مهار نموده است. در راستای کاهش اصطکاک جداره داخلی سلول واحد با مصالح، سطح آن با رنگ کوره‌ای الکترواستاتیک پوشانده شده است. با توجه به سختی نامحدود شعاعی در تئوری سلول واحد، به‌منظور افزایش مقاومت جداره‌های سلول در برابر فشارهای جانبی داخلی و جلوگیری از هر گونه تغییر شکل شعاعی، بدنه خارجی توسط دو عدد بست حلقوی فولادی مهار شده است.

۲-۲-۲- تجهیزات بارگذاری

اعمال فشار یکنواخت بر سطح نمونه‌ها در سلول واحد با کرنش یکسان به کمک یک دستگاه جک هیدرولیکی با ظرفیت اسمی ۱۰ تن و لودسل‌های (بارسنج) متصل به آن با ظرفیت‌های ۵ و ۱۰ تن، از طریق یک صفحه فولادی دایره‌ای به قطر ۲۰۰ و ضخامت ۲۰ میلی‌متر انجام شده است.

صفحه بارگذاری (پی) با قطر ۸ میلی‌متر کمتر از قطر داخلی سلول واحد ساخته شده است. همچنین رول فوم برای تأمین سه هدف زیر پیرامون آن چسبانده شده است:

- جلوگیری از ایجاد اصطکاک و خطا در آزمایش ناشی از تماس پی با بدنه سلول واحد
- هدایت پی در مرکز سلول واحد به موازات دیواره‌های سلول
- جلوگیری از فرار دانه‌های خاک به ویژه بالشتک دانه‌ای از اطراف پی

بار مورد نظر در آزمایش‌ها به‌صورت کرنش کنترل بر نمونه‌ها وارد شده و در کلیه تست‌ها، نرخ اعمال کرنش برابر با ۱mm/min (Murugesan و Rajagopal، ۲۰۱۰؛ Ali و همکاران، ۲۰۱۴؛ Hasan و Samadhiya، ۲۰۱۶؛ Hong و همکاران، ۲۰۱۶؛ Mehrannia و همکاران، ۲۰۱۸؛ Ghazavi و همکاران، ۲۰۱۸) تنظیم گردیده است. این نرخ کرنش با توجه به جنس مصالح و خشک بودن آن‌ها و انجام تست‌های آزمایشی به‌منظور کنترل تراکم تدریجی ماسه در کل ارتفاع سلول انتخاب شده است. برای اطمینان از اعمال فشار به‌طور یکسان بر کل سطح نمونه، تماس لودسل با پی مطابق شکل (۳) مفصلی طراحی شده است. جهت ثبت تغییر مکان‌های پی از دو LVDT (تغییر مکان‌سنج) با کورس جابه‌جایی ۱۰۰ میلی‌متر و دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده گردیده است. همان‌گونه که در شکل (۳-الف) مشاهده می‌گردد دو LVDT به‌صورت قطری در نزدیکی لبه‌های پی نصب شده‌اند.

Bouazza و Gniel (۲۰۰۹) نیز در تحقیقات آزمایشگاهی خود جهت مدل‌سازی ستون سنگی محصورشده با ژئوگرید از توری فایبرگلاس و توری آلومینیوم استفاده کردند. مقایسه قطر متوسط دانه‌های ماسه بالشتک و اندازه چشمه‌های توری فایبرگلاس نشان می‌دهد. ضمن رعایت اثر مقیاس، ضابطه بزرگتر بودن حداقل ۳/۵ برابری چشمه مسلح‌کننده نسبت به D50 مصالح بالشتک تأمین شده است که یکی از شروط تناسب اندازه چشمه‌های ژئوگرید با مصالح دانه‌ای مجاور آن در بهسازی شالوده است (Koerner، ۲۰۰۵).

۲-۲- تجهیزات مورد استفاده

۲-۲-۱- سلول واحد

ناحیه تأثیر استوانه‌ای معادل یک ستون منفرد در یک گروه، سلول واحد نامیده می‌شود (Barksdale و Bachus، ۱۹۸۳). در آزمایش‌های مطالعه حاضر، ایده‌آل‌سازی یک ستون سنگی از گروه بزرگی از آن‌ها با الگوی مثلی در سلول واحد و ساخت مدل‌های فیزیکی بزرگ‌مقیاس در محفظه استوانه‌ای فولادی مطابق شکل (۲) به قطر داخلی ۲۰۸ میلی‌متر، ضخامت ۶ میلی‌متر و ارتفاع اولیه ۵۲۵ میلی‌متر انجام شده است.

ارتفاع سلول واحد به‌صورت مدولار با استفاده از رینگ‌های تعبیه شده هر یک به ارتفاع ۱۵ میلی‌متر از جنس خود سلول تا ۶۷۵ میلی‌متر قابل افزایش بوده است. بدین ترتیب می‌توان ضمن ساخت بالشتک‌هایی با ضخامت متغیر، در حالت‌های وجود توری فایبرگلاس مسلح‌کننده بالشتک، آن را به‌نحو مناسبی در فاصله بین رینگ‌ها به کمک چسب و نیز فشار حاصل از بسته شدن مهره‌های نگهدارنده مهار نمود (شکل (۲-الف)).



شکل ۲- سلول واحد: الف) رینگ‌های مدولار سر سلول و بست‌های حلقوی، ب) نگهدارنده لوله و نصب المان تسلیح



شکل ۳- الف) اتصال مفصلی لود سل به پی و نصب LVDT،
ب) نمایش جک و قاب بارگذاری

علت عدم استفاده از میله فولادی به دلیل خرد شدن دانه‌های سنگی بر اثر اعمال ضربه است. برای سهولت خروج لوله پی‌وی‌سی و کنترل بهتر دانسیته بستر ماسه‌ای، متناسب با اجرای هر لایه بستر و ستون سنگی در هر مرحله، لوله پی‌وی‌سی نیز به آرامی هر ۵۰ میلی‌متر بیرون کشیده شده به‌صورتی که همواره ته لوله به‌میزان ۵۰ میلی‌متر در ماسه بستر مدفون مانده باشد. بالا کشیدن لوله در هر مرحله از ریختن ماسه و سنگ‌دانه به‌کمک قرار دادن تراز بنایی در قسمت بالایی لوله به‌منظور کنترل عمود ماندن لوله انجام شده است.

بدین ترتیب ستون سنگی با قطر ۷۵ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۷ در مرکز سلول واحد و در میانه خاک بستر ماسه‌ای شبیه‌سازی شده است. از آنجایی که ماسه ریزدانه در حالت خشک در آزمایش‌ها استفاده شده، در نمونه‌های شامل ستون سنگی هنگام خارج نمودن تدریجی لوله پی‌وی‌سی به‌دلیل فقدان چسبندگی و ریزشی بودن بستر ماسه‌ای نفوذ دانه‌های آن به‌داخل مصالح ستون رخ می‌دهد. از این‌رو به‌منظور جلوگیری از حرکت و نفوذ ماسه به درون مصالح درشت‌دانه ستون، پیرامون ستون سنگی با نایلون بسیار نازک و دارای سختی کششی بسیار ناچیز پوشانده شده است. ساخت بالشتک به ضخامت‌های ۳۵ و ۶۵ میلی‌متر با ماسه متوسط خود متراکم با ریختن مصالح از ارتفاع در لایه‌های ۱۵ تا ۲۰ میلی‌متری انجام گرفته است. جهت اتصال توری مسلح کننده به لبه رینگ‌های سلول واحد از چسب قطره‌ای فوری استفاده شده و علاوه بر آن فشار تماسی رینگ‌های بالایی و پایینی ناشی از سفت کردن مهره‌های نگهدارنده، به مهار کامل ژئوگرید کمک کرده است. این روش نصب و مهارسازی ژئوگرید یکی از تفاوت‌های پژوهش حاضر با فعالیت‌های تحقیقاتی سایرین است.

در شکل (۴) تصاویر نمونه‌های آماده‌سازی شده در سلول واحد جهت انجام آزمایش نشان داده شده است. جهت ساخت کلیه نمونه‌های شامل بالشتک مسلح در آزمایشگاه در ابتدا بخشی به

پیش از شروع آزمایش‌ها، ابزار مورد استفاده همچون لودسل و LVDT، کنترل و ضرایب اصلاح مربوط به آن‌ها در نرم‌افزار متصل به دیتالاگر تدقیق گردیده‌اند. با توجه به خطی بودن رابطه مقاومت و جابه‌جایی، کالیبره کردن LVDT با اعمال چند مرحله تغییرمکان و ثبت نتایج و در نهایت تعیین ضریب کالیبراسیون انجام شده است. به‌منظور تعیین ضریب کالیبراسیون لودسل، در حین متصل بودن آن به دیتالاگر، لودسل در زیر فک‌های دستگاه CBR (نسبت باربری کالیفرنیا) قرار داده شده و با اعمال نیرو و قرائت مقدار آن از دستگاه CBR، ضریب اصلاح لودسل به‌دست آمده است.

۲-۳- ساخت مدل‌های فیزیکی

در کلیه تست‌ها، از روشی مشابه و یکسان برای آماده‌سازی ماسه بستر، ساخت ستون سنگی و بالشتک دانه‌ای استفاده گردیده است. با توجه به وزن مخصوص و حجم مورد نظر برای هر سه دسته مصالح، مقدار مشخصی از آن در هر مرحله در سلول واحد ریخته شده است. قبل از ریخته مرحله‌ای مصالح درون سلول، سطح داخلی آن با ترکیب روغن و گریس آغشته شده تا اصطکاک بین جداره آن و مصالح به حداقل برسد.

در پژوهش حاضر به‌منظور رسیدن به بستری یکنواخت از مصالح ماسه‌ای سست، از ترکیب قیف، الک شماره ۳۰ و لوله پی‌وی‌سی به قطر ۳ سانتی‌متر و طول ۷۰ سانتی‌متر استفاده شده است. در این روش، ابتدا ماسه روی الک ریخته شده و پس از آن با عبور از قیف زیر الک و جریان یافتن در امتداد قائم لوله پی‌وی‌سی، از فاصله حدود ۵ سانتی‌متری از کف مخزن (یا سطح قبلی خاک تسطیح شده) درون سلول واحد قرار گرفته است. روش مورد استفاده همانند به‌کارگیری لوله ترمی در بتن‌ریزی مقاطع بتنی همچون شمع یا ستون امکان جداسازی دانه‌های خاک را به حداقل رسانده است. نحوه ریختن مصالح در هر مرحله در ضخامت‌های ۵ سانتی‌متری در امتداد محیط دایره و از مرکز به سمت خارج بوده است. در پایان هر مرحله تسطیح سطح ماسه ریخته شده به آرامی انجام گرفته است. انتخاب قطر و طول لوله پی‌وی‌سی و فاصله رهاسازی مصالح بر پایه آزمون و خطا و دانستن دانسیته موردنظر انجام شده است. ریختن وزن مشخصی از خاک به‌طور یکنواخت در داخل محفظه آزمایش در قالب حجم مشخص در لایه‌های ۵ سانتی‌متری، همگن بودن بستر ماسه‌ای و کنترل دانسیته هر لایه را میسر نموده است. جهت ساخت ستون سنگی، همانند ماسه بستر ارتفاع ستون به قسمت‌های مساوی ۵۰ میلی‌متری تقسیم شده و در هر مرحله وزن مشخص از مصالح سنگ‌دانه‌ای خود متراکم داخل لوله پی‌وی‌سی ریخته شده است. جهت کنترل دانسیته مورد نظر، در هر مرحله با متر عمق پر شده لوله اندازه‌گیری گردیده و در صورت نیاز به تراکم، با کوبه چوبی کوبش سبک انجام گردیده است.

بستر ضعیف با ستون سنگی و بالشتک روی سر آن (Deb و همکاران، ۲۰۱۱، Debnath و Dey، ۲۰۱۷، Hamidi و Lajevardi، ۲۰۱۸ و Mehrannia و همکاران، ۲۰۱۸) با آنچه در این تحقیق مدنظر قرار گرفته است می‌توان تمایزهایی را بیان نمود. در مطالعات حاضر جنس خاک بستر ماسه ریزدانه انتخاب شده است. شکل مخزن از مکعبی با ابعاد بزرگ به سلول واحد بزرگ مقیاس آزمایشگاهی تغییر یافته است و قاعدتاً در چنین شرایطی به دلیل نیاز به حجم خاک کمتر تعداد آزمایش بیشتری در زمان یکسان قابل انجام خواهد شد. قطر ستون سنگی تا ۷۵ میلی‌متر افزایش پیدا کرده و تعداد لایه ژئوگرید در بالشتک تا دو لایه افزایش یافت. با توجه به برنامه کلی تدوین شده جهت آزمایش‌ها، تست‌های انجام گرفته با ذکر نام اختصاری در جدول (۳) آورده شده‌اند. در این جدول نمادهای به کار رفته شامل SB^۳ بستر ماسه‌ای سست، RB^۴ بالشتک مسلح، SC^۵ ستون سنگی، b^۶ مسلح‌کننده در پایین لایه ژئوگرید، m^۷ مسلح‌کننده در وسط لایه ژئوگرید و t^۸ مسلح‌کننده در بالای لایه ژئوگرید می‌باشد.

تکرارپذیری نتایج از مسائل مهم در حصول اطمینان از صحت نتایج در مطالعات آزمایشگاهی است که در این پژوهش نیز برای وثوق نتایج تعدادی از تست‌ها تکرار شده‌اند. در این رابطه خطاها در محدوده مجاز می‌تواند ناشی از ایراد در توزین مصالح و عدم یکنواختی کامل ذرات مصالح در ساخت بستر، ستون سنگی یا بالشتک باشد.



شکل ۴- الف) بستر ماسه‌ای آماده تست، ب) بستر ماسه‌ای و بالشتک دانه‌ای فوقانی، ج) بستر ماسه‌ای دارای ستون سنگی

ضخامت ۵ میلی‌متر از مصالح دانه‌ای بین ماسه بستر و ژئوگرید ریخته شده است (Han و Gabr، ۲۰۰۲).

لازم به توضیح است در بالشتک‌های دارای دولایه ژئوگرید، فاصله بین مسلح‌کننده‌ها ۳۰ میلی‌متر بوده است. در نمونه‌هایی که ژئوگرید در نزدیکی بالای بالشتک قرار گرفته، ۵ میلی‌متر مصالح دانه‌ای بالشتک روی مسلح‌کننده ریخته شده است.

۲-۴- اثر مقیاس در مطالعات تجربی و برنامه آزمایش‌ها

یکی از عوامل ایجاد خطا در مدل‌های فیزیکی اثر مقیاس بوده و بر این اساس نسبت تشابه برای بیان تحلیل ابعادی تعریف شده است. نسبت تشابه، نسبت هر اندازه طولی نمونه واقعی به اندازه معادل آن در مدل فیزیکی است (Debnath و Dey، ۲۰۱۷). متغیرهای بدون بعد در مدل و واقعیت باید مساوی باشند، با استفاده از این قاعده می‌توان تعیین کرد مقادیر متغیرهای مختلف در مدل چه نسبتی با واقعیت دارند (فاخر، ۱۳۹۳).

بر اساس نظریه تشابه Buckingham (۱۹۱۴)، نسبت مقیاس طول مدل به نمونه واقعی $1/8$ بوده که در این پژوهش برابر با $1/10$ انتخاب شده است. بر پایه قوانین مقیاس (Jai، ۱۹۸۹)، نسبت سختی مسلح‌کننده در مقیاس واقعی (J_p) به مقیاس مدل آزمایشگاهی (J_m) را می‌توان به صورت $J_p = J_m^2$ محاسبه کرد (Nazari Afshar و Ghazavi، ۲۰۱۳) که در خصوص مقاومت کششی نیز همین نسبت برقرار است.

از آنجایی که در سازه‌های خاکی مسلح‌کننده‌هایی با مقاومت کششی بیش از 400 kN/m تا 1200 kN/m مورد استفاده بوده‌اند (Naue، ۲۰۲۱). لذا با در نظر گرفتن حد میانه این مقاومت و رعایت قوانین تشابه، مسلح‌کننده‌ای با مقاومت کششی 8 kN/m جهت مدل‌های فیزیکی مورد استفاده قرار گرفته است.

از مقایسه جنس خاک بستر، پارامترهای هندسی محفظه آزمایش (شکل و ابعاد)، قطر ستون سنگی، آرایش تسلیج و روش نصب آن با تحقیقات آزمایشگاهی شاخص در زمینه مسلح‌سازی

جدول ۳- تست‌های آزمایشگاهی انجام شده با ذکر نام اختصاری

شماره تست	شرح آزمایش	نام اختصاری آزمایش
۱	بستر ماسه‌ای (بدون ستون سنگی و بدون بالشتک)	SB
۲	بستر ماسه‌ای با یک لایه ژئوگرید در پایین یا بالای بالشتک به ضخامت ۳۵ میلی‌متر	SB+1bRB35/SB+1tRB35
۳	بستر ماسه‌ای با دو لایه ژئوگرید در پایین و وسط یا وسط و بالای بالشتک به ضخامت ۶۵ میلی‌متر	SB+2b&mRB65/SB+2m&tRB65
۴	بستر ماسه‌ای با ستون سنگی اتکایی	SB+SC
۵	بستر ماسه‌ای با ستون سنگی و یک لایه ژئوگرید در پایین یا بالای بالشتک به ضخامت ۳۵ میلی‌متر	SB+SC+1bRB35/SB+SC+1tRB35
۶	بستر ماسه‌ای با ستون سنگی و دولایه ژئوگرید در پایین و وسط یا وسط و بالای بالشتک به ضخامت ۶۵ میلی‌متر	SB+SC+2b&mRB65/SB+SC+2m&tRB65

6. Bottom
7. Middle
8. Top

3. Sand Bed
4. Reinforced Blanket
5. Stone Column

۳- نتایج آزمایشگاهی

۳-۱- تأثیر بالشتک دانه‌ای مسلح و ستون سنگی

در این بخش نتایج آزمون‌های بارگذاری نمونه‌های ساخته شده در سلول واحد تا رسیدن به نشست ۲۰ میلی‌متر (Deb و همکاران، ۲۰۱۱؛ Deb Nath و Dey، ۲۰۱۷) ارائه گردیده است. این میزان نشست طی آزمایشات اولیه با هدف امکان بسیج کامل مقاومت کششی مسلح‌کننده در نمونه‌های دارای بالشتک مسلح، گسیختگی آن و ثبت تغییرات بار- نشست پس از گسیختگی و حفظ شرایط ایمن انجام آزمایش تعیین گردیده است. میزان نشست گزارش شده متوسط قرائت دو LVDT نصب شده در دو لبه روبروی پی است.

مطابق این نمودارها، رفتار بار- تغییر شکل کلیه نمونه‌های مورد آزمایش در سلول واحد به گونه‌ای است که طی اعمال فشار روی کل سطح نمونه و عدم امکان تغییر شکل جانبی خاک، هم- زمان با افزایش بار، خاک ماسه‌ای متراکم شده و به تدریج بر سختی آن افزوده گردیده و شرایطی همچون بارگذاری هیدرواستاتیک بر رفتار نمونه حاکم شده است. در نتیجه با افزایش بار وارده و نشست، بر میزان باربری نمونه‌ها افزوده شده و رفتار سخت‌شونده (Hardening) مشاهده شده است. مدل سلول واحد بارگذاری شده با یک صفحه صلب می‌تواند با آزمون تحکیم یک بعدی مقایسه گردد. در این آزمون به دلیل این‌که بارگذاری در راستای خط مسیر تنش K_0 است، گسیختگی روی نمی‌دهد (Barksdale و Bachus، ۱۹۸۳).

بررسی رفتار معمول حجمی یک نمونه خاک خشک یا اشباع زهکشی شده، تحت فشار همه جانبه نشان می‌دهد خاک‌ها تحت بارگذاری هیدرواستاتیک رفتار غیرخطی سخت‌شونده دارند (Chen و Saleeb، ۱۹۹۴). علاوه بر این انتخاب مدل رفتاری سخت‌شونده در مطالعات عددی ستون سنگی در سلول واحد توسط محققین بسیاری مورد استفاده بوده است (Elshazly و همکاران، ۲۰۰۸؛ Sexton و همکاران، ۲۰۱۳؛ Ng و Tan، ۲۰۱۴؛ McCabe و Killeen، ۲۰۱۶؛ Ehsaniyamchi و Ghazavi، ۲۰۱۹؛ Imam و همکاران، ۲۰۲۱).

در آزمایش‌های این بخش، بالشتک دانه‌ای با ضخامت ۳۵ و ۶۵ میلی‌متر به ترتیب با یک و دولایه ژئوگرید مسلح شده است. مسلح‌سازی با ژئوگرید تک‌لایه در پایین یا بالای بالشتک ۳۵ میلی‌متری و در بالشتک با ضخامت ۶۵ میلی‌متر ساخت نمونه با استفاده از دولایه ژئوگرید در موقعیت‌های پایین و وسط یا وسط و بالای بالشتک انجام شده است. در پژوهش‌های Deb و همکاران (۲۰۰۷)؛ Deb و همکاران (۲۰۰۸)؛ Deb Nath و Dey (۲۰۱۷)، یک لایه ژئوگرید در پایین بالشتک استفاده شده است.

Mehranian و همکاران (۲۰۱۸) ژئوگرید تک و دو لایه را در

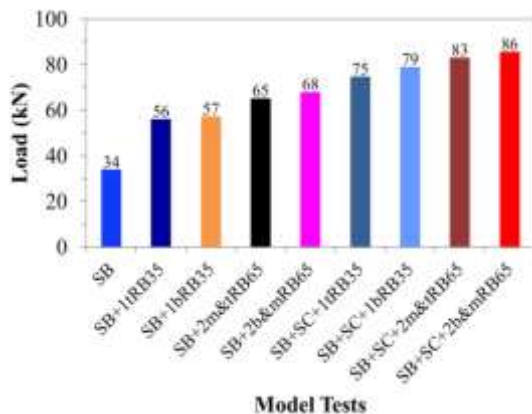
وسط ضخامت بالشتک استفاده کردند اما در خصوص آرایش دو لایه نسبت به یکدیگر توضیحی ارائه نمودند.

Hamidi و Lajevardi (۲۰۱۸) بالشتک دانه‌ای را با یک لایه ژئوگرید در پایین یا وسط مسلح کرده‌اند. در شکل (۵) نمونه‌ای از ژئوگرید گسیخته شده پس از تخلیه سلول از مصالح دانه‌ای بالشتک در انتهای آزمایش قابل مشاهده است. همان‌طور که دیده می‌شود ژئوگرید در سر تا سر محیط داخلی سلول واحد گسیخته شده که در کلیه تست‌های انجام شده مکانیسم گسیختگی مشابهی ملاحظه شده است.

منحنی‌های بار- نشست نمونه‌های بستر ماسه‌ای سست و بستر دارای بالشتک مسلح در شکل (۶) ارائه شده است. منحنی‌ها نشان می‌دهند در حالت مسلح‌سازی بالشتک با ژئوگرید، تأثیر قابل توجهی در افزایش میزان باربری و کاهش نشست نمونه‌ها رخ داده است. با شروع بارگذاری، افزایش شیب منحنی بار- نشست نمونه‌های مسلح تا حد مشخصی رخ داده، پس از طی محدوده‌ای از منحنی با شیب ثابت مجدداً شیب منحنی صعودی می‌شود. وجود ژئوگرید در بالشتک باعث افزایش شیب قابل توجه نمودارها، تغییر جهت تقعر منحنی در آستانه گسیختگی ژئوگرید و ایجاد یک برجستگی مشخص در روند بارپذیری نسبت به نمونه‌های بدون تسلیح شده است. با ادامه بارگذاری و پارگی کامل ژئوگرید و روند تدریجی تراکم ماسه، مجدداً نمودار به روند افزایشی خود باز می‌گردد. نمودارها نشان می‌دهند که در حالت استفاده از دو لایه ژئوگرید در بالشتک، تغییرات بار- نشست تا حدودی متفاوت است. افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده منجر به ظرفیت باربری و کاهش نشست بیشتر و دو مرحله تغییر شیب و تغییر جهت تقعر در نمودار بار- نشست شده است. تا کنون در مطالعات تسلیح زیر شالوده با مصالح ژئوسنتتیک صفحه‌ای (Gharehzaadeh Shirazi و همکاران، ۲۰۲۰؛ Hosamo و همکاران، ۲۰۲۱؛ Sarfarazi و همکاران، ۲۰۲۲) مواردی چون تغییر شیب و جهت تقعر منحنی- های بار- نشست کمتر گزارش شده است. این تغییرات به‌نحوه عملکرد مسلح‌کننده و گسیختگی آن مربوط می‌باشد. در مطالعات Chen و همکاران (۲۰۱۹)، گسیختگی لایه‌های تقویت کننده ورقه‌ای در زیر پی و تغییر در شکل منحنی بار- نشست مشاهده گردیده است.

بررسی‌ها مطابق شکل (۶) نشان می‌دهد گسیختگی ژئوگرید در نمونه‌هایی که بستر آن‌ها دارای ستون سنگی بوده نسبت به حالت بدون ستون، در تراز بار بالاتر و نشست کمتری رخ داده است که به‌وجود بستر سخت‌تر ناشی از وجود ستون سنگی مربوط است. نمونه‌های دارای بالشتک مسلح صرف‌نظر از وجود یا عدم وجود ستون سنگی، رفتار بار- نشست مشابهی در محدوده گسیختگی ژئوگرید دارند. منحنی بالشتک مسلح به یک لایه

یعنی در این بین، خاک بستر و ماسه بالشتک اندکی بیشتر تحت فشار قرار گرفته و در نشست نهایی ۲۰ میلی‌متر مقدار باربری نسبتاً بالاتری داشته‌اند. مقایسه باربری نهایی نمونه‌ها در نشست ۲۰ میلی‌متر در نمودار هیستوگرامی شکل (۷) ارائه شده است. مطابق این شکل در حالت‌های استفاده از یک ردیف ژئوگرید در پایین یا دو لایه در وسط و پایین بالشتک تا حدود ۵٪ توان باربری بالاتری نسبت به حالت قرارگیری ژئوگرید تک‌لایه در بالا یا دو لایه در میانه و نزدیکی بالای بالشتک مشاهده شده است. همچنین با توجه به شکل (۷)، با استفاده از ستون سنگی، افزایش بار نهایی در نمونه‌های دارای یک ردیف ژئوگرید تا ۳۸٪ و در نمونه‌های دارای دو ردیف ژئوگرید تا ۲۸٪ رشد نسبت به نمونه‌های مشابه بدون ستون نشان داده است.



شکل ۷- میزان باربری نهایی نمونه‌ها در نشست ۲۰ میلی‌متر

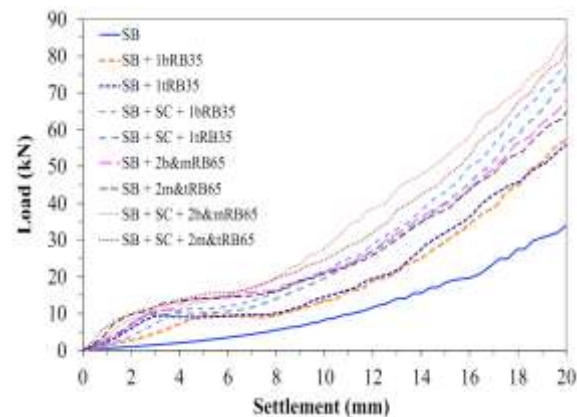
همان‌گونه که در قسمت مقدمه ذکر شد، Deb و همکاران در تحقیق سال ۲۰۰۸ خود مدل‌هایی را با به‌کارگیری چندلایه مسلح‌کننده در بالشتک مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نسبت به تسلیح یک لایه‌ای، تسلیح چند لایه‌ای بالشتک با ژئوسنتتیک تأثیر کمتری در کاهش نشست داشته چرا که کاهش قابل توجهی از نشست به‌وجود ستون سنگی مربوط بوده است. آن‌ها همچنین بیان کردند سیستم مسلح‌سازی چند لایه‌ای زمانی در کاهش نشست مؤثر است که از ستون سنگی استفاده نشود. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد در آستانه گسیختگی ژئوگرید، میزان تأثیر آن بر کاهش نشست، نسبی بوده و بستگی به موقعیت قرارگیری لایه‌های مسلح‌کننده دارد. در نمونه بستر ماسه‌ای به‌سازی شده با ستون سنگی، اگر از بالشتک به ضخامت ۶۵ میلی‌متر با دولایه ژئوگرید در پایین و وسط آن استفاده شود در مقایسه با بالشتک ۳۵ میلی‌متری مسلح به یک لایه ژئوگرید در بالا، میزان کاهش نشست ۴۰٪ افزایش می‌یابد، در حالی که اگر دو لایه ژئوگرید در میانه و بالای بالشتک قرار داده شوند کاهش نشست ۶۰٪ افزایش یافته است. این در شرایطی است که در مقایسه با بالشتک ۳۵ میلی‌متری با یک‌لایه ژئوگرید در

ژئوگرید در بالا نسبت به ژئوگرید در پایین از شیب تندتری برخوردار بوده و در میزان بار یکسان دارای نشست کمتری است. در شرایط استفاده از دولایه ژئوگرید در وسط و بالای بالشتک نسبت به قرارگیری ژئوگرید در پایین و وسط لایه نیز شرایط مشابهی قابل ملاحظه است. بر اساس نمودارهای شکل (۶)، تأثیر کلیه حالات به‌سازی شده در کاهش نشست، با رشد نمودار بار-نشست کمتر می‌شود زیرا از آنجایی که ماسه سست با افزایش بار در سطح سلول واحد رفتار سخت‌شونده دارد.

در نتیجه با افزایش نشست، بر تراکم و مقاومت آن افزوده شده است. از سوی دیگر در نمونه‌های دارای بالشتک مسلح، میزان کاهش نشست پس از گسیختگی المان تسلیح دارای افت قابل توجهی بوده است. مقایسه مقادیر کاهش نشست نشان می‌دهد در نمونه‌هایی که تک‌لایه ژئوگرید در نزدیکی بالای بالشتک بوده، افت در میزان کاهش نشست پس از گسیختگی ژئوگرید شدیدتر بوده است. از نمودارهای شکل (۶) می‌توان نتیجه گرفت با جابه‌جایی مسلح‌کننده ژئوگرید از نزدیکی بالای ضخامت بالشتک به پایین آن، گسیختگی ژئوگرید در میزان نشست بیشتری رخ داده است.



شکل ۵- نمونه گسیخته شده مسلح‌کننده ژئوگرید پس از آزمایش بارگذاری در سلول واحد



شکل ۶- تغییرات بار-نشست نمونه‌های بستر ماسه‌ای دارای بالشتک مسلح و ستون سنگی

کاهش میزان فشار بر ماسه بستر در مقایسه با حالت عدم وجود ستون یا بالشتک و نزولی شدن نمودار پس از محدوده حداکثر را می‌توان به‌نحوه توزیع تنش در حالت بارگذاری صلب در سلول واحد و جذب سهم بیشتر آن توسط ستون و امکان جابه‌جایی نسبی سنگ‌دانه‌ها تحت فشار و نیز ماهیت رفتاری بالشتک دانه‌ای و جذب بخشی از تنش وارده بر سطح نمونه توسط آن دانست. بررسی منحنی‌های نسبت باربری- نسبت نشست نمونه‌هایی که در شکل (۸) دارای بالشتک مسلح بوده‌اند یک نقطه اوج کاملاً برجسته را نشان می‌دهد. این نقاط اوج برجسته در اثر بسیج مقاومت کششی ژئوگرید در بالشتک به‌وجود آمده و شیب تند نزولی پس از آن ناشی از گسیختگی ژئوگرید است.

در شکل (۸)، برای نمونه‌های دارای ژئوگرید در بالشتک، تا محدوده ۲/۵ درصد نسبت نشست، بسیج مقاومت کششی المان تسلیح رخ داده و در آستانه گسیختگی ژئوگرید، منحنی‌ها با شیب تند صعودی به نقطه LR_{max} می‌رسند. در ادامه با افزایش نشست از مقدار پارامتر LR_{max} کاسته شده است. این در حالی است که در مدل‌های دارای ستون سنگی و بالشتک ۳۵ میلی‌متری مسلح به یک لایه ژئوگرید در پایین یا بالای آن، در مقدار نشست ۴ میلی‌متر و ۲/۵ میلی‌متر، LR_{max} به ترتیب ۴/۷۷ و ۷/۹ برابر افزایش یافته است. این در حالی است که ۶۶٪ رشد بیشتر LR_{max} و ۳۸٪ کاهش بیشتر نشست، تأثیر جابه‌جا شدن موقعیت ژئوگرید از پایین به بالای بالشتک است.

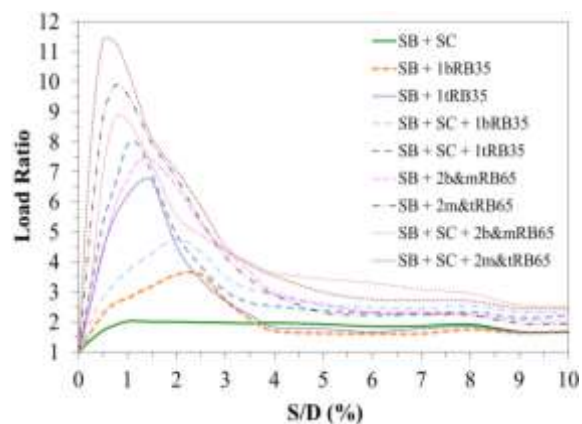
Mehrannia و همکاران (۲۰۱۸) حداکثر رشد ظرفیت باربری نمونه رسی با بالشتک ۷۵ میلی‌متری دارای یک‌لایه ژئوگرید در وسط و بستر دارای ستون سنگی شناور و بالشتک مشابه را در مقدار نشست ۵۰ میلی‌متر به ترتیب ۸۵٪ و ۹۲٪ بیان نمودند. حداکثر افزایش مقدار باربری بستر رسی بهسازی شده با ستون سنگی اتکایی و بالشتک با ضخامت بهینه ۳۰ میلی‌متر (۰/۳ برابر قطر پی) و دارای یک‌لایه ژئوگرید در پایین در مطالعه Deb و همکاران (۲۰۱۱) مقدار ۲۳۳٪ گزارش شده است. همچنین Debnath و Dey (۲۰۱۷) در تحقیقات خود به نسبت ۸/۴۵ برابر افزایش ظرفیت تحمل بار برای بستر رسی بهسازی شده با گروه ستون سنگی شناور دورپیچ با ژئوتکستایل و بالشتک با ضخامت بهینه ۳۰ میلی‌متر (۰/۱۵ برابر قطر پی) و مسلح به یک لایه ژئوگرید در پایین دست یافتند.

نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد قرارگیری ژئوگرید در نزدیکی بالای ضخامت بالشتک تأثیر به‌مراتب بیشتری در افزایش باربری و کاهش نشست داشته است و موقعیت بهینه قرارگیری المان تسلیح محسوب می‌گردد. می‌توان گفت به دلیل نشست صفحه بارگذاری تحت بار وارده، مصالح بالشتک و مسلح‌کننده در

پایین، میزان کاهش نشست با قرارگیری دولایه در پایین و وسط بالشتک ۶۵ میلی‌متری تا ۶۳٪ و با انتقال دولایه به میانه و بالای بالشتک تا ۷۵٪ افزایش نشان داده است. بنابراین تأثیر مسلح‌کننده ژئوگرید تک‌لایه و دولایه بر کاهش نشست، نسبی و وابسته به موقعیت قرارگیری آن است.

۳-۲- نسبت باربری بهبود یافته^۹

با تعریف پارامتری تحت عنوان نسبت باربری^۹، Ghazavi و Nazari Afshar (۲۰۱۳) از حاصل تقسیم مقدار باربری بستر ماسه‌ای بهسازی شده (با بالشتک، ستون سنگی یا ترکیبی از هر دو مورد) بر مقدار باربری بستر ماسه‌ای بدون بهسازی در میزان نشست برابر که به اختصار "LR" نامیده می‌شود و نیز تعریف پارامتر نسبت نشست که حاصل تقسیم نشست نسبت به سطح نمونه تحت بارگذاری به قطر پی است، می‌توان نمودارهای قبلی را در شرایط دیگری که محورهای آن پارامترهای بدون بعد باشند مطابق شکل (۸) ترسیم نمود.



شکل ۸- تغییرات نسبت باربری- نسبت نشست نمونه‌های بهسازی شده با بالشتک مسلح و ستون سنگی

شکل عمومی منحنی‌های مربوط به نمونه‌های بدون بالشتک مسلح پس از رسیدن به مقدار حداکثر پارامتر نسبت باربری (LR_{max}) یک روند نزولی نرم است. این محدوده حداکثر ناشی از وجود بالشتک و ستون سنگی است. نرخ تراکم‌پذیری ماسه ریزدانه بیشتر از مصالح درشت‌دانه‌تری است که در بالشتک و ستون سنگی مورد استفاده قرار گرفته است. بازه تغییرات وزن مخصوص خشک این مصالح مؤید این مطلب می‌باشد. ماسه ریزدانه سست، تحت تنش وارده رفتار تراکمی و سخت‌شونده دارد اما در حالت اضافه شدن بالشتک یا ستون سنگی حالت توزیع تنش اندکی تغییر یافته و نرخ رفتار سخت‌شوندگی ماسه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. علت

شوند میزان تأثیر ستون در افزایش تحمل بار و کاهش نشست بیشتر می‌گردد. اگر چه وجود لایه‌های ژئوگرید در نزدیکی بالای بالشتک منجر به تراز بالاتر باربری و نشست کمتری خواهند بود و می‌توان قرارگیری تک‌لایه در بالا و دولایه در وسط و بالای ضخامت بالشتک را موقعیت‌های بهینه تلقی نمود. بر این اساس حداکثر مقدار LR_{max} مربوط به نمونه شامل ستون سنگی و بالشتک مسلح با دولایه ژئوگرید در میانه و نزدیکی بالای بالشتک برابر با ۱۱/۳۸ حاصل شده است. میزان تأثیر ستون سنگی در افزایش LR_{max} و کاهش نشست در نمونه‌هایی که ژئوگرید در پایین بالشتک بوده بیشتر است. وقتی ژئوگرید در نزدیکی بالای بالشتک قرار می‌گیرد انحنای بیشتری در سطح ژئوگرید در زیر صفحه بارگذاری رخ می‌دهد که باعث بسیج رفتار غشایی و افزایش مشارکت مقاومت کششی آن می‌گردد. در این شرایط مؤلفه قائم مقاومت کششی ژئوگرید تا اندازه‌ای باعث تعادل بارهای فوقانی مسلح‌کننده می‌شود. در نتیجه تنش قائم در ناحیه زیر ژئوگرید به دلیل اثر توأم مقاومت کششی بسیج شده و رفتار غشایی المان تسلیح در انحنای کاهش می‌یابد (Basudhar و همکاران، ۲۰۰۸؛ Lee و همکاران، ۱۹۹۹؛ Burd، ۱۹۹۵؛ Deb و همکاران، ۲۰۱۱؛ Debnath و Dey، ۲۰۱۷). اما با انتقال ژئوگرید به پایین بالشتک میزان انحنای سطح ژئوگرید تحت بار وارده کاهش یافته و از مشارکت رفتار غشایی و بسیج مقاومت کششی آن کاسته شده (Shahu و همکاران، ۲۰۰۰) و این پدیده باعث کاهش اثربخشی لایه تسلیح و در نتیجه انتقال سهم بیشتری از بار به ستون سنگی و مشارکت بالاتر آن در افزایش بارپذیری و کاهش نشست می‌گردد.

۴- مدل‌سازی عددی

اگر بتوان از مدل‌سازی عددی نتایجی منطبق با یافته‌های تجربی به دست آورد ضمن صرفه‌جویی در وقت و هزینه، تعداد قابل توجهی از حالت‌های موردنظر دیگر به کمک روش عددی قابل تحلیل و ارزیابی خواهند بود. با عنایت به این که شبیه‌سازی سلول واحد در این پژوهش به صورت متقارن محوری (Axisymmetric) مدنظر بوده، انتخاب نرم‌افزار دوبعدی مناسب تشخیص داده شده است.

پس از تأیید اعتبار نرم‌افزار المان محدود PLAXIS 2D 8.6، طی شبیه‌سازی عددی کلیه مدل‌های فیزیکی بخش قبل، انطباق نتایج آزمایشگاهی و عددی سنجیده شده است. پارامترهای مدل سازی عددی برگرفته از نتایج آزمایشگاهی و مطابق جدول (۴) انتخاب گردیده است. با توجه به نوع رفتار مدل در سلول واحد آزمایشگاهی، مدل رفتاری سخت‌شونده در تحلیل‌های عددی برای مصالح خاکی و سنگ‌دانه‌ای در نظر گرفته شده است (Elshazly و همکاران، ۲۰۰۸؛ Sexton و همکاران، ۲۰۱۳؛ Ng و Tan،

ناحیه تقویت شده به طرف پایین حرکت می‌کنند. مسلح‌کننده زیر صفحه دچار انحنای شده و در اثر این انحنای نیرویی رو به بالا در مسلح‌کننده جهت مقابله با بار وارده بسیج می‌گردد که به سبب آن میزان باربری افزایش می‌یابد (Chen و Binquet، ۱۹۷۵؛ Lee و Abu-Farsakh، ۲۰۱۵).

این نیرو که از مکانیسم‌های اصلی مسلح‌سازی با ژئوسنتتیک-ها لایه‌ای افقی است به اثر غشایی موسوم است. از دیگر مکانیسم-های مسلح‌کننده ژئوسنتتیک اثر محصورشدگی جانبی است که به حرکت نسبی دانه‌های خاک در امتداد سطح مسلح‌کننده در زیر بار شالوده مربوط است و باعث بسیج نیروی اصطکاکی در سطح مشترک مسلح‌کننده و خاک می‌گردد. با توجه به نحوه نصب مسلح‌کننده و شرایط گیرداری لبه‌های آن در پژوهش حاضر می‌توان گفت صرفاً امکان جابه‌جایی نسبی ذرات خاک و مسلح‌کننده در شرایط ایجاد کرنش در ژئوگرید وجود داشته و به نظر می‌رسد در این نوع آزمایش‌ها، اثر کشش غشایی بر اثر محصورشدگی جانبی غالب باشد.

Han و Giroud (۲۰۰۴) بیان کردند که اثر کشش غشایی در تغییر شکل‌های زیاد اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. به نظر می‌رسد هرچه مسلح‌کننده در فاصله نزدیک‌تری به زیر صفحه بارگذاری باشد، تغییر شکل‌های مسلح‌کننده زیادتر شده و از این رو اثر کشش غشایی بیشتر می‌گردد.

مطالعات عددی Debnath و Dey (۲۰۱۷) که در نرم‌افزار سه‌بعدی ABAQUS 6.12 انجام شده است مؤید این مطلب است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بیشتر تغییر شکل‌ها و تنش‌های ژئوگرید مسلح‌کننده بالشتک عمدتاً بلافاصله در ناحیه زیر صفحه بارگذاری رخ داده و تغییر شکل‌های کوچکی دور از ناحیه بارگذاری شده ایجاد شده است.

بر اساس نتایج حاصل می‌توان بیان نمود در شرایط قرارگیری ژئوگرید در زیر صفحه بارگذاری بلافاصله پس از اعمال تنش بر سطح نمونه، ژئوگرید وارد عمل شده و تا حد گسیختگی تحمل بار می‌نماید. هرچه فاصله المان کششی از زیر بار بیشتر باشد در میزان نشست بیشتر نمونه، تحت کشش قرار گرفته تا در نهایت گسیخته شود. از طرفی میزان نشست بیشتر نمونه یعنی تراز بالاتر سخت-شوندگی بستر ماسه‌ای و از آنجایی که نسبت باربری، حاصل تقسیم میزان باربری نمونه بهسازی شده به نمونه بدون بهسازی در نشست یکسان است اگر ژئوگرید در نشست بیشتر بالشتک گسیخته شود پارامتر LR_{max} کمتری حاصل می‌گردد. دلیل برتری نسبی موقعیت ژئوگرید تک‌لایه در نمونه‌های بدون ستون و دارای ستون سنگی در نزدیکی بالای بالشتک به همین موضوع مربوط است.

همانند شرایط استفاده از یک لایه ژئوگرید، در حالتی که دو لایه ژئوگرید از زیر پی فاصله بگیرند و به ستون سنگی نزدیک

۲۰۱۴؛ McCabe و Killeen، ۲۰۱۶؛ Ghazavi و Ehsaniyamchi، ۲۰۱۹؛ Imam و همکاران، ۲۰۲۱).

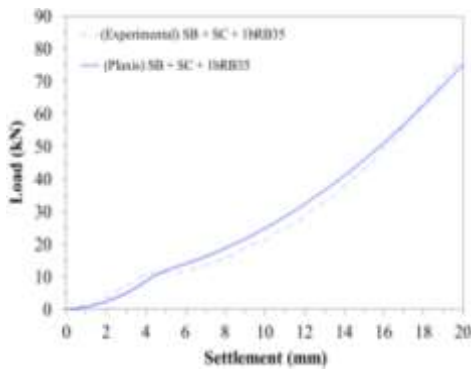
جدول ۴- مشخصات مصالح خاکی در تحلیل‌های عددی

مشخصه	ماسه بستر	ماسه بالشتک	ستون سنگی
وزن مخصوص (kN/m ³)	۱۵/۵۱	۱۶/۱۸	۱۵/۴۶
چسبندگی (kN/m ²)	۰/۲	۰/۲	۰/۲
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳۲	۳۵	۴۱
زاویه اتساع (درجه)	۲	۵	۱۱
مدول الاستیسیته (kN/m ²) E ₅₀	۱۹۰۰۰	۴۰۰۰۰	۹۳۰۰۰

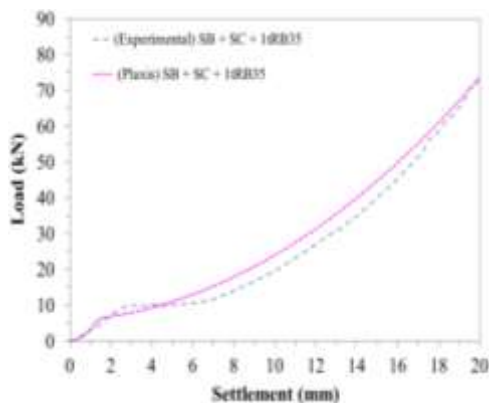
هندس و شرایط تکیه‌گاهی منطبق با شرایط مدل فیزیکی در نظر گرفته شده به طوری که در مرزهای چپ و راست تکیه‌گاه غلتکی و در پایین، گره‌ها گیردار تعریف شده‌اند و از المان‌های مثلثی ۱۵ گرهی استفاده شده است. رفتار الاستوپلاستیک (Dean و Mera، ۲۰۱۶؛ Debnath و Dey، ۲۰۱۷؛ Ehsaniyamchi و Ghazavi، ۲۰۱۹؛ Ramadan و همکاران، ۲۰۲۲) به واسطه امکان گسیختگی ژئوگرید، در مدل‌سازی عددی به کار رفته‌اند. المان ژئوگرید به صورت یک عضو مدفون در خاک و بدون نیاز به تعریف المان مشخص اندرکنش مدل شده است (Gouw، ۲۰۱۴).

محققینی چون Debnath و Dey (۲۰۱۷) نیز در تحلیل‌های عددی خود در نرم‌افزار ABAQUS 6.12، قفل‌شدگی کامل بین خاک و ژئوگرید را در نظر گرفته‌اند و بنابراین اندرکنش خاک با مسلح‌کننده توسط دو صفحه تماس کاملاً چسبیده شبیه‌سازی شده است. این حالت مدل‌سازی از لغزش در سطح مشترک خاک و ژئوگرید جلوگیری می‌نماید (Meguid و Hussein، ۲۰۱۶). جهت انطباق شرایط بارگذاری مدل عددی با حالت کرنش کنترل آزمایشگاهی از روش تغییر مکان مقید شده در نرم‌افزار استفاده شده است.

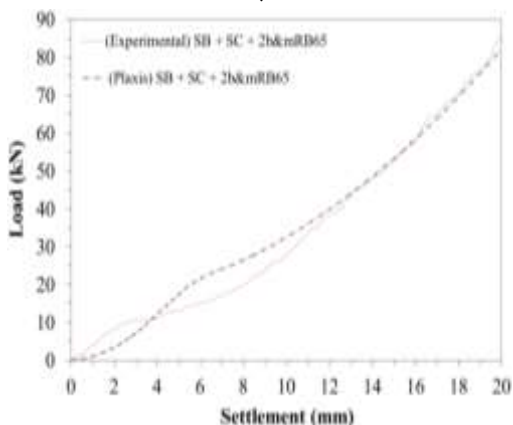
بخشی از مقایسه نتایج مدل‌های آزمایشگاهی و عددی نمونه-های بهسازی شده با ستون سنگی که در آن‌ها از ژئوگرید به عنوان مسلح‌کننده بالشتک دانه‌ای استفاده شده به صورت نمونه در شکل (۹) ارائه شده است. یکی از نکات قابل توجه در نتایج مدل‌های عددی، قسمت‌های برجسته و قابل تشخیص نمودار در محدوده گسیختگی ژئوگرید همانند نمودارهای به دست آمده از مدل‌های آزمایشگاهی است. به عنوان نمونه در هر دو دسته مدل‌های فیزیکی و عددی، در آستانه گسیختگی ژئوگرید، منحنی نمونه‌های دارای بالشتک با ژئوگرید در بالا در مقایسه با منحنی‌های دیگر، در میزان نشست کمتر ظرفیت باربری یکسانی نشان می‌دهند.



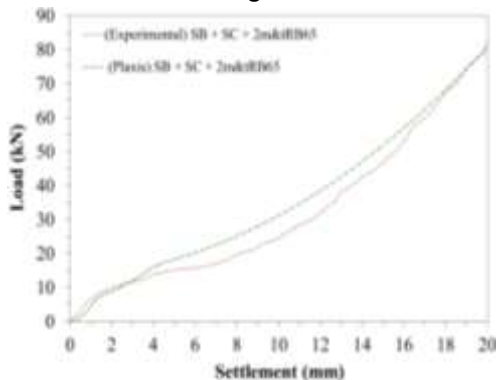
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۹- مقایسه تغییرات بار- نشست مدل‌های فیزیکی و عددی: (الف) ژئوگرید در پایین، (ب) ژئوگرید در بالا، (ج) ژئوگرید در پایین و وسط، (د) ژئوگرید در وسط و بالا

شده است. صرفاً در حالتی که ژئوگرید در نزدیکی بالای بالشتک قرار گرفته با افزایش نسبت ضخامت، اندکی بر میزان پارامتر LR_{max} افزوده شده است به طوری که در نسبت ضخامت ۰/۴۷۵ مقدار نسبت باربری ۸ حاصل شده که در مقایسه با مقدار ۷/۸ در نسبت ضخامت ۰/۱۶ رشد ۳٪ مقدار ناچیزی است. بنابراین می-توان مانند شرایط استفاده از بالشتک غیرمسلح، نسبت ضخامت بهینه را ۰/۱۶ برابر قطر پی تلقی نمود.

مطابق نمودارهای شکل (۱۰)، با اضافه شدن ستون سنگی به نمونه‌های دارای بالشتک با یک لایه مسلح‌کننده، بالاترین نسبت باربری همچنان مربوط به همان نسبت ضخامت بهینه ۰/۱۶ است. با توجه به مقادیر نسبت باربری می‌توان نتیجه گرفت بهسازی بستر فاقد ستون سنگی با استفاده از بالشتک مسلح، نرخ رشد بالاتر LR_{max} را نسبت به بستر بهسازی شده با ستون سنگی به-همراه داشته است.

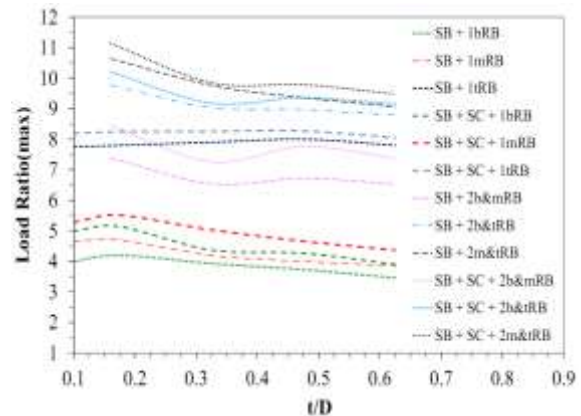
در مطالعه Deb و همکاران (۲۰۱۱) و در نتایج تحقیقات Debath و Dey (۲۰۱۷) نسبت ضخامت بهینه به ترتیب ۰/۳ و ۰/۱۵ در شرایط به کارگیری مسلح‌کننده ژئوگرید در پایین بالشتک واقع بر بستر بهسازی شده با ستون سنگی گزارش شده است.

از نکات قابل ذکر دیگر، LR_{max} بالاتر در نمونه بدون ستون سنگی و دارای یک ردیف ژئوگرید در نزدیکی بالای بالشتک نسبت به نمونه‌های مشابه دارای ستون سنگی و یک ردیف ژئوگرید در پایین یا وسط بالشتک در نسبت ضخامت بهینه می‌باشد. حداقل و حداکثر رشد پارامتر LR_{max} ناشی از اضافه شدن ستون نیز در نسبت ضخامت بهینه رخ داده است. حداکثر رشد LR_{max} مربوط به موقعیت ژئوگرید در پایین بالشتک بوده و حداقل رشد آن در موقعیت ژئوگرید در بالای بالشتک مشاهده شده است. این پدیده را می‌توان با میزان سختی بستر زیر ژئوگرید مرتبط دانست که در بخش مطالعات آزمایشگاهی به آن پرداخته شد. با مقایسه نمودارهای مربوط به استفاده از یک و دو لایه ژئوگرید در بالشتک به روشنی می‌توان ملاحظه نمود تأثیر یک لایه ژئوگرید در بالا بیشتر از دولایه در پایین و وسط بالشتک است. همچنین مقایسه نمودار نمونه شامل ژئوگرید در پایین و وسط بالشتک با نمودارهای دیگر نمونه‌های شامل دولایه ژئوگرید که یکی از آن‌ها در بالا قرار داشته تفاوت محسوسی را در نسبت باربری نشان می‌دهد. به طوری که با قرارگیری یکی از لایه‌های مسلح‌کننده در بالای ضخامت بالشتک مقادیر بالاتر LR_{max} حاصل شده است. با توجه به نمودارهای شکل (۱۱)، در حالت به کارگیری دو ردیف ژئوگرید نیز ضخامت بهینه بالشتک در حدود ۳۲ میلی‌متر بوده که می‌تواند برابر با نسبت ضخامت ۰/۱۶ در نظر گرفته شود.

همچنین شیب این منحنی‌ها در هر دو دسته مدل، از نمونه-های دیگر بیشتر است. بنابراین با توجه به انطباق قابل قبول نتایج عددی و آزمایشگاهی، جهت بررسی‌های تکمیلی از مدل‌سازی عددی استفاده شده است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

۴-۱- ضخامت بهینه بالشتک و آرایش بهینه مسلح‌کننده ژئوگرید در بالشتک

بررسی جهت تعیین ضخامت بهینه بالشتک مسلح و بهترین محل قرارگیری المان‌های مسلح‌کننده در بالشتک واقع بر بستر بدون ستون و دارای ستون سنگی در این بخش انجام شده است. منحنی‌های تغییرات LR با t/D برای نمونه‌های دارای بالشتک مسلح با ضخامت‌های مختلف واقع بر بستر ماسه‌ای بهسازی شده و نشده با ستون سنگی در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. بررسی‌ها با قرارگیری یک و دولایه ژئوگرید در موقعیت‌های متفاوت مسلح‌کننده در ضخامت بالشتک انجام شده است. پنج ضخامت متفاوت بالشتک مسلح شامل ۰/۱۷۵D، ۰/۳۲۵D، ۰/۴۷۵D و ۰/۶۲۵D به منظور تعیین مقدار بهینه آن مورد مطالعه قرار گرفته است. در شرایطی که از یک ردیف ژئوگرید در بالشتک واقع بر بستر فاقد ستون سنگی استفاده می‌شود بیشترین افزایش میزان پارامتر LR_{max} با قرارگیری مسلح-کننده به ترتیب در بالا، وسط و پایین ضخامت بالشتک، حاصل می‌گردد.



شکل ۱۰- تغییرات LR_{max} با نسبت ضخامت نمونه‌های دارای بالشتک مسلح واقع بر بستر ماسه‌ای با/بدون ستون سنگی

مقایسه موقعیت‌های مختلف ژئوگرید نشان می‌دهد اگر المان تسلیح در نزدیکی بالای ضخامت بالشتک و تقریباً زیر صفحه بارگذاری قرار داشته باشد، پارامتر LR_{max} اختلاف قابل توجهی با دو موقعیت دیگر ژئوگرید در وسط و پایین بالشتک خواهد داشت. به طور کلی می‌توان بیان نمود پس از نقطه حداکثر نمودار، با افزایش پارامتر نسبت ضخامت از میزان تأثیر بالشتک مسلح کاسته

۵- خلاصه و نتیجه گیری

در این تحقیق، با انجام تست‌های آزمایشگاهی بزرگ مقیاس و شبیه‌سازی در نرم‌افزار المان محدود PLAXIS 2D V 8.6، رفتار بار-نشست نمونه‌های بستر ماسه‌ای بهسازی شده با بالشتک دانه-ای و مسلح، ستون سنگی اتکایی و ترکیب بالشتک و ستون سنگی مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش از تئوری سلول واحد جهت مدل‌سازی رفتار ستون سنگی منفرد در گروه نامحدودی از ستون‌های سنگی استفاده شده است. ضخامت بالشتک از ۲۰ تا ۱۸۵ میلی‌متر، معادل ۰/۱ تا ۰/۹۲۵ برابر قطر پی متغیر بوده و ستون سنگی به قطر ۷۵ میلی‌متر و نسبت طول به قطر برابر با ۷ در نظر گرفته شده است. همچنین، روش نوینی جهت نصب و مهار ژئوگرید در مطالعات آزمایشگاهی به کار رفته تا امکان بسیج کامل مقاومت کششی و گسیختگی مسلح‌کننده فراهم شود و نقش این مکانیسم بر تغییرات میزان باربری و نشست مدل‌های فیزیکی تعیین گردیده است. لازم به ذکر است تا کنون در مطالعات بالشتک مسلح، مکانیسم گسیختگی مسلح‌کننده مورد بررسی نبوده است و لذا یافته‌های این پژوهش می‌تواند در کاربردهای عملی مورد توجه قرار گیرد. مهم‌ترین یافته‌های حاصل از تحقیق آزمایشگاهی حاضر به شرح زیر است:

- در حالت مسلح‌سازی بالشتک با ژئوگرید، تأثیر قابل توجهی در افزایش میزان باربری و کاهش نشست نمونه‌ها رخ داده است. مقایسه آرایش‌های مسلح‌سازی بالشتک نشان می‌دهد در شرایط به کارگیری یک لایه مسلح‌کننده ژئوگرید، قرارگیری آن در نزدیکی بالای بالشتک و در صورت استفاده از دو لایه ژئوگرید قرارگیری آن‌ها در میانه و نزدیکی بالای بالشتک بهترین چیدمان برای مسلح‌کننده محسوب می‌گردند. به عبارت دیگر قرارگیری مسلح‌کننده در نزدیک‌ترین فاصله به بار گزینه برتر است.

- گسیختگی ژئوگرید در نمونه‌هایی که بستر سخت‌تری به دلیل وجود ستون سنگی داشته‌اند، در تراز بار بالاتر و نشست کمتری رخ داده است. صرف‌نظر از تعداد لایه مسلح‌کننده، در نمونه‌هایی که دارای لایه ژئوگرید در پایین بالشتک بوده‌اند ستون سنگی تأثیر بیشتری در افزایش نسبت باربری حداکثر و کاهش نشست داشته است.

- با توجه به حداکثر درصد افزایش نسبت باربری در کلیه نمونه‌های شامل بالشتک مسلح با یک و دو لایه ژئوگرید، ضخامت بهینه بالشتک ۰/۱۶ برابر قطر پی حاصل شده است.

۶- مراجع

- <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2014.07.008>
Abdullah CH, Edil TB, "Behaviour of geogrid-reinforced load transfer platforms for embankment on rammed aggregate piers", *Geosynthetics International*, 2007, 14 (3), 141-153. <https://doi.org/10.1680/gein.2007.14.3.141>
- Abu-Farsakh M, Chen QM, Sharma R, "An experimental evaluation of the behavior of footings on geosynthetic-reinforced sand", *Soils and Foundations*, 2013, 53 (2), 335-348. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.01.001>
- Akosah S, Chen J, Bao N, "Reinforcement of problematic soils using geotextile encased stone/sand columns", *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15 (1371), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10561-0>
- Ali K, Shahu JT, Sharma KG, "Model tests on geosynthetic-reinforcement stone columns: a comparative study", *Geosynthetics International*, 2012, 19 (4), 292-305. <https://doi.org/10.1680/gein.12.00016>
- Ali K, Shahu JT, Sharma KG, "Model tests on single and groups of stone columns with different geosynthetic reinforcement arrangement", *Geosynthetics International*, 2014, 21 (2), 103-118. <https://doi.org/10.1680/gein.14.00002>
- Alkhorshid NR, Araujo GLS, Palmeira EM, "Consolidation of soft clay foundation improved by geosynthetic-reinforced granular columns: Numerical evaluation", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13 (5), 1173-1181. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.09.017>
- ASTM D2850-03, Standard test method for unconsolidated-undrained triaxial compression test, American Society for Testing and Materials; Pennsylvania, USA, 2003.
- ASTM D6637/D6637M-15, Standard test method for determining tensile properties of geogrids by the single or multi-rib tensile method, American Society for Testing and Materials; Pennsylvania, USA, 2015.
- Barksdale RD, Bachus C, "Design and construction of stone column volume I, Final Report", FHWA/RD-83/026; U.S. Department of Transportation/Federal Highway Administration, USA, 1983.
- Basudhar PK, Dixit PM, Ghaprure A, Deb K, "Finite element analysis of geotextile-reinforced sand-bed subjected to strip loading", *Geotextile and Geomembrane*, 2008, 26 (1), 91-99. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2007.04.002>
- Binquet J, Lee KL, "Bearing capacity tests on reinforced earth slabs", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1975, 101 (GT12), 1241-1255. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000219>
- Buckingham E, "On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations, Rev. 4, 345", *Physical Review Journals Archive*, 1914, 4 (4), 345-376. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.4.345>
- Burd HJ, "Analysis of membrane action in reinforced unpaved roads", *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 42 (5), 494-504.
- Abdi MR, Zandieh AR, "Experimental and numerical analysis of large scale pull out tests conducted on clays reinforced with geogrids encapsulated with coarse material", *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, 42 (5), 494-504.

- Ghazavi M, Ehsaniyamchi A, Nazari Afshar J, "Bearing capacity of horizontally layered geosynthetic reinforced stone columns", *Geotextiles and Geomembranes*, 2018, 46 (3), 312-318. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2018.01.002>
- Giroud JP, Han J, "Design method for geogrid-reinforced unpaved roads, Part I: theoretical development", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130 (8), 776-786. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:8\(775\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:8(775))
- Gniel J, Bouazza A, "Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns", *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27 (3), 167-175. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2008.11.001>
- Gouw TL, "Common mistakes on the application of plaxis 2D in analyzing excavation problems", *International Journal of Applied Engineering Research*, 2014, 9 (21), 8291-8311.
- Gu M, Mo H, Qiu J, Yuan J, Xia Q, "Behavior of floating stone columns reinforced with geogrid encasement in model tests", *Frontiers in Materials*, 2022, 9, 1-10. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.980851>
- Guido VA, Chang DK, Sweeney MA, "Comparison of geogrid and geotextile reinforced earth slabs", *Canadian Geotechnical Journal*, 1986, 23 (4), 435-440. <https://doi.org/10.1139/t86-073>
- Hamidi M, Lajevardi SH, "Experimental study on the load-carrying capacity of single stone columns", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2018, 4 (26), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s40891-018-0142-x>
- Han J, Gabr MA, "Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platform over soft soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128 (1), 44-53. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:1\(44\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:1(44))
- Hasan M, Samadhiya NK, "Experimental and numerical analysis of geosynthetic-reinforced floating granular piles in soft clays", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2016, 2 (3), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s40891-016-0062-6>
- Hataf N, Nabipour N, Sadr A, "Experimental and numerical study on the bearing capacity of encased stone columns", *International Journal of Geo-Engineering*, 2020, 11 (4), 1-19. <https://doi.org/10.1186/s40703-020-00111-6>
- Hong YS, Wu CS, Yu YS, "Model tests on geotextile-encased granular columns under 1-g and undrained conditions", *Geotextiles and Geomembranes*, 2016, 44 (1), 13-27. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2015.06.006>
- Hosamo H, Sliteen I, Ding S, "Numerical analysis of bearing capacity of a ring footing on geogrid reinforced sand", *Buildings*, 2021, 11 (2), 1-12. <https://doi.org/10.3390/buildings11020068>
- Hussein MG, Meguid MA, "A three-dimensional finite element approach for modeling biaxial geogrid with application to geogrid-reinforced soils", *Geotextiles and Geomembranes*, 2016, 44 (3), 295-307. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2015.12.004>
- 1995, 32 (6), 946-956. <https://doi.org/10.1139/t95-094>
- Chen JF, Guo XP, Xue JF, Guo PH, "Load behavior of model strip footings on reinforced transparent soils", *Geosynthetic International*, 2019, 26 (3), 251-260. <https://doi.org/10.1680/jgein.19.00003>
- Chen QM Abu-Farsakh M, "Ultimate bearing capacity analysis of strip footings on reinforced soil foundation", *Soils and Foundations*, 2015, 55 (1), 74-85. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.12.006>
- Chen WF, Saleeb AF, "Constitutive Equations for Engineering Materials", Second Revised Edition, Elsevier Science B.V, New York, USA, 1994.
- Dean G, Mera R, "Determination of material properties and parameters required for the simulation of impact performance of plastics using finite element analysis", *National Physical Laboratory (NPL), Middlesex, UK*, p. 49. Report No. DEPC-MPR 007, 2004.
- Deb K, Chandra S, Basudhar PK, "Response of multi-layer geosynthetic-reinforced bed resting on soft soil with stone columns", *Computers and Geotechnics*, 2008, 35 (3), 323-330. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2007.08.004>
- Deb K, Samadhiya NK, Namdeo JB, "Laboratory model studies on unreinforced and geogrid-reinforced sand bed over stone column-improved soft clay", *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, 29 (2), 190-196. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2010.06.004>
- Debnath P, Dey AK, "Bearing capacity of geogrid-reinforced sand over encased stone columns in soft clay", *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, 45 (6), 653-664. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2017.08.006>
- Ehsaniyamchi A, Ghazavi M, "Short-term and long-term behavior of geosynthetic-reinforced stone columns", *Soils and Foundations*, 2019, 59 (5), 1579-1590. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.07.007>
- Ehsaniyamchi A, Ghazavi M, "Reinforcement of floating stone columns with spaced reinforcing rings", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2021, 174 (4), 273-287. <https://doi.org/10.1680/jgrim.19.00090>
- Elshazly HA, Hafez DH, Mossaad ME, "Reliability of Conventional Settlement Evaluation for Circular Foundations on Stone Columns", *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 2008, 26 (3), 323-334. <https://doi.org/10.1007/s10706-007-9169-9>
- Fakher A, "Research Methods in Geotechnics", Publication Institute of University of Tehran, Tehran, Iran, 2014.
- Fox ZP, "Critical state, dilatancy and particle breakage of mine waste rock", Ph.D. Dissertation, Colorado State University, Colorado, 2011.
- Gharehzadeh Shirazi M, Rashid ASA, Nazir R, Rashid AHA, Horpibulsuk S, "Enhancing the bearing capacity of rigid footing using limited life kenaf geotextile reinforcement", *Journal of Natural Fibers*, 2020, 19 (8), 2868-2884. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1830330>

- Sarfaraizi V, Tabaroei A, Asgari K, "Discrete element modeling of strip footing on geogrid-reinforced soil", *Geomechanics and Engineering*, 2022, 29 (4), 435-449.
<https://doi.org/10.12989/gae.2022.29.4.435>
- Sexton BG, McCabe BA, Castro J, "Appraising stone column settlement prediction methods using finite element analyses", *Acta Geotechnica*, 2013, 9, 993-1011. <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0260-5>
- Shahu JT, Madhav MR, Hayashi S, "Analysis of soft ground-granular pile-granular mat system", *Computers and Geotechnics*, 2000, 27 (1), 45-62. [https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(00\)00004-5](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(00)00004-5)
- Stoeber JN, "Effects of maximum particle size and sample scaling on the mechanical behavior of mine waste rock: A critical state approach", Ph.D. Dissertation, Colorado State University, Colorado, 2012.
- Iai S, "Similitude for shaking table tests on soil-structure fluid models in 1g gravitational field", *Soils and Foundations*, 1989m 29 (1), 105-118. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.29.105>
- Imam R, Zarei M, Ghafarian D, "Relative contribution of various deformation mechanisms in the settlement of floating stone column-supported foundations", *Computers and Geotechnics*, 2021, (134), 104109. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104109>
- Kang B, Wang J, Zhou Y, Huang Sh, "Study on bearing capacity and failure mode of multi-layer-encased geosynthetic-encased stone column under dynamic and static Loading", *Sustainability*, 2023, 15 (6), 1-18. <https://doi.org/10.3390/su15065205>
- Koerner RM, "Designing with Geosynthetics", 6th Edition, Volume 1, New Jersey, Prentice Hall, USA, 2005.
- Lee KM, Manjunath VR, Dewaikar DM, "Numerical and model studies of strip footing supported by a reinforced granular fill-soft soil system", *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36 (5), 793-806. <https://doi.org/10.1139/t99-053>
- Liu HL, Ng CWW, Fei K, "Performance of a geogrid-reinforced and pile supported highway embankment over soft clay: case study", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2007, 133 (12), 1483-1493. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:12\(1483\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:12(1483))
- McCabe BA, Killeen M, "Small stone column groups: mechanisms of deformation at serviceability limit state", *International Journal of Geomechanics*, ASCE, 2016, 17 (5), 1-14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000700](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000700)
- Mehrannia N, Kalantary F, Ganjian N, "Experimental study on soil improvement with stone columns and granular blankets", *Journal of Central South University*, 2018, 25 (4), 866-878. <https://doi.org/10.1007/s11771-018-3790-z>
- Mohapatra SR, Rajagopal K, Sharma J, "Direct shear tests on geosynthetic-encased granular columns", *Geotextiles and Geomembranes*, 2016, 44 (3), 396-405. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.01.002>
- Murugesan S, Rajagopal K, "Studies on the Behavior of Single and Group of Geosynthetic Encased Stone Columns", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2010, 136 (1), 129-139. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000187](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000187)
- NAUE GMBH & CO KG, "Naue Products Manual", Espelkamp, Germany, 2021.
- Nayak NV, "Recent advances in ground improvements by stone column", *Proceedings of Indian Geotechnical Conference, IGC-83, Madras, India, December, 1983.*
- Ramadan EH, Abdel-Naiem MA, Senoon AA, Megally AA, "Stone columns and reinforced sand bed for performance improvement of foundations on soft clay", *International Journal of Advances in Structural and Geotechnical Engineering*, 2022, 6 (3), 57-64. <https://doi.org/10.21608/ASGE.2022.274736>

EXTENDED ABSTRACT

Investigation of Loose Sandy Soil Improvement with Granular Blanket and Stone Column in a Unit Cell

Ali Shahmandi^a, Kazem Barkhordari^a, Mahmoud Ghazavi^{b,*}, Mohmoud Hashemi^c

^a Faculty of Civil Engineering, University of Yazd, Yazd 8915818411, Iran

^b Faculty of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran 1969764499, Iran

^c Faculty of Civil Engineering, University of Isfahan, Isfahan 8174673441, Iran

Received: 25 January 2023; **Review:** 26 March 2023, **Accepted:** 09 April 2023

Keywords:

Granular blanket, Geogrid reinforcement, Loose sand bed, Stone column, Unit cell.

1. Introduction

In this study, the effect of the unreinforced and geogrid-reinforced granular blankets, end-bearing stone columns and the combination of these techniques on the behaviour of loose sand soil models have been investigated through laboratory and numerical simulations. In the models, a stone column from a large group of them with a triangular pattern was simulated in a unit cell. Since the rupture of the geosynthetic reinforcement within the reinforced granular blanket has never been experimentally investigated, a novel method of installing the geogrid reinforcement was used, allowing it to mobilize and ultimately fail under loading. The optimal thickness of the unreinforced and geogrid-reinforced blanket, the optimum layout of the reinforcement within the blanket and the changes in the stress concentration ratio of the stone column in different modelling conditions have been determined. Another objective of the present study is to discover the relationship between the failure of the geogrid layers and the characteristics of load-carrying capacity and settlement of the model tests.

2. Methodology

2.1. Experimental study

In the experiments of the present study, a stone column from a large group of them with a triangular pattern was constructed in a cylindrical steel tank with 208mm inside diameter as a unit cell. A total of 10 test types have been conducted to compare the load-settlement characteristics of different modes of improving the loose sand bed. An identical procedure was utilized in all tests to prepare the sand bed and construct the stone column and the granular blanket. Based on the Buckingham similitude theory (1914), the ratio of the length scale of the model test to the prototype model is $1/\lambda$, which has been taken as $1/10$ in this study. A 75mm diameter end-bearing stone column with a length-to-diameter ratio equal to 7 was physically constructed in the centre of the unit cell. According to the laws of similarity, geogrid reinforcement with a tensile strength of 8kN/m has been used for laboratory model tests. The Blankets, with thicknesses of 35mm and 65mm, were reinforced with one and two layers of geogrid. The intended load was applied as displacement control with a 1mm/min strain rate in all tests. The loading on several model tests until reaching 20mm settlement, as reported in the literature (Deb et al., 2011; Debnath and Dey, 2017), have been performed.

* Corresponding Author

E-mail addresses: ali.shahmandi@stu.yazd.ac.ir (Ali Shahmandi), kbarkhordari@yazd.ac.ir (Kazem Barkhordari), ghazavi-ma@kntu.ac.ir (Mahmoud Ghazavi), m.hashemi@eng.ui.ac.ir (Mahmoud Hashemi).

2.2. FE modeling

The FEM-based software package, PLAXIS 2D V8.6, was used for the numerical modelling and complementary analysis. Since the unit cell simulation is considered axisymmetric, modelling with the 2D finite element software has been done. The input parameters for numerical modelling are taken from the laboratory results. The hardening behaviour mode has been used for sandy soil and aggregate materials. Numerical models' geometry and boundary conditions were chosen according to the physical model conditions. The side boundaries of the models were assigned as vertical rollers, while the fixed nodes were considered at the bottom of the model. In addition, 15-node triangular elements were used, and elastoplastic behaviour was used for the reinforcement due to the potential geogrid rupture. The prescribed displacement method has been used to adapt the numerical model's loading conditions to the laboratory model tests with equal strain mode.

3. Results and discussion

3.1. Effect of geogrid-reinforced blanket and stone column

Reinforcing the blanket with geogrid significantly boosted the load-carrying capacity and reduced the settlement of the model tests. Under conditions with a stone column, the geogrid rupture at a higher intensity of load and less settlement due to the stiffer bed caused by the presence of a stone column. In these charts, first, the slope of the load-settlement graphs increases until reaching a certain value; then, it becomes nearly constant within a range of the chart, after which the gradient rises again. Compared to the unreinforced model, the inclusion of geogrid in the blanket alters the charts' shape and slope. In addition, a noticeable prominence in load-settlement features and a change of direction of chart concavity at the threshold of geogrid rupture in the settlement ranging from 1-5 mm is observed. The shift in concavity direction and varying the slope from ascending to constant trend are related to the yielding of geogrid. During the load enhancement process, two stages of slope variation and concavity direction change are observed when two geogrid layers are used in the blanket. The first prominence is related to the failure of the first layer of geogrid reinforcement, followed by the failure of the second layer, which forms another prominence. There have been no reports of changes in the slope and direction of the concavity of the load-settlement characteristics in investigations of reinforced blankets with sheet geosynthetic reinforcement. All models with a layer of geogrid near the top of the blanket have load-settlement characteristics with steeper slopes and less settlement at the same load extent compared to the model with geogrid at the bottom. Similar findings have been observed while using two geogrid layers in the middle and near the top of the blanket, compared to placing the geogrid in the bottom and middle of the blanket.

The load ratio parameter (Ghazavi and Nazari Afshar, 2013) is derived by dividing the improved sand bed load-carrying capacity by the sand bed load-carrying capacity without improvement. This parameter, known as "LR", is related to the improved and unimproved models' load-carrying capacity in an equal settlement. In addition, the settlement ratio parameter, which is by dividing the model settlement by the diameter of the footing, can be defined. The load ratio-settlement ratio characteristics for the models with reinforced blankets reveal a prominent peak. These noticeable peaks are caused by the geogrid's tensile strength mobilization, followed by a sudden drop yielded by the geogrid's rupture. After the failure of the reinforcement layers, the resistance was only generated by sand and aggregate materials, which explains the sudden drop in LR variations. In the model tests with a reinforced blanket including two layers of geogrid, the LR increases with the settlement ratio, then drops suddenly after the prominent peak point. It indicates that all reinforcement layers ruptured within a relatively short period. Upon adding the stone column to the model with layer(s) of geogrid reinforcement, the growth of the load ratio increased further. Similar to using a single layer of geogrid, when two layers of the geogrid move away from the base of the footing while getting closer to the top of the stone column, the effect of the column in enhancing the load-bearing and reducing the settlement is intensified. Although, placing geogrid reinforcement layer(s) closer to the base of the footing is an optimum arrangement in the laboratory and numerical investigations. Generally, it can be said the maximum LR in all finite element models has been obtained at the optimal blanket thickness equal to 0.16 times the diameter of the footing.

3.2. Stress concentration ratio (SCR)

So far, fewer studies have been conducted about the effect of the blanket positioned over the stone column-improved bed on the stress concentration ratio. The SCR variations are due to changes in the axial stiffness of the stone column materials subjected to compressive loading (Debnath and Dey, 2017). The stiffness of aggregate materials in the range of low axial strain is the main reason for the high values of the stress concentration ratio. In conditions of thin unreinforced blanket thickness, after applying further pressure on the model and the possibility of displacement of the column's aggregates, its stiffness and load-carrying capacity

are reduced, resulting, in the SCR reduction. By increasing the thickness of the blanket from 0.2 to 0.5 times the footing diameter, the stress concentration ratio has increased maximum of about 16%. But after that, by further increasing the thickness ratio to about 0.8, an almost constant slope has obtained at the end of the SCR chart, as mentioned in other research (Murugesan and Rajagopal, 2006; Ghazavi and Afshar, 2013). It seems that the cause for the increase of SCR until it reaches the thickness ratio of 0.5 is related to the fact that in thinner blankets, the stress transfer to the stone column and the circumferential soil is almost the same as when there is no blanket. In this condition, because of the significant densifying potential of the sandy bed and, as a result, increasing the confining stress around the stone column relative increase in the load-carrying capacity happened. Increasing the thickness of the unreinforced blanket exceeding a specific limit leads to a decreasing the amount of stress transferred to the soil and the confining stress on the stone column. Finally, it causes the reduction of changes in the stress concentration ratio. In the high thickness ratio, i.e. more than 0.8, the stress is applied less and more uniformly on the soil and the top of the stone column. So, changes in the stress concentration ratio become to be almost constant.

It can be said that the value of SCR for the stone column-improved sand bed models, including different layouts of a single geogrid within the blanket, is not constant while the footing is settled. The minimum value of SCR corresponds to a model with a 20 mm thick blanket reinforced with a geogrid layer near the top of it. In the models with reinforced blankets, due to the considerable increases in the load-carrying capacity, the values of the stress concentration ratio have also increased. It is noted in the case of an optimum thickness ratio of 0.16 while the geogrid is placed near the top of the blanket, compared with other layouts of the geogrid, the amount of SCR was less.

4. Conclusions

It should be noted that the geogrid reinforcement rupture mechanism has not been investigated earlier in reinforced blanket studies; thus, the findings of this research can be applied in practice. The following are the most prominent conclusions from the current laboratory study:

- The results indicate that including geogrid reinforcement in the blanket significantly improves the load-carrying capacity and reduces the settlement of all model tests. The comparison of reinforcement layouts of the reinforced blanket with the geogrid indicates that when the geogrid is closer to the base of the footing, it will play a more effective role in enhancing the load-carrying capacity and decreasing the settlement. In models with stone columns causing stiffer beds, the geogrid reinforcement ruptured under more loading intensity and at less extent of settlement.
- According to the maximum percentage increase in the load ratio in all the models, including the model tests with an unreinforced blanket and the geogrid-reinforced blanket with single or two layers of geogrid, the optimal thickness of the blanket is estimated to be 0.16 times the diameter of the footing.

5. References

- Buckingham E, "On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations, Rev. 4, 345", Physical Review Journals Archive, 1914, 4 (4), 345-376. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.4.345>
- Deb K, Samadhiya NK, Namdeo JB, "Laboratory model studies on unreinforced and geogrid-reinforced sand bed over stone column-improved soft clay", Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29 (2), 190-196. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2010.06.004>
- Debnath P, Dey AK, "Bearing capacity of geogrid-reinforced sand over encased stone columns in soft clay", Geotextiles and Geomembranes, 2017, 45 (6), 653-664. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.08.006>