

مطالعه‌ی آزمایشگاهی رفتار بستر مسلح با ژئوسل لایه‌یی تحت بارگذاری سیکلی

پیام شریفی (کارشناس ارشد)

سید ناصر مقدس تفرشی* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران شریفی، زمستان ۱۳۹۳ (دوره‌ی ۲-۳، شماره‌ی ۱/۴، ص. ۷۵-۸۳)

در این نوشتار با انجام مطالعات آزمایشگاهی، رفتار بستر مسلح با یک و دو لایه‌ی ژئوسل تحت بارگذاری تکراری نظیر بار ترافیک وسائط نقلیه بررسی شده است. بارگذاری تکراری با اعمال بیش از ۲۰۰۰۰ سیکل تا رسیدن نشست به یک حالت پایدار یا بروز نشست‌های مفرط ادامه یافته است. نتایج نشان می‌دهد که نشست در سیکل‌های اول بارگذاری درصد قابل توجهی از نشست نهایی در انتهای بارگذاری را شامل می‌شود، که این امر مبین اثر سیکل‌های اولیه به عنوان یک ویژگی رفتاری مهم بستر تحت بارگذاری سیکلی است. ضخامت بهینه‌ی خاک بین دو لایه‌ی ژئوسل برای دستیابی به کمینه‌ی نشست حدود ۲۰٪ قطر صفحه‌ی بارگذاری^۱ است. همچنین با استفاده از دو لایه‌ی ژئوسل با فاصله‌ی بهینه از یکدیگر به جای استفاده از یک لایه‌ی ژئوسل (با میزان یکسان از ژئوتکستایل مصرفی در هر دو حالت)، می‌توان مقدار نشست در سطح خاک^۲ را به میزان قابل توجهی کاهش داد.

واژگان کلیدی: بستر مسلح، ژئوسل لایه‌یی، نشست صفحه‌ی بارگذاری، بارگذاری سیکلی.

۱. مقدمه

امروزه استفاده از ژئوسنتتیک‌ها جهت تسلیح خاک زیر پی‌ها، شیروانی‌ها، خاکریزها، دیوارهای حائل و بستر راه‌ها به نحو گسترده‌ی توسعه یافته و مورد توجه پژوهشگران مختلف قرار گرفته است.^[۱-۸] با گسترش استفاده از مواد پلیمری جهت تسلیح خاک، محصولات جدیدتری از خانواده‌ی ژئوسنتتیک‌ها به بازار عرضه شده است. ژئوسل یکی از این محصولات است، که استفاده از آن در پروژه‌های مختلف رو به افزایش است. مزیت قابل توجه ژئوسل در مقایسه با سایر ژئوسنتتیک‌ها نظیر ژئوتکستایل و ژئوگرید، علاوه بر مقاومت برشی بین خاک و مسلح‌کننده، مقاومت فعال خاک پشت دیواره‌های آن (به علت ماهیت سه‌بعدی) است که این امر نیز نقش بسزایی در افزایش مقاومت برشی خاک و کاهش تغییرمکان جانبی آن ایفا می‌کند.^[۹-۱۳] در مطالعه‌ی در سال ۲۰۰۱، رفتار یک پی نواری متکی بر بستر ماسه‌یی مسلح‌شده با ژئوسل گزارش شده است که صرف‌نظر از ارتفاع و عرض لایه‌ی ژئوسل^۲، ظرفیت باربری پی واقع بر بستر مسلح با ژئوسل نسبت به حالت غیرمسلح افزایش چشم‌گیری دارد. علاوه بر این، با افزایش ارتفاع ژئوسل و در نتیجه افزایش ناحیه‌ی مسلح زیر پی، مقدار فشار تحمل‌شده توسط پی مسلح، در یک نشست مشخص افزایش می‌یابد. در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۰، با بررسی آزمایشگاهی رفتاری پی نواری تحت ترکیب بار استاتیکی و سیکلی، در دو حالت بستر مسلح‌شده با ژئوتکستایل و ژئوسل بیان شد که برای رسیدن به یک میزان نشست معین میزان مصالح مصرفی در تسلیح

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۸/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۱/۱۲/۱، پذیرش: ۱۳۹۲/۲/۱۷.

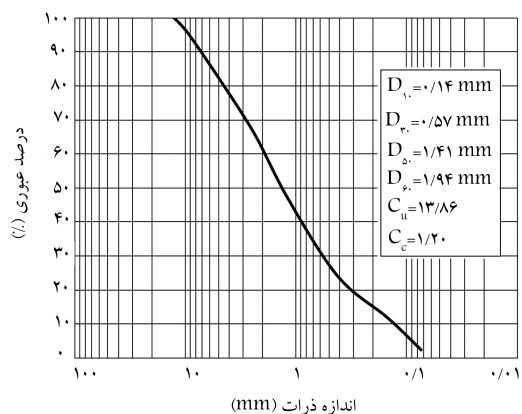
sharifipayam.civil@gmail.com
nas_moghaddas@kntu.ac.ir

با ژئوسل در مقایسه با تسلیح ژئوتکستایل ممکن است تا حدود ۲/۸۵ برابر کاهش یابد، که این امر اهمیت استفاده از ژئوسل در تسلیح خاک را در مقایسه با ژئوتکستایل نشان می‌دهد.^[۱۱]

در این نوشتار با استفاده از یک مدل فیزیکی، ضمن بررسی اثر تعداد لایه‌های ژئوسل در کاهش میزان نشست بستر (نشست صفحه‌ی بارگذاری) و تعیین فاصله‌ی بهینه بین دو لایه، عملکرد بستر مسلح با دو لایه‌ی ژئوسل تحت بارگذاری تکراری (مشابه بار ترافیکی وارد بر بستر راه) در مقایسه با یک لایه‌ی ژئوسل با ثابت نگه داشتن جرم مصالح مصرفی در دو حالت بررسی شده است. نتایج حاصله به صورت جامع مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۲. دستگاه آزمایش

این دستگاه شامل ۳ قسمت اصلی است: تانک آزمایش، سیستم بارگذاری و سیستم ثبت قرائت داده‌ها (شکل ۱). تانک آزمایش دارای ابعاد $۸۰۰ \times ۸۰۰ \times ۸۰۰$ میلی‌متر شامل یک اسکلت فولادی است، که سه وجه جانبی آن برای سبکی و سهولت در جایجایی تانک از MDF سیار با ضخامت ۳۰ میلی‌متر ساخته شده است. وجه دیگر تانک، از جنس پلکسی‌گلاس^۴ به ضخامت ۲۰ میلی‌متر به منظور مشاهده و عکس‌برداری احتمالی از رفتار و تغییرشکل‌های به‌وجودآمده در خاک



شکل ۲. نمودار دانه بندی خاک مورد استفاده.

جدول ۱. مشخصات خاک.

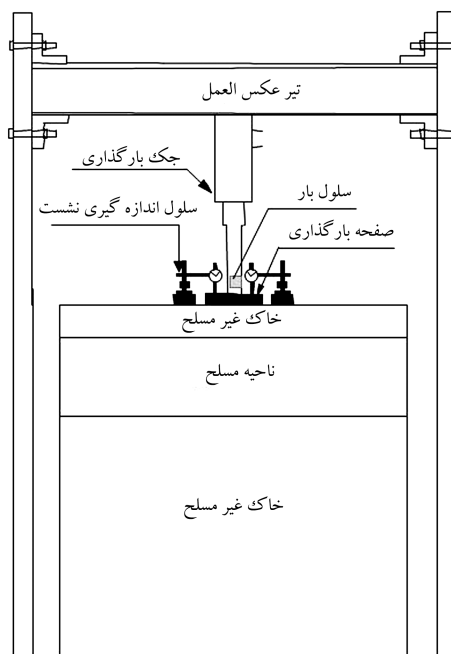
| نتیجه | آزمایش |
|-------|--|
| ۱۳٫۸۶ | ضریب یکنواختی (C_u) |
| ۱٫۲۰ | ضریب انحناء (C_c) |
| ۰٫۵۷ | D_{30} |
| ۰٫۱۴ | اندازه‌ی مؤثر دانه‌ها (D_{10}) |
| ۱٫۴ | اندازه‌ی متوسط دانه‌ها (D_{50}) |
| ۱٫۹۴ | D_{60} |
| ۰٫۶۶ | نسبت منافذ بیشینه (e_{max}) |
| ۰٫۳۶ | نسبت منافذ کمینه (e_{min}) |
| ° | درصد رطوبت ($w\%$) |
| ۲٫۶۴ | توده‌ی ویژه (G_s) |
| ۴۱ | زاویه‌ی اصطکاک ϕ (درجه) در چگالی نسبی ۷۰٪ |

با توجه به مشخصات خاک، براساس سیستم طبقه‌بندی یکنواخت (ASTM D2487-11)^[۱۴]، خاک از نوع ماسه با دانه‌بندی خوب (SW) است. این خاک ملزومات موردنیاز در استاندارد (ASTM D2940-09)^[۱۵] جهت خاک بستر راه را برآورده می‌سازد. این تذکر لازم است که به منظور بررسی اثر اندازه‌ی ذرات و نقش آن در رفتار بستر می‌توان از انواع خاک با اندازه‌ی متوسط ذرات (D_{50}) مختلف در مطالعات آتی استفاده کرد.

چگالی نسبی خاک (D_r) ^۶ در تمامی آزمایش‌ها برابر ۷۰٪ در نظر گرفته شده است. علت استفاده از این مقدار چگالی نسبی آن است که در چگالی نسبی پایین‌تر، تحت اثر بارهای وارد بر لایه‌ی مسلح با ژئوسل، فقط دانه‌های خاک داخل سلول‌های ژئوسل جابجا شده و مقاومت فعال در دیواره‌های ژئوسل جهت افزایش باربری ایجاد نخواهد شد. همچنین افزایش چگالی نسبی خاک بیش از حدود ۷۰٪ تا ۸۰٪ نیز تأثیر تسلیح با ژئوسل را کاهش می‌دهد.

۲.۳. ژئوسل

ژئوسل مورد استفاده جهت تسلیح خاک از نوع بدون سوراخ است و در ساخت آن از یک نوع ژئوتکستایل صفحه‌ی بی (نوع SF56 ساخت شرکت دوپوند)^۷ با اتصالات گرمایشی - جوشی استفاده شده است. مقاومت کششی مناسب مصالح ژئوتکستایل و اتصالات دیواره‌های ژئوسل، امکان ایجاد یک سازه‌ی ایده‌آل با ظرفیت باربری مناسب را فراهم می‌کند. ژئوسل مورد استفاده در کلیه‌ی برنامه‌ی آزمایش‌ها دارای



شکل ۱. تصویر شماتیک دستگاه آزمایش.

است. با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده، تغییرشکل دیواره‌های تانک آزمایش تحت بارهای وارده بر صفحه‌ی بارگذاری (تا حدود ۱۰۰۰ کیلوپاسکال) ناچیز است. سیستم بارگذاری از یک سیلندر هیدرولیک، مخزن روغن و بخش کنترل‌کننده تشکیل شده است. این سیستم قادر به اعمال بار استاتیکی و همچنین بار سیکنی قائم تا حدود ۱۰ کیلونیوتن و بار سیکنی با بسامد تا حدود ۱ هرتر است. سیستم قرائت و ثبت اطلاعات با استفاده از یک واحد قرائت و ثبت داده‌ها^۵، که توسط یک پردازشگر داخلی کنترل می‌شود، جریان‌های خروجی از میدل‌های مختلف (حس‌گرهای اندازه‌گیری نشست و بار) را دریافت می‌کند. میزان نشست صفحه‌ی بارگذاری به وسیله‌ی دو حس‌گر اندازه‌گیری نشست واقع بر دو طرف آن و میزان بار قائم، که به وسیله‌ی سیلندر هیدرولیکی به صفحه‌ی بارگذاری واقع بر سطح خاک اعمال می‌شود، با یک سلول اندازه‌گیری بار مستقیماً اندازه‌گیری می‌شود. ظرفیت حس‌گرهای اندازه‌گیری نشست معادل ۱۰۰ میلی‌متر با دقت ۰٫۱٪ و ظرفیت سلول بار برابر ۱۰ کیلونیوتن با دقت ۰٫۱٪ هستند. صفحه‌ی بارگذاری موردنظر، یک صفحه‌ی صلب فولادی دارای مقطع دایره‌ی با ضخامت ۲۰ میلی‌متر و سطح مقطع ۱۰۰ سانتی‌متر مربع (قطر حدود ۱۱۳ میلی‌متر) است.

۳. مشخصات مصالح

۱.۳. خاک

از آنجا که هدف از این پژوهش بررسی رفتار بستر مسلح و غیرمسلح تحت بارهای تکراری نظیر بار ترافیک وسائط نقلیه است، از این رو به منظور شبیه‌سازی هر چه بهتر خصوصیات خاک بستر، از یک نوع خاک با دانه‌بندی گسترده‌ی موردنظر در پروژه‌های راه‌سازی استفاده شده است. این خاک یک نوع خاک طبیعی عبوری از الک ۱۲/۵ میلی‌متر، با دانه‌بندی موردنظر در شکل ۲ و مشخصات فیزیکی و مکانیکی مطابق جدول ۱ است.

جدول ۲. مشخصات مهندسی ژئوتکستایل مصرفی در آزمایش‌ها.

| توصیف | واحد | مقدار |
|-------------------------------------|-------------------|------------|
| نوع ژئوتکستایل (SF۵۶) | - | بافته نشده |
| جرم در واحد سطح | gr/m ^۲ | ۱۹۰ |
| ضخامت تحت تنش ۲ kN/m ^۲ | mm | ۰٫۵۷ |
| ضخامت تحت تنش ۲۰۰ kN/m ^۲ | mm | ۰٫۴۷ |
| مقاومت کششی | kN/m | ۱۳٫۱ |
| مقاومت در ۵٪ کرنش | kN/m | ۵٫۷ |
| اندازه‌ی مؤثر سوراخ‌ها | mm | ۰٫۰۸ |



شکل ۳. تصویری از ژئوتیل مورد استفاده در آزمایش به همراه خاک درون چشمه‌های آن.

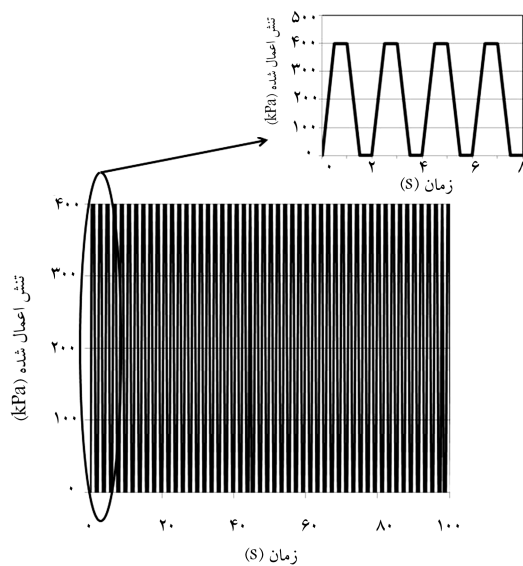
جک بارگذاری، برای رسیدن به چگالی نسبی حدود ۷۰٪ انجام می‌شود. این تذکر لازم است که به منظور جلوگیری از آسیب به دیواره‌های ژئوتیل در حین تراکم خاک داخل سلول‌های آن، یک لایه‌ی نازک خاک اضافی به ضخامت حدود ۱۰ میلی‌متر بر روی ژئوتیل قبل از قرارگیری صفحه‌ی اعمال بار بر روی خاک (جهت تراکم) ریخته می‌شود. بعد از رسیدن به تراز فوقانی بستر، صفحه‌ی بارگذاری دایره‌ی بی‌مرکز سطح خاک قرار می‌گیرد و حس‌گرهای نیرو و تغییر مکان نصب و سیستم آماده‌ی بارگذاری مطابق با الگوی بارگذاری سیکلی موردنظر (بخش ۵) می‌شود. در حین اعمال بارگذاری - باربرداری و بارگذاری مجدد مقادیر نشست خاک در میزان بار وارده و سیکل موردنظر توسط سیستم قرائت داده‌ها ثبت می‌شوند. علت استفاده از صفحه‌ی دایره‌ی بی‌آن است که در عمل سطح تماس و وسایط نقلیه با سطح خاک به صورت مربع یا مستطیل است، که معمولاً در مدل‌های فیزیکی به صورت یک صفحه‌ی دایره‌ی بی با سطح تماس یکسان مدل می‌شود.

در کلیه‌ی آزمایش‌های مسلح با ژئوتیل دو پارامتر u/D (پوشش خاک روی اولین لایه‌ی ژئوتیل^۹ به قطر صفحه‌ی بارگذاری) و b/D (عرض ژئوتیل به قطر صفحه‌ی بارگذاری) با توجه به مطالعات^{[۱۱]، [۱۲]} به ترتیب برابر ۰٫۱ و ۴٫۲ انتخاب شده‌اند.

۵. الگوی بارگذاری سیکلی

شکل ۴، تاریخچه‌ی زمانی بارگذاری سیکلی (بارگذاری - باربرداری و بارگذاری مجدد) بر روی سطح خاک را نشان می‌دهد. بارگذاری سیکلی با بسامد حدود ۰٫۵ هرتز انجام می‌شود و تعداد سیکل‌های بار^{۱۰} تا رسیدن نشست به یک حالت پایدار (افزایش نشست در سیکل‌های بار ثابت یا ناچیز شود) یا بروز نشست‌های مفرط در آن ادامه می‌یابد.

به منظور شبیه‌سازی بار ترافیکی بر روی بستر جاده، دامنه‌ی بارگذاری سیکلی معادل ۴۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. براساس سیستم بارگذاری HS پیشنهاده‌ی توسط آیین‌نامه‌ی آشتو (AASHTO ۱۹۸۳)^[۱۴] فشار ناشی از لاستیک وسایط نقلیه بر سطح راه بین ۲۴۰ kPa و ۸۰۰ kPa توصیه می‌شود.



شکل ۴. تاریخچه‌ی زمانی بارگذاری سیکلی روی صفحه‌ی بارگذاری.

اندازه‌ی چشمه‌ی ۵۰ × ۵۵ میلی‌متر و ۳ ارتفاع (H) ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر است. جدول ۲ مشخصات ژئوتکستایل مصرفی و شکل ۳، تصویری از ژئوتیل موردنظر را نشان می‌دهد.

جهت عملکرد هرچه بهتر محصورکنندگی ژئوتیل، براساس مطالعات شرکت تولیدکننده‌ی ژئوتیل (دوپوند) بر روی نسبت اندازه‌ی ذرات خاک به اندازه‌ی چشمه‌های ژئوتیل^۸، بیشینه‌ی اندازه‌ی ذرات خاک پرکننده‌ی داخل چشمه‌های ژئوتیل به قطر ۵۵ میلی‌متر، در حدود ۱۴ میلی‌متر توصیه شده است. از این رو در این پژوهش با توجه به بیشینه‌ی اندازه‌ی ذرات خاک حدود ۱۲٫۵ میلی‌متر می‌توان انتظار داشت که محصورکنندگی ژئوتیل در افزایش باربری و کاهش نشست بستر به نحو مناسبی وارد عمل شود.

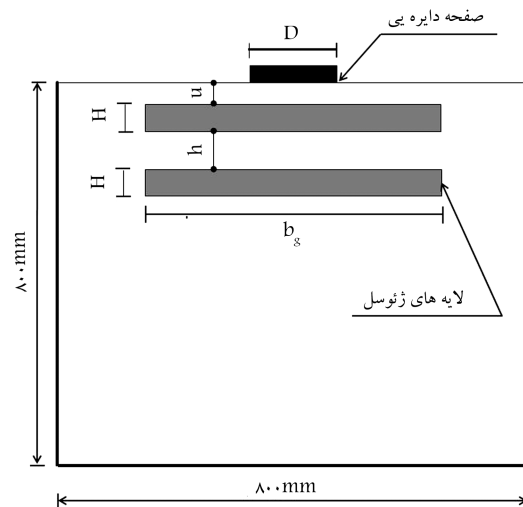
۴. آماده‌سازی و روش انجام آزمایش‌ها

آماده‌سازی بستر جهت آزمایش موردنظر با تراکم خاک در لایه‌های با ضخامت موردنظر و رسیدن به تراز زیرین اولین لایه‌ی ژئوتیل (اولین لایه از پایین) آغاز می‌شود. سپس با قراردادن لایه‌ی ژئوتیل روی سطح خاک، عمل خاکریزی و تراکم مناسب تا رسیدن به لایه‌ی بعدی و در نهایت رسیدن به تراز فوقانی تانک آزمایش و محل قرارگیری مدل صفحه‌ی بارگذاری صورت می‌گیرد. تراکم لایه‌های خاک غیرمسلح به ضخامت ۲۵ میلی‌متر و خاک داخل لایه‌های ژئوتیل با ارتفاع ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر به ترتیب با ۱، ۲، ۳ و ۴ مرتبه اعمال بار ۸٫۵ کیلو نیوتن بر یک صفحه‌ی ضخیم صلب به ابعاد ۷۹۰ × ۷۹۰ میلی‌متر روی سطح لایه‌ی موردنظر، از طریق

از آنجا که در پژوهشی در سال ۲۰۰۹^[۱۷] مقادیر فشار ۴۰۰ kPa و ۸۰۰ kPa را برای اعمال بر سطح جاده پیشنهاد کرده‌اند، لذا در این آزمایش‌ها تنش سیکلی با دامنه‌ی ۴۰۰ kPa به منظور شبیه‌سازی بار ترافیک نیمه سنگین با اعمال بیش از ۲۰۰۰۰ سیکل بارگذاری - باربرداری و بارگذاری مجدد اعمال شده است.

۶. برنامه و مشخصات آزمایش‌ها

شکل ۵، پارامترهای موردنظر در برنامه‌ی آزمایش‌ها و جدول ۳ برنامه و مشخصات آزمایش‌های سیکلی موردنظر را نشان می‌دهد. مطابق این جدول در مجموع تعداد ۱۵ آزمایش به منظور بررسی اثر تعداد لایه‌های ژئوسل (N)^{۱۱}، اثر فاصله‌ی بین دو لایه‌ی ژئوسل (h)^{۱۲} و مقایسه‌ی عملکرد تسلیح با یک لایه‌ی ژئوسل و دو لایه‌ی ژئوسل با جرم ژئوتکستایل مصرفی یکسان انجام شده است. از جمله مسائل مهم در مطالعات آزمایشگاهی، کنترل تکرارپذیری نتایج به منظور حصول اطمینان از عملکرد سیستم و دقت در اندازه‌گیری مقادیر پارامترهای ورودی (تنش سیکلی اعمال‌شده) و خروجی (نشست صفحه‌ی بارگذاری) است. بدین منظور تعدادی آزمایش جهت کنترل صحت آزمایش‌ها و تکرارپذیری آنها صورت گرفته است. نتایج آزمایش‌های تکرار شده (۱ یا ۲ بار) در مقایسه با یکدیگر اختلافی کمتر از ۸٪ را نشان می‌دهند، که این مقدار در محدوده‌ی مطالعات ژئوتکنیکی مورد قبول است. بروز چنین خطایی می‌تواند به علت تغییرات هرچند کوچک در چگالی نسبی خاک در حین آماده‌سازی بستر، محل قرارگیری لایه‌های ژئوسل، دامنه‌ی بار سیکلی وارده و یا خطای اندازه‌گیری باشد.



شکل ۵. هندسه‌ی مدل و مشخصات تسلیح با دو لایه‌ی ژئوسل.

جدول ۳. برنامه و مشخصات آزمایش‌های سیکلی انجام‌شده ($u/D = 0.1$ و $b/D = 4.2$).

| ردیف | نوع آزمایش | H/D | N | h/D | دفعات تکرار |
|------|------------|-----------|---|----------|-------------|
| ۱ | غیرمسلح | - | - | - | ۱ + ۱* |
| ۲ | مسلح | ۰٫۴۵، ۰٫۹ | ۱ | ۰٫۲۲۵ | ۳ + ۳* |
| ۳ | | ۰٫۴۵ | ۲ | ۰٫۲، ۰٫۱ | ۳ + ۲* |
| ۴ | | ۰٫۲۲۵ | ۲ | ۰٫۲ | ۱ + ۱* |

* آزمایش‌های تکرار شده.

۷. نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصله از آزمایش‌ها مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۱.۷. رفتار عمومی نشست در سطح بارگذاری

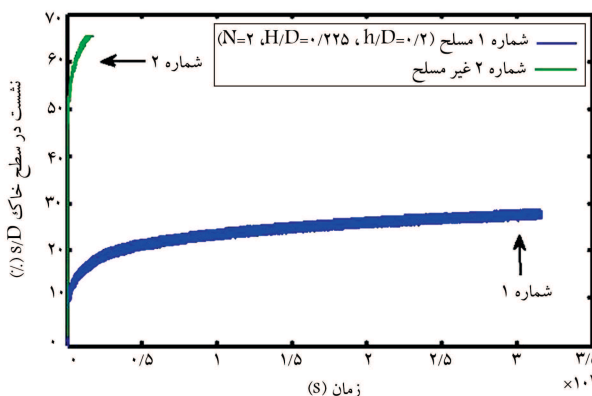
شکل ۶، تغییرات نشست (s/D) در مقابل زمان (یا تعداد سیکل بار) را برای دو بستر غیرمسلح و بستر مسلح با دو لایه‌ی ژئوسل ($H/D = 0.225$) نشان می‌دهد. مطابق این شکل، در حالت نبود تسلیح (بستر غیرمسلح) تحت سیکل‌های اولیه از بار (حدود ۵۰۰ تا ۵۵۰ سیکل)، نشست‌های قابل توجه و عمدتاً خمیری منجر به بروز گسیختگی در خاک می‌شود و رفتار به حالت ناپایدار میل می‌کند. در مقابل در حالت وجود تسلیح با افزایش سیکل‌های بار، نرخ افزایش نشست کاهش می‌یابد و در نهایت، رفتار نشست - زمان بستر به سمت یک حالت پایدار میل می‌کند. مقایسه‌ی دو حالت بستر مسلح و غیرمسلح بیانگر اثر قابل ملاحظه‌ی تسلیح با ژئوسل در کاهش نشست و بهبود رفتار بستر است.

این امر را می‌توان به عملکرد دال‌گونه‌ی لایه‌ی ژئوسل و خاک داخل آن به صورت یک لایه‌ی مرکب با سختی مناسب نسبت داد.

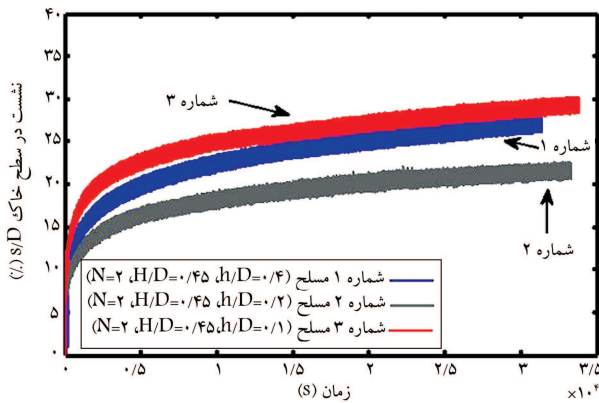
دو حالت رفتار پایدار و ناپایدار در شکل ۶ را می‌توان مطابق شکل ۷ مدل کرد. مطابق این شکل، رفتار کلی نشست بستر در دو حالت پایدار و ناپایدار شامل نشست‌های تجمعی خمیری همراه با نشست ارتجاعی در مقابل تعداد سیکل‌های بار توسط چند خط شکسته مدل شده است. شرایط حالت ناپایدار به علت بروز نشست‌های مفرط در بستر در شکل ۷ الف ارائه شده است. بخش‌های مختلف آن عبارتند از:

- نشست سریع اولیه^{۱۳}، که در سیکل‌های اولیه‌ی بارگذاری رخ می‌دهد.
- نشست ثانویه^{۱۴}، که با افزایش سیکل‌ها زیاد و با تغییر رفتار در نقطه‌ی x وارد بخش سوم می‌شود (تعداد سیکل‌های متناظر با نقطه‌ی x، که در آن شیب منحنی تغییر چشم‌گیری می‌کند، با n_{cr} ^{۱۵} نشان داده می‌شود).

فراتر از نقطه‌ی x متناظر با $n \geq n_{cr}$ ، نشست به سرعت افزایش می‌یابد. بعد از این تعداد سیکل، به علت افزایش بیش از حد نشست، رفتار ناپایدار بستر توسعه می‌یابد و در نهایت منجر به گسیختگی خاک می‌شود. همچنین شکل ۷ ب رفتار بستر را در شرایط پایدار نشان می‌دهد. این شکل از ۳ بخش اصلی تشکیل شده است:



شکل ۶. تغییرات نشست در سطح خاک با زمان برای بستر غیرمسلح و بستر مسلح با دو لایه‌ی ژئوسل.



شکل ۸. تغییرات نشست در سطح خاک با زمان برای بستر مسلح با دو لایه‌ی ژئوسل ($N = 2, H/D = 0.45$) برای مقادیر $h/D = 0.1, 0.2, 0.4$.

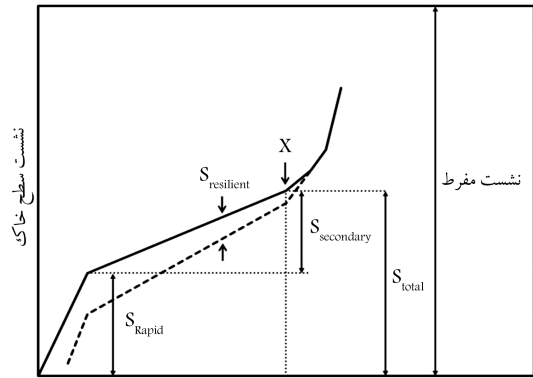
مطابق شکل ۶، در حالت بستر غیرمسلح در تعداد سیکل حدود ۵۲۵ از شروع بارگذاری (زمانی حدود ۱۰۵۰ ثانیه) نشست به مقدار زیادی افزایش می‌یابد و با رسیدن به حدود ۶۵٪ قطر صفحه‌ی بارگذاری سبب ناپایداری سیستم می‌شود. از طرفی با توجه به شکل ۸ به روشنی ملاحظه می‌شود که تسلیح خاک صرف‌نظر از فاصله‌ی بین دو لایه در کاهش نشست بستر بسیار مؤثر است و رفتار بستر در یک تعداد سیکل مشخص از بارگذاری سیکلی به حالت تقریباً پایدار خواهد رسید. علاوه بر این ملاحظه می‌شود، که با افزایش ضخامت خاک بین دو لایه‌ی ژئوسل (h/D) از ۰.۱ به ۰.۲ نشست بستر کاهش می‌یابد، اما با افزایش فاصله‌ی بین دو لایه (h/D) به ۰.۴ نشست بستر مجدداً افزایش می‌یابد. این امر مبین آن است که با افزایش ضخامت خاک غیرمسلح بین دو لایه به ۰.۴ برابر قطر صفحه‌ی بارگذاری، ضمن کاهش اندرکنش لایه‌ی دوم ژئوسل با لایه‌ی اول، لایه‌ی دوم از ناحیه‌ی تحت تأثیر تنش دور می‌شود. این انتظار وجود دارد که با افزایش بیشتر فاصله بین دو لایه‌ی ژئوسل، اثر لایه‌ی دوم تسلیح به نحو قابل ملاحظه‌ی کاهش یابد و مقدار نشست صفحه‌ی بارگذاری در تمامی سیکل‌های بارگذاری به سمت حالت استفاده از تک لایه‌ی ژئوسل میل کند. علی‌رغم آنکه ممکن است مقدار h/D بهینه بین ۰.۲ تا ۰.۴ باشد، اما در ادامه‌ی آزمایش‌ها استفاده شده است. از این رو مقدار h/D بهینه برابر ۰.۲ توصیه می‌شود.

۳.۷. مقایسه‌ی تسلیح با یک و دو لایه‌ی ژئوسل در جرم مصالح

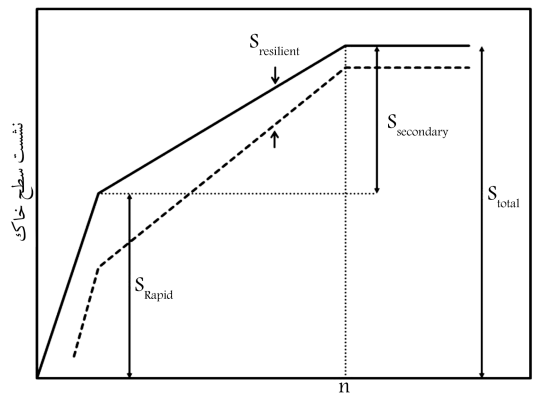
مصرفی یکسان

شکل‌های ۹ و ۱۰، عملکرد یک و دو لایه‌ی مسلح‌کننده‌ی ژئوسل (با ژئوسل مصرفی یکسان) در کاهش نشست بستر را در مقایسه با حالت بستر غیرمسلح نشان می‌دهند. شکل ۹، رفتار بستر مسلح با دو لایه‌ی ژئوسل ($H/D = 0.225$) را با رفتار بستر مسلح با یک لایه‌ی ژئوسل ($H/D = 0.45$) و شکل ۱۰، رفتار بستر مسلح با دو لایه‌ی ژئوسل ($H/D = 0.45$) را با رفتار بستر مسلح با یک لایه‌ی ژئوسل ($H/D = 0.9$) مقایسه می‌کند. در حالت دو لایه‌ی تسلیح، فاصله‌ی لایه‌های ژئوسل برابر ۰.۲ قطر صفحه‌ی بارگذاری ($h/D = 0.2$) است. مطابق این دو شکل به روشنی مشاهده می‌شود که با تسلیح بستر صفحه‌ی بارگذاری با یک و با دو لایه‌ی ژئوسل رفتار بستر از حالت ناپایدار در حالت غیرمسلح به حالت پایدار تغییر می‌کند.

همچنین در حالت تسلیح بستر با دو لایه‌ی ژئوسل، با افزایش تعداد سیکل‌های



الف) شرایط حالت ناپایدار؛ تعداد سیکل بارگذاری



ب) شرایط حالت پایدار؛ تعداد سیکل بارگذاری

شکل ۷. رفتار عمومی تغییرات نشست با تعداد سیکل بارگذاری.

- نشست سریع اولیه، که در سیکل‌های اولیه بارگذاری می‌شود.
 - نشست ثانویه با نرخ کم ($s_{secondary}$)، که عملاً تا سیکل $n = n_{cr}$ بارگذاری است. این نشست بعد از نشست سریع اولیه s_{rapid} رخ می‌دهد.
 - بعد از $n \geq n_{cr}$ ، میزان افزایش نشست خمیری و کاهش نشست کشسان ناچیز و میزان نشست کل 16 تقریباً ثابت است.
- بنابراین، نشست کل مطابق رابطه‌ی ۱ قابل محاسبه است:

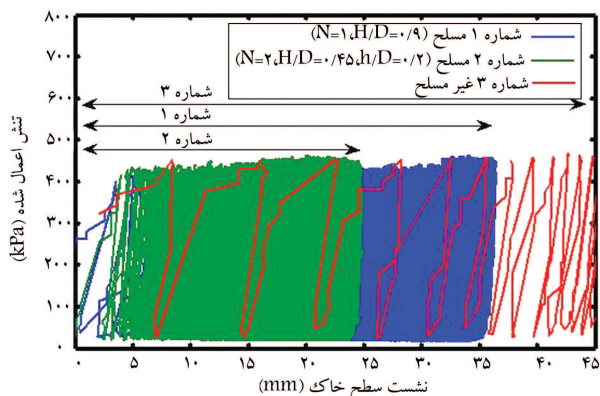
$$S_{total} = s_{rapid} + s_{secondary} \quad (1)$$

نتایج نشان می‌دهد که پاسخ کشسان ($s_{resilient}$) با افزایش تعداد سیکل‌های بار کاهش می‌یابد (اختلاف بین خط‌های پرو نقطه‌چین در شکل ۷ محدوده‌ی نوسانات نشست پی را در بارگذاری، باربرداری، و بارگذاری مجدد نشان می‌دهد).

۲.۷. اثر ضخامت لایه‌ی خاک غیرمسلح بین دو لایه‌ی ژئوسل

متوالی (h/D)

شکل ۸، تغییرات نشست (s/D) نسبت به زمان را برای بستر مسلح با دو لایه‌ی ژئوسل ($H/D = 0.45, b/D = 4.2$) تحت تنش سیکلی ۴۰۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. به منظور بررسی اثر فاصله بین دو لایه‌ی ژئوسل، آزمایش‌های حالت مسلح در حالت وجود فاصله بین دو لایه‌ی معادل ۰.۱، ۰.۲ و ۰.۴ قطر صفحه‌ی بارگذاری (h/D) انجام شده‌اند.

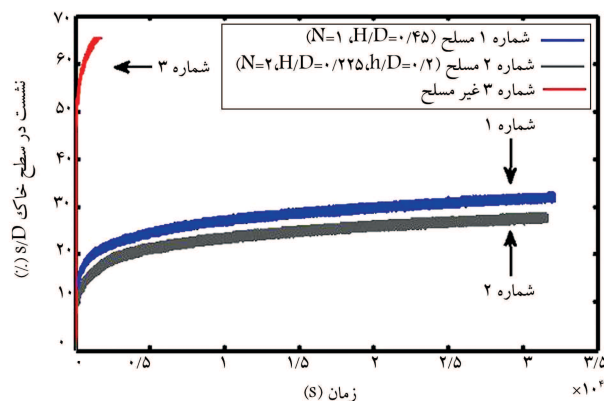


شکل ۱۱. منحنی هیستریزیس خاک برای بستر مسلح و غیرمسلح ($N = 2, H/D = 0.45, h/D = 0.2, N = 1, H/D = 0.9$)

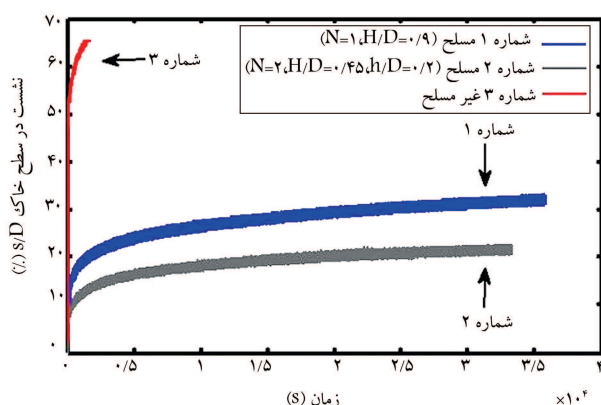
کاملاً یکسان در ارتفاع چشمه‌ی ژئوسل مشکل و یا حتی غیرممکن است. اگرچه در تمامی آزمایش‌ها سعی شده است تا تراکم خاک داخل چشمه‌های ژئوسل صرف‌نظر از ضخامت آن به‌طور تقریباً یکسان ایجاد شوند، به هر حال استفاده از تعداد لایه‌های بیشتر با ضخامت کمتر، ضمن احتمال افزایش ایجاد تراکم مناسب در عمق چشمه‌های آن، ژئوسل با مقاومت خمشی و برشی یکنواخت‌تری را ایجاد می‌کند.

- با افزایش قطر سطح بارگذاری از مقدار حدود 10^6 میلی‌متر در این پژوهش به مقدار 20^6 یا 30^6 میلی‌متر در مقیاس واقعی (سطح تماس لاستیک وسائط نقلیه مختلف با جاده)،^[۱۷] مقدار نشست در سطح بارگذاری ممکن است در مقایسه با نتایج حاصل از این پژوهش (کمینه‌ی نشست حدود 22 میلی‌متر) به 2 یا 3 برابر یعنی تا حدود 65 میلی‌متر نیز برسد. از آنجا که نشست سطح جاده‌های بدون روکش را در اثر سیکل‌های بار تا حدود 75 میلی‌متر جهت ترمیم مجاز می‌دانند،^[۱۸] لذا این مقدار از نشست می‌تواند قابل قبول تلقی شود.

به منظور روشن‌شدن بهتر عملکرد تسلیح خاک با ژئوسل، شکل ۱۱ رفتار هیستریزیس تنش - نشست بستر غیرمسلح، بستر مسلح با یک لایه‌ی ژئوسل $H/D = 0.9$ و بستر مسلح با دو لایه‌ی ژئوسل $H/D = 0.45, h/D = 0.2$ را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، برای بستر مسلح (صرف‌نظر از نحوه‌ی تسلیح) حلقه‌ی هیستریزیس با افزایش تعداد سیکل‌ها در مقایسه با بستر غیرمسلح جمع‌تر می‌شود. جمع‌شدن حلقه‌ی هیستریزیس در این حالت مبین جذب انرژی توسط بستر و در نتیجه تمایل به ثابت‌شدن نشست بستر است. در مقابل برای بستر غیرمسلح، قابلیت جذب انرژی پایین است و پس از اعمال حدود 525 سیکل و رسیدن به نشست حدود 67 میلی‌متر، سیستم ناپایدار می‌شود. الگوی مشاهده‌شده در این آزمایش‌ها توسط سایر پژوهشگران،^[۲۰،۱۲،۱۱] در حالت غیرمسلح و مسلح گزارش شده است. مقایسه‌ی حلقه‌های هیستریزیس در دو حالت بستر مسلح با یک و دو لایه‌ی ژئوسل (علی‌رغم میزان یکسان ژئوسل) نیز مبین آن است که قابلیت جذب انرژی در حالت تسلیح با دو لایه‌ی ژئوسل بهتر از حالت تسلیح با یک لایه‌ی ژئوسل است، به طوری که برای دو لایه‌ی تسلیح بعد از اعمال حدود 16000 سیکل بار، میزان نشست بستر در حدود 22 میلی‌متر ثابت می‌شود، در حالی که برای بستر مسلح با یک لایه‌ی ژئوسل پس از اعمال حدود همین تعداد سیکل بارگذاری - باربرداری، نشست بستر در حدود 32 میلی‌متر است.



شکل ۹. تغییرات نشست در سطح خاک با زمان برای بستر مسلح و غیرمسلح ($N = 2, H/D = 0.225, h/D = 0.2, N = 1, H/D = 0.45$)



شکل ۱۰. تغییرات نشست در سطح خاک با زمان برای بستر مسلح و غیرمسلح ($N = 2, H/D = 0.45, h/D = 0.2, N = 1, H/D = 0.9$)

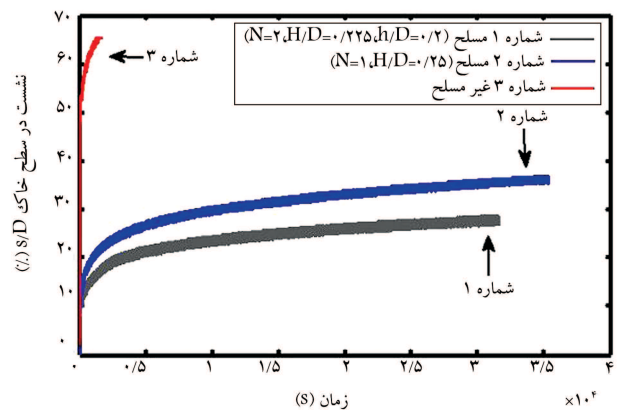
بارگذاری، نرخ افزایش نشست صفحه‌ی بارگذاری نسبت به حالت تسلیح با یک لایه‌ی ژئوسل، علی‌رغم یکسان بودن میزان ژئوسل مصرفی کاهش می‌یابد. در نهایت، صفحه‌ی بارگذاری در تعداد سیکل کمتری به نشست نهایی خود (حالت پایدار) می‌رسد. علاوه بر این، در حالت تسلیح با دو لایه‌ی ژئوسل، نشست بیشینه‌ی بستر به وضوح نسبت به یک لایه‌ی ژئوسل کمتر است. برای مثال مطابق شکل ۱۰، نشست بیشینه‌ی بستر برای دو لایه‌ی ژئوسل با $H/D = 0.45$ و یک لایه‌ی ژئوسل با $H/D = 0.9$ در انتهای بارگذاری به ترتیب معادل $22/5$ و 33 درصد قطر صفحه‌ی بارگذاری است. این مقایسه مبین آن است که در حالت وجود دو لایه‌ی تسلیح، علی‌رغم استفاده از میزان یکسان ژئوسل، رفتار بستر در مقایسه با حالت یک لایه‌ی تسلیح بهبود می‌یابد. کاهش نشست بستر در حالت تسلیح با دو لایه‌ی ژئوسل در مقایسه با یک لایه‌ی ژئوسل را می‌توان به این دلایل عمده نسبت داد:

- وجود لایه‌ی خاک غیرمسلح بین دو لایه‌ی ژئوسل موجب افزایش ناحیه‌ی مسلح و به عبارتی افزایش در مان اینرسی ناحیه‌ی مسلح (دو لایه‌ی ژئوسل و لایه‌ی خاک غیرمسلح بین آن دو) می‌شود و از این رو، سختی خمشی و برشی ناحیه‌ی تسلیح زیر صفحه‌ی بارگذاری افزایش می‌یابد.
- افزایش مقاومت بستر علاوه بر ضخامت لایه‌ی ژئوسل^{۱۷} به شدت به تراکم خاک داخل چشمه‌های ژئوسل نیز وابسته است. در روش‌های معمول تراکم در محل (به غیر از سیستم بارش)، نظیر تراکم با عمل کوبش، عبور غلطک یا هر نوع اعمال فشار بر خاک، با افزایش ضخامت لایه‌ی ژئوسل امکان دستیابی به تراکم

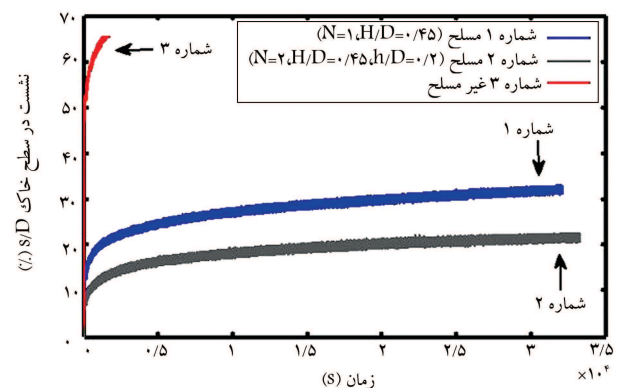
۴.۷. اثر تعداد لایه‌های مسلح‌کننده ی ژئوسل (N)

مزیت استفاده از ژئوسل تک‌لایه در کاهش نشست خاک تحت بارگذاری سیکلی توسط پژوهشگران بررسی شده است.^[۱۲،۱۱] از آنجا که در عمل ایجاد تراکم مناسب و یکنواخت خاک درون سلول‌های ژئوسل و همچنین ساخت ژئوسل با ضخامت زیاد، مشکل و یا حتی غیرممکن است، لذا استفاده از ژئوسل در تعداد لایه‌های بیشتر برای تسلیح خاک قابل توصیه است. به عبارتی برای افزایش عمق ناحیه ی تسلیح، به جای افزایش ضخامت ژئوسل تک‌لایه می‌توان از ژئوسل با ضخامت کم (برای مثال: $H/D = 0,225, h/D = 0,45$) در لایه‌های بیشتر استفاده کرد. این امر مشابه استفاده از تسلیح صفحه‌یی با تعداد لایه‌های ۱ تا ۵ در پژوهش‌های مختلف است.^[۲۲،۲۱]

شکل‌های ۱۲ و ۱۳، تغییرات نشست در سطح خاک (صفحه‌ی بارگذاری) با زمان تحت بارگذاری سیکلی برای بستر غیرمسلح و بستر مسلح با ژئوسل را ارائه می‌کنند. این دو شکل به ترتیب تسلیح با یک و دو لایه ی ژئوسل با $H/D = 0,225$ و $H/D = 0,45$ را نشان می‌دهند. از این دو شکل ملاحظه می‌شود که صرف نظر از ضخامت لایه‌های تسلیح با افزایش تعداد لایه‌ها از یک به دو لایه، کاهش چشم‌گیری در نشست صفحه‌ی بارگذاری رخ می‌دهد. علت این امر افزایش ضخامت ناحیه ی تسلیح و مقاومت برشی بستر و به عبارتی افزایش سختی سیستم در مقابل بارهای سیکلی وارده است.



شکل ۱۲. تغییرات نشست در سطح خاک با زمان برای بستر مسلح و غیرمسلح ($N = 2, H/D = 0,225, h/D = 0,45, N = 1, H/D = 0,225$)



شکل ۱۳. تغییرات نشست در سطح خاک با زمان برای بستر مسلح و غیرمسلح ($N = 2, H/D = 0,45, h/D = 0,2, N = 1, H/D = 0,45$)

نکته‌ی دیگر آنکه با توجه به شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود که با افزایش تعداد لایه‌های ژئوسل تک‌لایه به دو لایه، علاوه بر کاهش نشست در سطح بارگذاری، رسیدن به میزان نشست نهایی و تقریباً ثابت در تعداد سیکل پایین‌تری حاصل می‌شود. نقطه‌ی معروف به n_{cr} (حالت رسیدن به نشست کل تقریباً ثابت در شکل ۱۷ الف) در سیکل پایین‌تری نمایان می‌شود. برای مثال، بیشینه ی نشست پی در سیکل ۴۰۰۰ در حالت ژئوسل تک‌لایه حدود $26/4\%$ قطر صفحه‌ی بارگذاری و در سیکل ۵۰۰۰ این مقدار به $27/65\%$ می‌رسد (افزایشی در حدود $1/25\%$). در صورتی که در شرایط سیکلی مشابه از تعداد سیکل برای ژئوسل دو لایه این افزایش فقط در حدود $0/6\%$ است.

۸. محدودیت‌ها و کاربردها

- مدل فیزیکی استفاده‌شده در این پژوهش، کوچک‌مقیاس است، که این امر ممکن است باعث تفاوت‌هایی در نتایج مدل واقعی در مقایسه با مدل آزمایشگاهی شود. در پژوهش‌هایی^[۲۳،۲۴] با مقیاسه‌ی مدل فیزیکی کوچک‌مقیاس و بزرگ‌مقیاس پی متکی بر خاک مسلح‌شده بیان شده که مکانیزم و رفتار کلی در حالت کوچک‌مقیاس می‌تواند در مدل فیزیکی بزرگ‌مقیاس نیز با تقریب قابل قبولی مشاهده شود.
- نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در صحت‌سنجی نتایج مدل‌های عددی، طراحی و آماده‌سازی مدل‌های فیزیکی بزرگ‌مقیاس و همچنین مدل‌های سانتریفیوژ مفید واقع شود.

از آنجا که خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها قابلیت کاربرد در پروژه‌های واقعی را دارد و قطر صفحه‌ی بارگذاری در آزمایش‌ها حدود ۱۰۰ میلی‌متر است، لذا جهت تعمیم نتایج در مقیاس واقعی با توجه به سطح تماس وسائط نقلیه در جاده، معادل یک صفحه‌ی دایره‌یی با قطر ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر، کافی است ضخامت لایه‌ی ژئوسل و سختی مصالح ژئوسل ۲ یا ۳ برابر شود. در این خصوص می‌توان به ترتیب از ژئوسل ساخته‌شده از ژئوتکستایل نوع SF۹۴ و SF۱۱۱ کارخانه‌ی سازنده‌ی ژئوسل استفاده کرد.

- به منظور تعیین حوزه و عمق نفوذ تنش ناشی از بار وارده بر سطح بارگذاری، اندازه‌گیری تنش در عمق بستر و زیر سطح بارگذاری مفید است، که این امر به دلیل محدودیت در تأمین فشارسنج در این تحقیق مقدور نشد. در مجموع می‌توان گفت استفاده از لایه‌ی ژئوسل می‌تواند موجب پخش بار در سطح بیشتری شود و تنش انتقال‌یافته در عمق و به عبارتی حوزه‌ی نفوذ بار را کاهش دهد.

۹. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور بررسی رفتار و عملکرد بستر مسلح‌شده با ژئوسل لایه‌یی تحت بار سیکلی قائم و همچنین بررسی عوامل مختلف مؤثر در این رفتار، آزمایش‌هایی بر روی بستر خاکی (مسلح و غیرمسلح) با استفاده از یک مدل فیزیکی انجام شده است. نتایج حاصل از این بررسی عبارت‌اند از:

۱. تسلیح بستر با ژئوسل موجب کاهش قابل توجه نشست، تحت بار سیکلی، در مقایسه با بستر غیرمسلح می‌شود، به طوری که با تسلیح بستر رفتار ناپایدار در حالت بستر غیرمسلح به رفتار پایدار تغییر می‌یابد.

۲. در حالت بستر مسلح با ژئوسل نرخ افزایش نشست با افزایش تعداد سیکل بارگذاری کاهش می‌یابد، به طوری که پس از حدود ۱۰۰۰۰ سیکل بارگذاری - باربرداری نرخ افزایش نشست کاهش چشم‌گیری می‌یابد و رفتار سیستم به سمت یک حالت پایدار میل می‌کند.

۳. با افزایش فاصله بین دو لایه‌ی ژئوسل (h/D) از مقدار ۰/۱ تا ۰/۲ ابتدا مقدار نشست در سطح بارگذاری کاهش و سپس با افزایش فاصله‌ی دو لایه به ۰/۴ مقدار نشست افزایش می‌یابد. همچنین این انتظار وجود دارد که با افزایش بیشتر فاصله بین دو لایه‌ی ژئوسل، تأثیر لایه‌ی دوم ژئوسل با خارج شدن از ناحیه‌ی تحت تأثیر تنش زیر صفحه‌ی بارگذاری کاهش یابد و در نهایت رفتار سیستم دو لایه به سمت حالت رفتار سیستم با یک لایه‌ی ژئوسل تمایل پیدا کند.

۴. با افزایش تعداد لایه‌های ژئوسل از یک لایه به دو لایه، رفتار پایدار بستر (حالت رسیدن به نشست کل تقریباً ثابت) در نشست کمتر و سیکل‌های کمتری در مقایسه با حالت وجود یک لایه‌ی تسلیح نمایان می‌شود.

۵. استفاده از دو لایه‌ی ژئوسل در مقایسه با یک لایه‌ی ژئوسل در حالی که میزان ژئوسل مصرفی (مجموع ضخامت) در هر دو حالت یکسان است (برای مثال دو لایه‌ی ژئوسل با $H/D = 0.25$ در مقایسه با یک لایه‌ی ژئوسل با $H/D = 0.45$) عملکرد مناسب‌تری را در پایداری بستر در برابر بارهای وارده ارائه می‌دهد. برای مثال مقدار نشست صفحه‌ی بارگذاری متکی بر بستر مسلح با دو لایه‌ی ژئوسل ($H/D = 0.45$)، تقریباً ۳۲٪ نسبت به نشست بستر مسلح با یک لایه‌ی ژئوسل ($H/D = 0.9$) کمتر است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این نوشتار مراتب تقدیر و تشکر خود را از شرکت تولیدکننده‌ی ژئوسل (دوبوند) به دلیل دراختیار گذاشتن ژئوسل مصرفی در این آزمایش‌ها اعلام می‌دارند.

علائم اختصاری

D : قطر صفحه‌ی بارگذاری

b : عرض لایه‌های ژئوسل

u : پوشش خاک روی اولین لایه‌ی مسلح‌کننده‌ی ژئوسل

h : فاصله‌ی بین دو لایه‌ی مسلح‌کننده‌ی ژئوسل

N : تعداد لایه‌های مسلح‌کننده‌ی ژئوسل

H : ضخامت لایه‌های ژئوسل

d : اندازه‌ی چشمه‌های ژئوسل

D_r : چگالی نسبی خاک

n : تعداد سیکل بار

n_{cr} : تعداد سیکل بحرانی

s : نشست در سطح خاک

s_{rapid} : نشست سریع اولیه در سطح خاک

$s_{secondary}$: نشست ثانویه در سطح خاک

$s_{residual}$: نشست باقیمانده در سطح خاک

s_{total} : نشست کل در سطح خاک

پانوشته‌ها

1. loading plate diameter
2. soil surface settlement
3. reinforcement width of the geocell layers
4. Plexiglass
5. data logger
6. soil relative density
7. Dupont de nemours (luxembourg)
8. geocell pocket size
9. embedded depth of the first layer of geocell
10. number of load cycle
11. number of geocell layers
12. vertical spacing of the two geocell layers
13. initial rapid soil surface settlement
14. secondary soil surface settlement
15. critical number of load cycle
16. total soil surface settlement
17. height of geocell layers

منابع (References)

1. Raymond, G.P. "Reinforced ballast behavior subjected to repeated load", *Geotextiles and Geomembranes*, **20**(1), pp. 39-61 (2002).

2. Shin, E.C., Kim, D.H. and Das, B.M. "Geogrid-reinforced railroad bed settlement due to cyclic load", *Geotechnical and Geological Engineering*, **20**(3), pp. 261-271 (2002).
3. Hufenus, R., Rueegger, R., Banjac, R., Mayor, P., Springman, S.M. and Bronnimann, R. "Full-scale field tests on geosynthetic reinforced unpaved on soft subgrade", *Geotextiles and Geomembranes*, **24**(6), pp. 21-37 (2006).
4. Dash, S.K., Rajagopal, K. and Krishnaswamy, N.R. "Performance of different geosynthetic reinforcement materials in sand foundations", *Geosynthetics International*, **11**(1), pp. 35-42 (2004).
5. Sitharam, G., Sireesh, S.T. and Dash, S.K. "Performance of surface footing on geocell-reinforced soft clay beds", *Geotech. Geol. Eng.*, **25**, pp. 509-524 (2007).
6. Al-Qadi, I.L. and et al., *Accelerated Full-scale Testing of Geogrid-Reinforced Flexible Pavements*, TRB 2007 Annual Meeting (CD-ROM), Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council (2007).
7. Moghaddas Tafreshi, S.N. and Khalaj, O. "Laboratory tests of small-diameter HDPE pipes buried in reinforced sand under repeated load", *Geotextiles and Geomembranes*, **26**(2), pp. 145-163 (2008).

8. Sireesh, S., Sitharam, T.G. and Dash, S.K. "Bearing capacity of circular footing on geocell-sand mattress overlying clay bed with void", *Geotextiles and Geomembranes*, **27**(2), pp. 89-98 (2008).
9. Madhavi Latha, G., Rajagopal, K. and Krishnaswamy N.R. "Experimental and theoretical investigations on geocell supported embankments", *Int. J. of Geomechanics, ASCE*, **6**(1), pp. 30-35 (2006).
10. Moghaddas Tafreshi, S.N. and Dawson, A.R. "Behavior of footings on reinforced sand subjected to repeated loading-comparing use of 3D and planar geotextile", *Geotextiles and Geomembranes, Elsevier*, **28**(5), pp. 434-447 (2010a).
11. Moghaddas Tafreshi, S.N. and Dawson, A.R. "Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement", *Geotextiles and Geomembranes, Elsevier*, **28**(1), pp. 72-84 (2010b).
12. Moghaddas Tafreshi, S.N. and Dawson, A.R. "A comparison of static and cyclic loading responses of foundations on geocell reinforced sand", *Geotextiles and Geomembranes, Elsevier*, **32**, pp. 55-68 (2012).
13. Dash, S.K., Krishnaswamy, N.R. and Rajagopal, K. "Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand", *Geotextiles and Geomembranes*, **19**(4), pp. 235-256 (2001).
14. ASTM D 2487-11, *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, American Society for Testing and Materials (ASTM) International, West Conshohocken, PA (2011).
15. ASTM D2940/D2940M - 09, *Standard Specification for Graded Aggregate Material for Bases or Subbases for Highways or Airports*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA (2009).
16. American Association of State Highway and Transportation Officials, *Standard Specifications for Highway Bridges*, 13th ed. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials. 394 p. (1983).
17. Brito, L.A.T., Dawson, A.R. and Kolisoja, P.J. "Analytical evaluation of unbound granular layers in regard to permanent deformation", In: *Proceedings of the 8th International on the Bearing Capacity of Roads, Railways, and Airfields (BCR2A'09)*, Champaign IL, USA, pp. 187-196 (2009).
18. Giroud, J.P. and Han, J. "Design method for geogrid-reinforced unpaved roads, I. development of design method", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **130**(8), pp. 775-786 (2004a).
19. Giroud, J.P. and Han, J. "Design method for geogrid-reinforced unpaved roads. II. calibration of applications", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **130**(8), pp. 787-797 (2004b).
20. Werkmeister, S., Dawson, A.R. and Wellner, F. "Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown theory", *J. Transportation Research Board*, **1757**, pp. 75-81 (2001).
21. Madhavi Latha, G. and Somwanshi, A. "Bearing capacity of square footings on geosynthetic reinforced sand", *Geotextiles and Geomembranes*, **27**(4), pp. 281-294 (2009).
22. Yetimuglu, T., Wu, J.T.H. and Saglamar, A. "Bearing capacity of rectangular footings on geogrid reinforced sand", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **120**(12), pp. 2083-2099 (1994).
23. Milligan, G.W.E., Fannin, R.J. and Farrar, D.M. "Model and full-scale tests of granular layers reinforced with a geogrid", In: *Proceedings of Third International Conference on Geotextiles*, Vienna, Italy, **1**, pp. 61-66 (1986).
24. Adams, M.T. and Collin, J.G. "Large model spread footing load tests on geosynthetic reinforced soil foundations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **123**(1), pp. 66-72 (1997).