

بررسی آزمایشگاهی تأثیر ژئوسل در ظرفیت باربری خاکریزهای راه آهن

مرتضی اسماعیلی* (دانشیار)

محمد رضا روزینی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، ایرانسید رسول سورانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، ایران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۸ (دور ۲ - ۳۵، شماره ۲/۱، ص. ۵۱-۶۳)

در روش تقویت خاکریزهای خطوط ریلی به کمک ژئوسل، تعیین تعداد لایه های ژئوسل و تراز قرارگیری آنها نقشی کلیدی ایفاء می کند. از آنجا که در ادبیات فنی، تأثیر تعداد لایه و مشخصات ژئوسل در کنترل پایداری و نشست خاکریزهای راه آهن مشخصاً بررسی نشده است، در نوشتار حاضر با ساخت و بارگذاری ۶ خاکریز ۱۰ متری در مقیاس ۱:۲۰ آزمایشگاهی، تأثیر تعداد لایه های ژئوسل با ابعاد چشمه ی ۵ × ۵ سانتی متر و ارتفاع ۵ سانتی متر در پایداری آنها بررسی شده است. پس از اعمال بارگذاری یکنواخت افزایشی بر تاج خاکریز تا لحظه ی گسیختگی، نتایج حاکی از افزایش ظرفیت باربری خاکریز و کاهش نشست متناسب با افزایش تعداد لایه ی ژئوسل است؛ به طوری که روند مذکور تا ۴ لایه ی ژئوسل به صورت افزایشی و پس از جایگذاری لایه ی پنجم روندی کاهشی داشته است. میزان افزایش باربری با جایگذاری ۴ لایه ی ژئوسل نسبت به خاکریز بدون ژئوسل ۳۸/۶٪ و میزان کاهش نشست تاج در باربری یکسان ۳۷٪ بوده است.

واژگان کلیدی: ژئوسل، خاکریز راه آهن، پایداری خاکریزها، کنترل نشست، افزایش باربری، مدل آزمایشگاهی.

۱. مقدمه

در سال های اخیر با افزایش تقاضای حمل و نقل مسافر و کالا از خطوط ریلی، افزایش سرعت و بار محوری در خطوط ریلی کشور مورد توجه قرار گرفته است.^[۱] در این راستا، در کنار احداث خطوط ریلی باری و یا پر سرعت، بهسازی یا بازسازی خطوط ریلی موجود با هدف افزایش عبوردهی بار و مسافر و یا افزایش سرعت نیز مدنظر قرار داده شده است و لذا در صورتی که بتوان خطوط موجود را با روش هایی تثبیت^۱ کرد و نشست آن را کنترل و باربری آنها را افزایش داد، می توان به هدف افزایش بار محوری و یا سرعت عبور دست پیدا کرد.

از سوی دیگر، در بعضی از مناطق کشور به دلیل شرایط خاص ژئوتکنیکی و زمین شناسی، استفاده از مصالح مرغوب و مطابق با استاندارد و یافتن منابع قرضه ی مناسب همیشه با مشکل روبرو بوده است، به طوری که در صورت استفاده از منابع قرضه ی موجود در محل با محدودیت های فنی روبرو خواهد بود و از سوی دیگر، پی جویی منابع قرضه ی کیفی، ضمن محدودیت های زیست محیطی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نخواهد بود. در این راستا می توان برای نمونه به پروژه های در دست ساخت راه آهن شمال غرب قزوین - رشت، یا راه آهن جنوب در دشت خوزستان

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۱۲/۹، اصلاحیه ۱۳۹۶/۲/۲۳، پذیرش ۱۳۹۶/۵/۱۷.

DOI:10.24200/J30.2018.2002.2058

اشاره کرد. برای حل مسائل مطرح شده، استفاده از روش های تسلیح و مقاوم سازی خاکی منطقی به نظر می رسد. در استفاده از روش های بهسازی زمین، روش هایی همچون تراکم،^۲ تریق دوغاب،^۳ اختلاط، اختلاط عمیق،^۴ تریق با فشار بالا (جت گروتینگ)،^۵ مهارسازی خاکریز و شیب با عمل میخ کوبی،^۶ و دوخت به پشت،^۷ شمع ها و ریز شمع ها،^۸ مصالح ژئوسنتتیک به خصوص ژئوسل، اصلاح هندسی شیب، ستون های سنگی،^۹ و ... قابل اشاره هستند.

ژئوسل^{۱۰} محصولی سه بعدی از خانواده ی ژئوسنتتیک ها به صورت شبکه ی لانه زنبوری است که از مواد پلیمری ساخته شده و در فواصل مشخصی به یکدیگر متصل می شوند.^[۱۱] استفاده از ژئوسل برای اولین بار به گروه مهندسان ارتش آمریکا بر می گردد که از آن برای ایجاد امکان عبور و مرور وسائط نقلیه بر روی بسترهای نرم و ماسه یی استفاده شده است. در زمینه ی کارهای پژوهشی، فعالیت های متنوعی بر روی رفتارشناسی مصالح مذکور در جهت تثبیت و مقاوم سازی خاک ها صورت گرفته است. ژئوسل به علت محصورکنندگی و ساختار فیزیکی خاص خود قادر است خاک درون خود را یک پارچه نگه دارد و از پخش شدن مصالح جلوگیری کند. افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست نسبت به حالت بدون ژئوسل از دیگر فواید استفاده از ژئوسل است که با بهره گیری از آن می توان از مصالح خاکی نامرغوب در درون ژئوسل استفاده کرد.^[۱۲] آبروهای خاکی - فولادی با دهانه ی بلند، معمولاً سربار

قابل توجهی از مصالح خاکی دارند که با استفاده از یک لایه ژئوسل می‌توان حجم سربار را کم کرد و عملکرد پل را بهبود بخشید.^[۴] در حوزه مهندسی راه، ساخت راه بر روی زمین‌های نرم و سست چالشی بوده و در این راستا از ژئوسل به منظور بهسازی و افزایش مقاومت باربری این زمین‌ها استفاده شده است. در سال ۱۹۹۰، روش طراحی و ساخت خاکریزهای متکی بر ژئوسل بر روی زمین‌های نرم ارائه شد.^[۵]

همچنین در سال ۱۹۹۳، مطالعه‌ی موردی دیگری بر روی عملکرد خاکریز راه بر روی رس نرم تقویت شده توسط پی ژئوسل صورت گرفت و در نهایت، نتایج ابراربندی خاکریز و عملکرد ژئوسل در طول ساخت و ساز خاکریز ارائه شد.^[۶] مطالعات بر روی روسازی ماسه‌یی مسلح‌شده با ژئوسل بر روی خاک نرم، نشان از کاهش تغییرشکل و افزایش ضریب عکس‌العمل بستر دارد.^[۷] در روش آزمایش APT^{۱۱}، که بر روی راه‌های خاکی با اساس ماسه‌یی مسلح با ژئوسل اجرا می‌شود، پایداری راه و کاهش تغییرشکل ناشی از آن مشاهده شد.^[۸] در حوزه تخصصی مهندسی راه‌آهن به منظور تثبیت بالاست از ژئوسل استفاده می‌شود. ژئوسل همان‌طور که اشاره شد، به علت افزایش ظرفیت باربری خاک درون خود قادر است که بار بیشتری را عبور دهد و همچنین به علت سرعت اجرای بالا، گزینه مناسبی جهت توسعه خطوط موجود به خطوط ریلی با بار محوری بالاتر است. افزایش مقاومت برشی خاکریزها و کاهش گسترش جانبی مصالح و کاهش عملیات زیرکوبی دلایل اصلی استفاده از ژئوسل در خطوط ریلی است.^[۹] در سال ۱۹۹۳، آزمایش‌هایی بر روی پایداری خاک مسلح با ژئوسل انجام شد که حاکی از افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست خاک بود.^[۱۰]

در سال ۲۰۰۶، نیز مزیت‌های تسلیح به وسیله ژئوسل بر عملکرد خاکریز ساخته شده بر روی خاک پی ضعیف از طریق مدل آزمایشگاهی مطالعه و روشی ساده جهت طراحی خاکریز متکی بر ژئوسل پیشنهاد شده است.^[۱۱] نتایج آزمایش‌ها و شبیه‌سازی عددی برخی مطالعات در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ نشان داد که محصورکنندگی از طریق ژئوسل به طور مؤثری سختی و مقاومت خاکریز دانه‌یی بالاست را افزایش می‌دهد، در حالی که نشست عمودی و پراکنندگی جانبی را کاهش می‌دهد.^[۱۲] همچنین در سال ۲۰۱۳، مطالعات تجربی و تحلیلی بر روی تأثیر خاکریز متکی بر بستر باطله‌های صنایع آلومینیوم مسلح شده با فقط ژئوسل و ژئوسل و ژئوگرید انجام شد که نتایج آن حاکی از مزیت استفاده ترکیبی از ژئوسل و ژئوگرید نسبت به فقط ژئوسل بود. همچنین نتایج تجربی افزایش باربری به میزان ۴ تا ۵ برابر به علت استفاده از ژئوسل و ژئوگرید را نشان داد.^[۱۳] در سال ۲۰۱۳، نیز با انجام مطالعه‌ی عددی بر روی شیب مسلح با ژئوسل با لحاظ اثر خمش نتیجه‌گیری شد که استفاده از ژئوسل، ضریب ایمنی را افزایش و تغییرشکل جانبی را کاهش می‌دهد. همچنین از توسعه‌ی سطح شکست جلوگیری می‌کند و بار در سطح وسیع‌تری بازوزیع می‌شود. و نیز مطالعات پارامتریک ژئوسل با تغییر عمق جای‌گذاری لایه ژئوسل، تعداد لایه ژئوسل، فاصله‌ی عمودی بین لایه‌های مسلح، طول، ضخامت و مدول یانگ ژئوسل انجام شد و بر روی تأثیر هندسه‌ی شیب، خصوصیات مقاومت برشی و تراکم خاک در رفتار شیب مسلح با ژئوسل بحث شد.^[۱۴]

در سال ۲۰۱۵، نیز با انجام آزمایش بارگذاری صفحه بر روی پی متکی بر بستر مسلح با ژئوسل با لحاظ عمق مدفون پی نتیجه‌گیری شد که فشار باربری و سختی با افزایش عمق مدفون و تعداد لایه ژئوسل افزایش می‌یابد. همچنین عملکرد پی با نسبت عمق مدفون ۲۵/۰ و ۷۵/۰ متکی بر بستر با یک لایه ژئوسل قابل مقایسه با بستر مسلح با ۲ و ۳ لایه ژئوسل بدون عمق مدفون است.^[۱۵] مطالعات انجام شده‌ی در سال ۲۰۱۶ بر روی عملکرد پی دایره‌یی بر خاک مسلح با چند لایه ژئوسل

با چند لایه ژئوتکتایل مسطح نشان داد که در نشست‌های کم پی، پیشرفت قابل ملاحظه‌یی در ظرفیت باربری و مدول بستر با به کار بردن ۳ لایه ژئوسل به دست می‌آید. در کل چند لایه ژئوسل در مقایسه با چند لایه ژئوتکتایل، عملکردی مؤثرتر و سیستمی سخت‌تر، که قادر به تحمل بار و مدول بستر بیشتر است، را دارد.^[۱۶] در سال ۲۰۱۶، نیز انجام مطالعات آزمایشگاهی و عددی بر روی زیربالاست مسلح با ژئوسل تحت بار سیکلیک، به نتایجی از قبیل کاهش تغییرشکل زیربالاست با افزایش سختی ژئوسل، کاهش جابه‌جایی جانبی تا سختی 10 MPa زیربالاست منجر شد.^[۱۷] همچنین مطالعات اخیر نشان داد که می‌توان ژئوسل را با زیربالاست با مقاومت فشاری نسبتاً پایین استفاده کرد و عملکرد قابل‌قبولی در یک هزینه‌ی تولید پایین دارد. سطح چشمه و فشار جانبی، عوامل تأثیرگذاری در نوارهای ژئوسل هستند. نتایج عددی نشان داد که با افزایش سختی ژئوسل، مقاومت کششی بسیج شده در ژئوسل افزایش می‌یابد، اما موجب کاهش در مقاومت غیرفعال می‌شود.^[۱۸] با بررسی مطالعات پیشین، لزوم به‌کارگیری ژئوسل در بدنه‌ی خاکریز و همچنین بررسی تعداد لایه‌ها و تراز قرارگیری آن احساس می‌شود که نشانگر خلاء مطالعات پیشین در ادبیات فنی است. پژوهش حاضر در واقع به دنبال یافتن پاسخی به چالش‌ها و مسائل مربوط به حوزه‌ی پایداری خاکریزها و شبروانی‌های خاکی با رویکرد افزایش باربری و سرعت در خطوط راه‌آهن است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، کمبود یا نبود مصالح مرغوب در محل پروژه و یا در مواردی نیاز به افزایش بار محوری خطوط موجود مستلزم بالا بردن ظرفیت باربری خاک موجود است. از جمله راه‌حل‌های مسئله، به‌کارگیری ژئوسل بر روی سطوح خاک و بستر و پر کردن درون آن با مصالح است.

۲. برنامه‌ی آزمایش‌های آزمایشگاهی

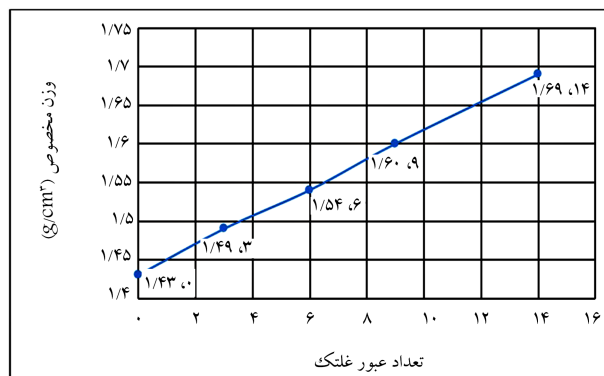
در پژوهش حاضر، ۶ مدل آزمایشگاهی خاکریز راه‌آهن به ارتفاع ۱۰ متر با عرض تاج ۴٫۶ متر (عرض متداول راه‌آهن در ایران) با مقیاس ۱:۲۰،^[۱۹] به ابعاد 2.4×3.5 متر ساخته شده است. در این راستا، ۶ مدل آزمایشگاهی شامل خاکریز بدون ژئوسل ELM^۰، خاکریز مسلح با یک لایه ژئوسل ELM^۱، خاکریز مسلح با ۲ لایه ژئوسل ELM^۲، خاکریز مسلح با ۳ لایه ژئوسل ELM^۳، خاکریز مسلح با ۴ لایه ژئوسل ELM^۴ و در نهایت خاکریز مسلح با ۵ لایه ژئوسل ELM^۵ ساخته شده است. لایه‌های ژئوسل به ترتیب از تراز تاج خاکریز به پایین کار گذاشته شده‌اند. در نهایت با قرار دادن تیر بارگذاری بر روی تاج خاکریز و اعمال بار توسط جک بارگذاری، نشست خاکریز از طریق ابرارگذاری بررسی و نتایج به‌صورت نمودار تنش - نشست با یکدیگر بررسی و مقایسه شده‌اند.

۱.۲. مشخصات مصالح مورد استفاده

مدل آزمایشگاهی خاکریز موردنظر به سه بخش بستر،^{۱۲} بستر اصلاح شده،^{۱۳} و بدنه‌ی خاکریز^{۱۴} تقسیم شده است. به همین منظور خاک مورد نیاز برای احداث بستر مدل از ماسه‌ی استاندارد (ماسه‌ی ۱۳۱ شسته شده‌ی فیروزکوه) با تراکم ۷۰٪ بوده است. در ابتدا، به منظور ساخت خاکریز با انتخاب نمونه‌های مختلف و انجام آزمایش دانه‌بندی با توجه به پارامترهای ذکر شده در مشخصات فنی و عمومی زیرسازی راه‌آهن (نشریه‌ی ۲۷۹) و همچنین آیین‌نامه‌ی UIC۷۱۹R^[۲۰]، خاک ماسه‌ی خوب دانه‌بندی شده در دسته‌ی QS۳ برای ساخت بدنه‌ی مدل انتخاب شد.^[۲۱، ۲۲]



شکل ۲. آزمایش چگالی در محل به منظور رسیدن به تعداد عبور غلتک. [۲۲]



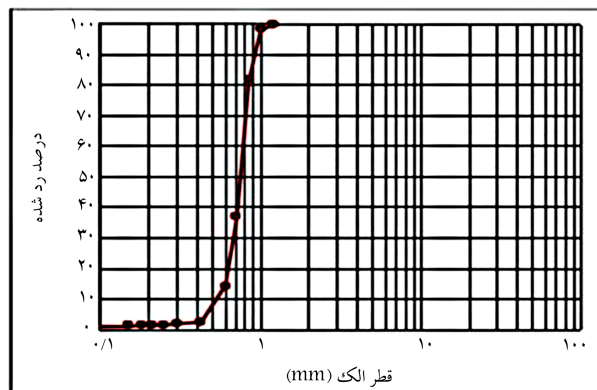
شکل ۳. تغییرات وزن مخصوص به تعداد عبور غلتک برای رسیدن به چگالی مورد نظر. [۲۲]

داخلی) استفاده شده، آزمایش طبق استاندارد ASTM D۳۰۸۰-۹۰، [۲۷]، [۲۸] صورت گرفته و پارامترهای مقاومت برشی برای چگالی نسبی ۷۰٪ به دست آمده است. برای انجام آزمایش یاد شده، ماسه‌ای موجود در ظرف 6×6 سانتی‌متر آزمایش ریخته شده و تا رسیدن به چگالی مورد نظر کوبیده شده و سپس آزمایش برش مستقیم انجام گرفته است، که نتایج آن به این شرح است:

$$c = 1/8 \text{ kN/m}^2, \phi = 38^\circ$$

آزمایش یاد شده با توجه به ماسه‌پی بودن خاک، یک آزمایش زهکشی شده با حاکم بودن تنش مؤثر است.

- پارامتر شکل‌پذیری ماسه‌ی بستر: به منظور تعیین مدول کشسانی ماسه‌ی بستر، آزمایش بارگذاری صفحه طبق استاندارد ASTM D۱۱۹۴-۹۴، [۲۸] روی مصالح ماسه‌ی بستر صورت گرفته است. بر این اساس، جعبه‌ی به ابعاد $120 \times 120 \times 100$ سانتی‌متر ساخته شد و آزمایش بر روی ماسه با چگالی نسبی ۷۰٪ صورت گرفت. به منظور انجام آزمایش، ماسه در لایه‌های ۵ سانتی‌متری در جعبه ریخته و تا رسیدن به ارتفاع ۱ متر غلتک‌زنی شده و سپس با قرار دادن صفحه‌ی فولادی با ابعاد 30×30 سانتی‌متر و ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر بر روی خاک، بارگذاری در ۳ گام به صورت سیکلی و افزایشی تا رسیدن به مرحله‌ی گسیختگی به خاک اعمال شد (شکل ۴). در نتیجه بارلحظه‌ی گسیختگی $3/3$ تن معادل تنش $0/36$ مگاپاسکال نظیر نشست ۶۲ میلی‌متر برای ماسه با چگالی نسبی ۷۰٪ ثبت شد. لازم به یادآوری است که آزمایش بارگذاری صفحه، نتایج دقیقی‌تر و مقادیر کمتری را نسبت به آزمایش سه محوری برای تعیین مدول کشسانی ارائه می‌دهد که به دلیل محصورشدگی نمونه توسط سیال در آزمایش سه محوری



شکل ۱. دانه‌بندی خاک بستر. [۲۴]

۱.۱.۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک بستر

- دانه‌بندی و تراکم خاک بستر: در ابتدا برای تعیین دانه‌بندی مصالح بستر، آزمایش دانه‌بندی مطابق با استاندارد ASTM D۴۲۲، [۲۳] انجام شده است. در شکل ۱، دانه‌بندی خاک بستر ماسه استاندارد ۶۰ نمایش داده شده است. ضرایب یکنواختی و انحناء به ترتیب مطابق روابط ۱ و ۲ برای چنین مصالحی برابر $1/45$ و $1/8$ تعیین شده است.

$$C_u = D_{60} / D_{10} \quad (1)$$

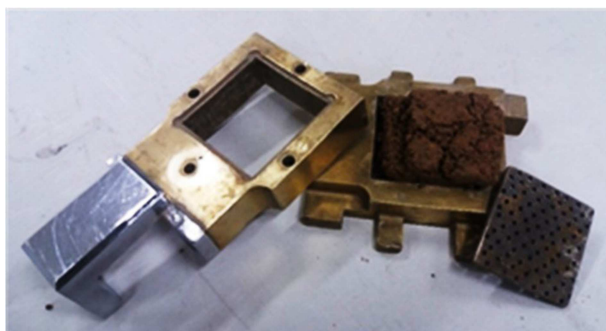
$$C_c = D_{40}^2 / (D_{60} \times D_{10}) \quad (2)$$

در پژوهش حاضر به دلیل آنکه خاک مورد استفاده، از نوع ماسه‌پی یکنواخت بود، آزمایش پروکتور قابل استفاده نبود و با لحاظ چگالی نسبی ۷۰٪ برای مصالح مذکور و با داشتن وزن مخصوص خشک کمیته در شل‌ترین حالت (ریختن ماسه در ظرف از ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر) مطابق استاندارد ASTM D۴۲۵۴، [۲۵] وزن مخصوص بیشینه در متراکم‌ترین حالت (قرار دادن ماسه‌ی ریخته شده بر روی میز لرزان) مطابق استاندارد ASTM D۴۲۵۳، [۲۶] به ترتیب برابر $1/43$ و $1/69$ گرم بر سانتی‌متر مکعب، وزن مخصوص خشک مصالح پس از تراکم از رابطه‌ی ۳ برابر $1/6$ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمده است.

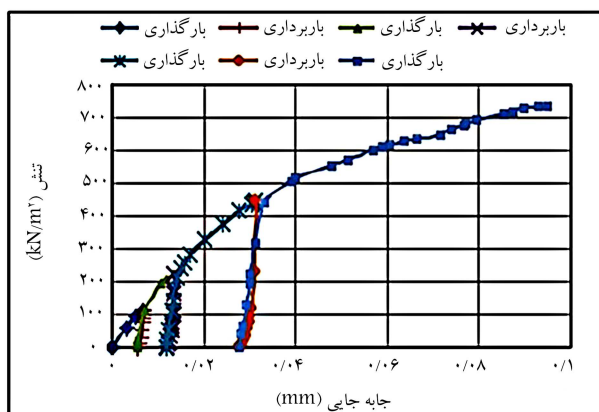
$$D_r = \frac{\gamma_d \max (\gamma_d - \gamma_{d \min})}{\gamma_d (\gamma_d \max - \gamma_{d \min})} \quad (3)$$

که در آن، γ_d وزن مخصوص خشک در محل بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب؛ $\gamma_{d \min}$ وزن مخصوص خشک در شل‌ترین وضعیت بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب؛ $\gamma_d \max$ وزن مخصوص خشک در متراکم‌ترین وضعیت بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، برای تعیین تعداد عبور غلتک ۱۲ کیلوگرمی آزمایشگاهی برای رسیدن به چگالی خشک به دست آمده، ماسه به ضخامت ۵ سانتی‌متر در یک جعبه‌ی فلزی ریخته شده و به ازاء تعداد عبورهای مختلف غلتک، میزان وزن مخصوص آن‌ها به دست آمده و این کار تا رسیدن به وزن مخصوص $1/6$ گرم بر سانتی‌متر مکعب ادامه یافته است. شکل ۳، رابطه‌ی آزمایشگاهی میان تعداد عبور غلتک را در برابر وزن مخصوص به دست آمده نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، برای رسیدن به چگالی نسبی ۷۰٪، نیاز به عبور ۹ پاس غلتک است.

- پارامترهای مقاومت برشی ماسه‌ی بستر: در پژوهش حاضر، از نتایج آزمایش برش مستقیم برای تعیین پارامترهای مقاومتی خاک (چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک



شکل ۶. نمایی از آزمایش بارگذاری صفحه. [۲۲]



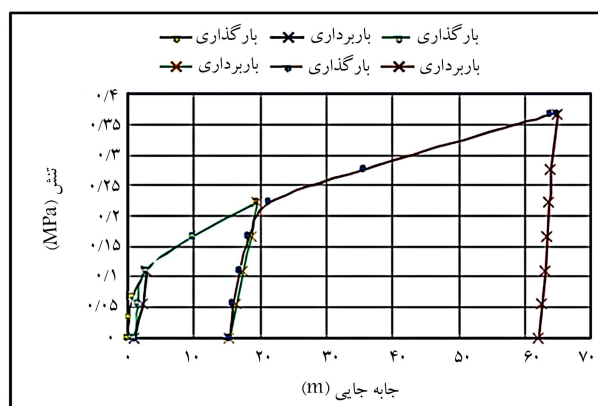
شکل ۷. نمودار آزمایش بارگذاری صفحه برای خاک خاکریز. [۲۲]

سانتی متر مکعب در رطوبت ۱۴/۱۴٪ به دست آمده است. برای ساخت خاکریز، با اجرای لایه‌هایی به ضخامت ۵ تا ۷ سانتی متر و اضافه کردن رطوبت بهینه برابر با ۱۴/۱۴٪ و عبور ۱۵ بار غلتک ۳۶ کیلوگرمی آزمایشگاهی، تراکم ۹۱٪ حاصل شده است.

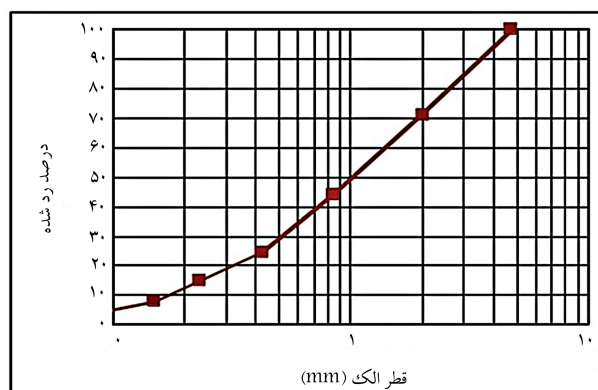
- پارامترهای مقاومت برشی مصالح خاکریز: به منظور تعیین مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک مورد نظر، نیاز به انجام آزمایش برش مستقیم است. براین اساس آزمایش برش مستقیم بر نمونه‌یی از خاک خاکریز با تراکم ۹۱٪ مطابق با استاندارد ASTM D6۳۸، [۲۷] انجام شد. نمونه به صورت دست نخورده با ابعاد ۶ × ۶ سانتی متر از درون خاک متراکم شده گرفته شد و جهت انجام آزمایش، درون دستگاه برش مستقیم قرار گرفت. مقدار چسبندگی برابر ۲۱ کیلو پاسکال و مقدار زاویه اصطکاک داخلی معادل ۲۹ درجه به دست آمد (شکل ۶). آزمایش برش مستقیم با توجه به ماسه‌یی بودن خاک، یک آزمایش زهکشی شده با حاکم بودن تنش مؤثر است.

- پارامتر شکل پذیری مصالح خاکریز: برای تعیین مقدار مدول کشسانی (E) خاک خاکریز، آزمایش بارگذاری صفحه طبق استاندارد ASTM D۱۱۹۴-۹۴، [۲۸] انجام شد. براین اساس، در جعبه‌یی به ابعاد ۱۲۰ × ۱۲۰ × ۱۰۰ سانتی متر، خاک در لایه‌های ۵ تا ۷ سانتی متری در جعبه ریخته و با غلتک ۳۶ کیلوگرمی تا رسیدن به ارتفاع ۱ متر کوبیده شد. سپس با قراردادن صفحه‌یی فولادی به ابعاد ۳۰ × ۳۰ سانتی متر و ضخامت ۲/۵ سانتی متر بر روی خاک خاکریز، بار در ۳ گام به صورت سیکلی و افزایشی اعمال شد. نتایج حاصل از آزمایش مذکور در شکل ۷ مشاهده می‌شود.

براین اساس با استفاده از رابطه‌ی ۴ و با جای‌گذاری پارامترهای فرمول ($\mu = ۰/۳$)



شکل ۴. منحنی تنش - تغییر شکل آزمایش بارگذاری صفحه بر روی ماسه‌ی بستر. [۲۲]



شکل ۵. منحنی دانه‌بندی خاک خاکریز. [۱۹]

است. نهایتاً مقدار مدول کشسانی با استفاده از رابطه‌ی ۴ به دست آمده است:

$$E = \frac{q}{\Delta H} \times B \times I_i \times (1 - \mu^2) \quad (۴)$$

که با جای‌گذاری مقادیر ضریب پواسون و ضرایب شکل به ترتیب برابر ۰/۳ و ۰/۳۹ در رابطه‌ی ۴، نهایتاً مقدار مدول کشسانی برای دومین سیکل بارگذاری برابر با ۱۴/۹ مگاپاسکال به دست آمده است. این تذکر لازم است که در روابط اخیر، E مدول بانگ مصالح، μ ضریب پواسون، B عرض صفحه‌ی بارگذاری، ΔH نشست خاک در زیر صفحه، q فشار بین صفحه و خاک و I_i ضرایب تأثیر هستند. [۱۹]

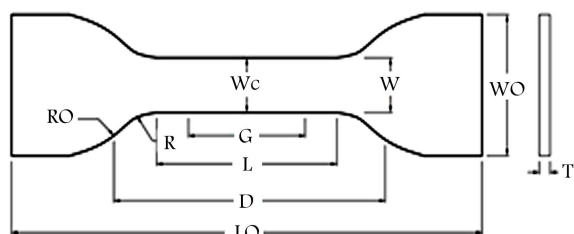
۲.۱.۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک خاکریز

- دانه‌بندی و تراکم مصالح خاکریز: جهت تعیین نوع و کیفیت دانه‌بندی، همچنین محاسبه‌ی مقادیر ضریب یکنواختی و انحناء، آزمایش دانه‌بندی بر روی خاک تشکیل‌دهنده‌ی خاکریز مطابق با استاندارد ASTM D۴۲۲، [۲۹] انجام شده است (شکل ۵). مقدار ضریب یکنواختی برابر ۸/۳۳ و مقدار ضریب انحناء برابر ۱/۰ به ترتیب مطابق روابط ۱ و ۲ به دست آمده است.

جهت تعیین معیاری برای متراکم‌سازی خاک خاکریز، نیاز به انجام آزمایش پروکتور مطابق با استاندارد ASTM D۶۹۸، [۳۰] است تا از این طریق مقدار درصد رطوبت بهینه و بیشینه‌ی چگالی خشک به دست آید. به همین منظور خاک مورد نظر در ۳ لایه ریخته و هر لایه با وزنه‌ی مخصوص، ۲۵ مرتبه کوبیده شده است. پس از انجام آزمایش، مقدار بیشینه‌ی چگالی خشک برابر با ۱/۹ گرم بر



شکل ۸. مراحل ساخت ژئوسل: (۱) ورق ژئوممبرین، (۲) برش ورق ژئوممبرین به صورت تسمه‌های ۵ سانتی‌متری، (۳) و (۴) شیارزنی ورق با فرز استیل بر، (۵) تسمه‌های شیارزنی شده، (۶) فرو بردن تسمه‌ها در یکدیگر و ساخت خانه‌های ژئوسل.



شکل ۹. شماتیک نمونه‌ی آزمایش کشش.



شکل ۱۰. نمودار تنش - کرنش ژئوممبرین.

و مجموع ۳۹/۰ برای ضرایب تأثیر خاک) مقدار مدول کشسانی برابر ۶ مگاپاسکال محاسبه شد. در جدول ۱، کلیه‌ی پارامترهای خاک‌های بستر و خاکریز ارائه شده است.

۳.۱.۲. نحوه‌ی ساخت و تعیین مشخصات ژئوسل

ژئوسل مورد استفاده در پژوهش حاضر از برش دادن ورق ژئوممبرین به صورت رول در ابعاد $۱۵۰۰۰ \times ۲۰۰۰ \times ۱/۶$ میلی‌متر در آزمایشگاه به صورت تسمه‌هایی به ابعاد $۲/۴$ متر در ۵ سانتی‌متر به دست آمده است. برای سرهم‌بندی و ساخت چشمه‌های ژئوسل، تسمه‌ها شیارزنی می‌شوند و به صورت عمود بر هم به داخل هم فرو می‌روند (عمق شیارها $۲/۵$ سانتی‌متر با ضخامت شیار $۱/۵$ میلی‌متر بود). فاصله‌ی شیارها ۵ سانتی‌متر برای ایجاد چشمه‌های ۵ سانتی‌متری برابر همین مقدار انتخاب شد. تسمه‌های برش داده شده، با دستگاه فرزو با صفحه استیل بر به ضخامت ۱ میلی‌متر شیارزنی شدند. در نهایت تسمه‌های شیارزنی شده را طبق ابعاد مورد استفاده در خاکریز به صورت تارو بود (عمودی و افقی) در هم فرو می‌کنند و ژئوسل ساخته می‌شود. تمامی مراحل ساخت در شکل ۸ نشان داده شده است.

- آزمایش کشش بر روی ژئوسل: بر روی ورق ژئوممبرین آزمایش کشش مطابق استاندارد ۲-۶۳۸-۰۲^[۲۱] انجام شد. نمونه‌ها به صورت دمبلی شکل شکل ۹، با ابعاد مطابق با جدول ۲ ساخته شدند. سرعت آزمایش و چگالی نمونه به ترتیب ۵ mm/min و ۹۰۰ kg/m^3 بود. نتایج آزمایش کشش مطابق نمودار تنش - کرنش در شکل ۱۰ نشان داده شده و مدول کشسانی از قسمت خطی نمودار برابر ۷۰ MPa به دست آمده است.

جدول ۱. مشخصات خاک‌های مصرفی.

مشخصات خاک	خاکریز	بستر
نوع خاک	SW	SP
$\phi (^{\circ})$	۲۹	۳۸
$C (kN/m^2)$	۲۱	۱/۸
$E (kN/m^2)$	۶۰۰۰	۱۴۹۰۰
$\gamma (kN/m^3)$	۱۷/۱	۱۵/۷
تعداد عبور غلتک	۱۵	۹
$D_r (\%)$	۹۱	۷۰
C_u	۸/۳۳	۱/۴۵
C_c	۱/۰۰۱	۱/۰۸

جدول ۲. ابعاد نمونه‌ی تحت کشش.

ابعاد (mm (in)	
۶ (۰/۲۵)	پهنای مقطع باریک W
۳۳ (۱/۳۰)	طول مقطع باریک L
۱۹ (۰/۷۵)	پهنای کلی WO
۱۱۵ (۴/۵)	طول کلی LO
۲۵ (۱/۰۰)	طول گیج G
۶۵ (۲/۵)	فاصله بین گیره‌ها D
۱۴ (۰/۵۶)	شعاع گردگوشگی R
۲۵ (۱/۰۰)	شعاع خارجی RO

جدول ۳. ضرایب مقیاس خاکریز و ژئوسل.

مقیاس شده	واقعی	آزمایشگاهی (۱g)	کلی	کمیت
عرض تاج خاکریز (m)	n_l	$1/n$	$1/n$	$1/n$
ارتفاع خاکریز (m)	n_l	$1/n$	$1/n$	$1/n$
سختی خاکریز (MPa)	n_G	$1/n^a$	$1/n^a$	$1/n^a$
سختی مصالح ژئوسل (MPa)	n_G	$1/n^a$	$1/n^a$	$1/n^a$

۲.۲. انتخاب ضرایب مقیاس

مدل‌سازی فیزیکی به منظور اعتباربخشی با فرضیه‌های نظری و تجربی انجام می‌شود. اصطلاح مدل‌سازی فیزیکی معمولاً با انجام آزمون فیزیکی سیستم‌های ژئوتکنیکی همراه است. جایی که در آن بی‌اعتمادی نسبت به تئوری یا تجربه و تحلیل‌ها به دلایل مفروضات بیش از حد فراگیر یا جنبه‌های مربوط به پاسخ مواد بسیار پیچیده وجود دارد، مدل‌سازی فیزیکی می‌تواند یک مسیر مناسب به نظر رسد. با این حال، بسیاری از مدل‌های فیزیکی در مقیاسی بسیار کوچک‌تر از نمونه‌ی اولیه ساخته می‌شوند، دقیقاً به این دلیل که به‌دست آوردن اطلاعات در مورد الگوهای مورد انتظار پاسخ، سریع‌تر و با کنترل دقیق‌تر بر سر جزئیات مدل نسبت به انجام آزمون در مقیاس واقعی خواهد بود. در جدول ۳، خلاصه‌ی ضرایب مقیاس ارائه شده است.^[۳۲]

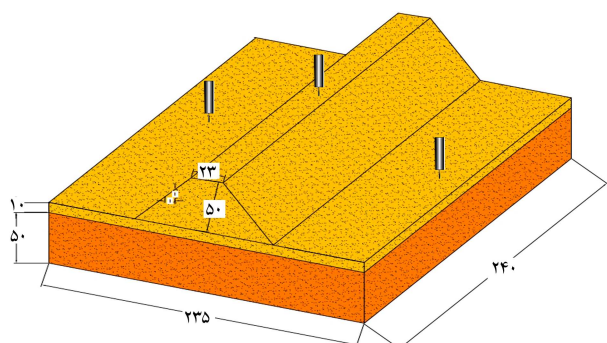
در جدول ۳، پارامتر n نسبت مشخصه‌ی مدل به نمونه‌ی آزمایشگاهی است. با انتخاب مقیاس ۱:۲۰ در پژوهش حاضر، تمامی ابعاد مدل از روی خاکریز واقعی قابل محاسبه خواهند بود. این تذکر لازم است که پارامتر α در پژوهش حاضر برابر ۱ در نظر گرفته شده است. با فرض سختی واقعی ژئوسل در شرایط اجرایی سختی ژئوسل مورد استفاده در پژوهش حاضر برابر 1400 MPa در نظر گرفته شده است.

۳.۲. ساخت مدل آزمایشگاهی

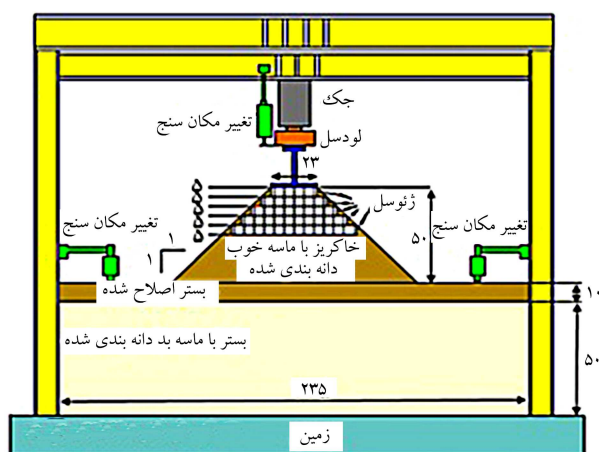
با توجه به مراحل قبلی، خاکریزی با ابعاد عرض تاج ۲۳ سانتی‌متر و طول ۲/۴ متر و شیب طرفین ۱:۱ و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر بر روی بستری به ابعاد 23.5×2.4 متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر معادل ۵۰ سانتی‌متر خاک ماسه‌ی بکناخت (SP) در کف اتاقک و ۱۰ سانتی‌متر خاک ماسه خوب‌دانه‌بندی‌شده (SW) مطابق خاکریز ساخته شد. تعداد نمونه‌های ساخت خاکریز ۶ عدد بود که ۵ خاکریز آن مسلح با ژئوسل و یکی از آن‌ها بدون ژئوسل اجرا شد. ۵ خاکریز مسلح از ۱ لایه تا ۵ لایه ژئوسل را پوشش می‌دادند که در ادامه نتایج آن‌ها ارائه شده است. شکل‌های ۱۱ الی ۱۳، به ترتیب هندسه‌ی خاکریز و محل نصب تغییر مکان‌سنج‌ها و اتاقک بارگذاری را نشان می‌دهد. برای ساخت مدل آزمایشگاهی، خاک ماسه‌ی بکناخت بستر در لایه‌های ۵ سانتی‌متر ریخته و با غلتک ۱۲ کیلوگرمی، ۹ بار عبور کوبیده شد. برای ساخت بستر اصلاح شده و بدنه‌ی خاکریز با خاک ماسه‌ی خوب‌دانه‌بندی شده، خاک در بیرون اتاقک مطابق با رطوبت بهینه، رطوبت‌دهی و پس از انتقال به درون اتاقک در لایه‌های ۵ تا ۷ سانتی‌متری متراکم شد. برای رسیدن به تراکم موردنظر از غلتکی با وزن ۳۶ کیلوگرم و ۱۵ بار عبور استفاده شد و در چند نوبت برای اطمینان از صحت اجرای آزمایش، چگالی در محل به روش مخروط ماسه انجام شد، که نتیجه‌ی آزمایش مطابق با چگالی مورد نظر بود.

۱.۳.۲. ابزار بندی مدل آزمایشگاهی

به منظور سنجش میزان نشست خاکریز و همچنین کنترل میزان بالادستی بستر در

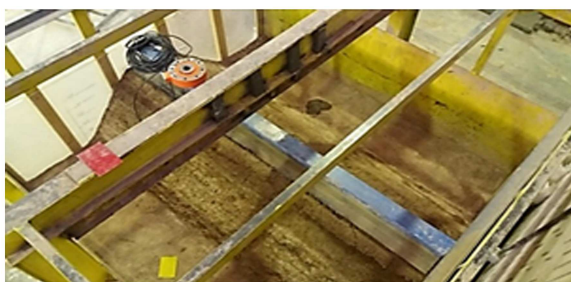


شکل ۱۱. خاکریز و ابعاد آن به سانتی‌متر.^[۲۱]



تمام ابعاد به سانتی متر است

شکل ۱۲. ابعاد خاکریز ساخته شده درون اتاقک بارگذاری.



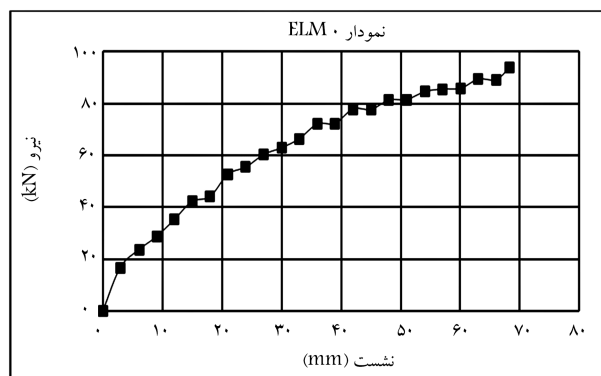
شکل ۱۳. اتاقک بارگذاری و ساخت خاکریز.

اطراف خاکریز از تغییر مکان‌سنج خطی در ۳ نقطه که مشخصات آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده، استفاده شده است. همچنین به منظور ثبت اطلاعات از دینال‌گر^{۱۶} TMR-۲۱۱ و نرم‌افزار وابسته به آن Ver. ۱.۰۷۰۲۰۰ - TMR۲۱۱ شرکت Tokyo Sokki Kenkyujo^[۳۳] که اطلاعات آن در جدول ۵ ارائه شده، استفاده شده است. برای اعمال نیرو از جک و دسته‌ی آن که جک بر روی لودسل قرار

۴.۲. نتایج آزمایش‌ها

-- نتایج آزمایش بارگذاری مدل ELM^0 : خاکریز ELM^0 خاکریز ساخته شده‌ی بدون ژئوسل است. در آزمایش بارگذاری، نیروسنج عدد $93/9 kN$ معادل فشار $170/1 kN/m^2$ و نشست $68/3 mm$ را نشان داد. همچنین میزان تغییرمکان‌های روی بستر در راست و چپ اتاقک بارگذاری به ترتیب $42/0 mm$ و $54/0 mm$ ثبت شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تغییرمکان (بالازدگی) بستر در طرفین خاکریز ناچیز بوده و نشانی از بالازدگی مشاهده نشده است. در شکل ۱۴، نمودار نیرو - جابه‌جایی برای مدل ELM^0 نشان داده شده است. هنگام بارگذاری، گسیختگی در قسمت فوقانی خاکریز رخ داده و سطح لغزش اندکی به نیمه‌ی پایینی خاکریز رسیده است (سمت چپ خاکریز) (شکل ۱۵). به تدریج با اعمال بارگذاری خاک درون خاکریز متراکم‌تر می‌شود و نشست پیدا می‌کند و کم‌کم به صورت خمربندی در می‌آید و ترک‌هایی در بدنه‌ی خاکریز که به صورت جابه‌جایی افقی است، به وجود می‌آورد.

-- نتایج آزمایش بارگذاری مدل ELM^1 : خاکریز ELM^1 ، خاکریز ساخته شده با یک لایه ژئوسل بود. ژئوسل اجرا شده، چشمه‌های 5×5 سانتی‌متری به ابعاد $2/3 \times 0/23$ متر داشته است. تراز قرارگیری لایه‌ی اول در بالای تاج زیر تیر بارگذاری قرار دارد. در آزمایش ELM^1 ، نیروسنج عدد $96/8 kN$ معادل فشار $175/36 kN/m^2$ و نشست $68/32 mm$ را نشان داد. همچنین میزان تغییرمکان‌های روی بستر در راست و چپ اتاقک بارگذاری به ترتیب $65/0 mm$ و $95/0 mm$ ثبت شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تغییرمکان (بالازدگی)



شکل ۱۴. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای خاکریز ELM^0 .



شکل ۱۵. نشست‌ها و سطوح گسیختگی در خاکریز ELM^0 .

می‌گیرد، استفاده شد. مشخصات لودسل 17 مورد استفاده در جدول ۶ ارائه و برای اعمال نیرو از جک 30 تن استفاده شده است.

۲.۳.۲. بارگذاری مدل و ثبت داده‌ها

پس از ساخت خاکریز، تیر آهن بر روی تاج خاکریز قرار گرفت و تجهیزات مطابق شکل بر روی آن نصب شد. بارگذاری از طریق جک دستی با سرعت تغییرشکل $1/5 mm/min$ به خاکریز اعمال و نتایج به صورت نیرو - زمان و جابه‌جایی - زمان به ترتیب از طریق لودسل نصب شده در زیر جک و تغییرمکان‌سنج‌ها توسط دیتالاگر در نرم‌افزار ثبت شدند. بارگذاری تا وقتی که تغییرمکان تاج خاکریز معادل 15% ارتفاع خاکریز (یعنی حدود $75 mm$) شد، ادامه داشت. تغییرمکان‌سنج‌ها، تغییرمکان تاج خاکریز و کناره‌های بستر را ثبت می‌کردند.

جدول ۴. مشخصات تغییرمکان‌سنج طولی. [۱۲، ۱۹]

مدل	CDP-۱۰۰
ظرفیت	$100 mm$
شدت خروجی	$5 mV/V \pm 0/1$ $(10000 \times 10^{-6} strain \pm 0/1)$
حساسیت	$33 \times 10^{-6} strain/mm$
میزان غیرخطی بودن	$0/8 RO$
نیروی فنر	$4/9 N$
فرکانس پاسخ	$3 Hz$
بازه‌ی درجه حرارت	$-10 \sim +60^\circ C$
مقاومت داخلی/خارجی	35° اهم
ولتاژ پیشنهادی	کمتر از 27
ولتاژ مجاز	$10 V$
وزن	$58 gr$
ضریب کالیبراسیون جهت معادل ارزی	$0/4 = (1000 / ظرفیت بر حسب cm)$
واحد‌ها با میلی‌متر در نرم‌افزار مرتبط	

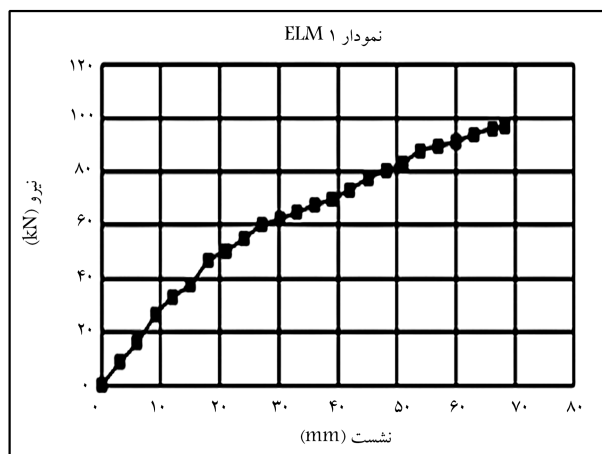
جدول ۵. مشخصات دیتالاگر. [۲۱]

مدل	TMR-211
تعداد کانال	8-ch (at the maximum)
نمونه‌برداری	$0/1 \sim 0/9 ms$ ($0/1 ms$ step) $0/1 \sim 0/9 ms$ ($0/1 ms$ step) $1 \sim 20000 ms$ ($0/1 ms$ step)
ولتاژ تحریک	27
وزن	$80 gr$
برق مصرفی	$DC 10 V \sim 30 V$, $18 A$ max (with $12 V$ DC supply, single) $AC 90 \sim 250 V$, $50/60 Hz$ $25 VA$ max. (option)

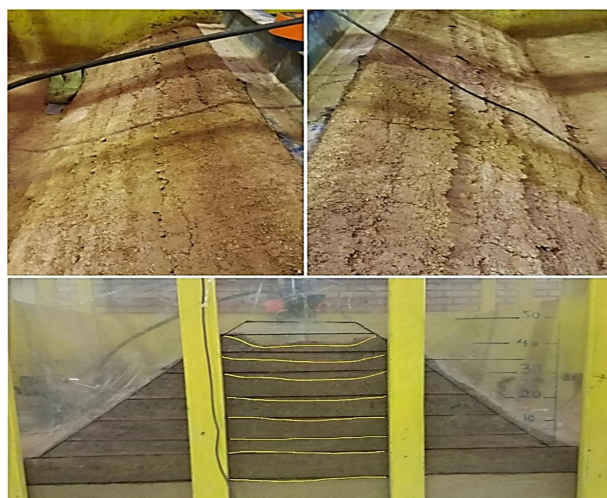
جدول ۶. مشخصات لودسل (نیروسنج). [۲۱]

TCLM-۲۰۰KNB	مدل
۲۰۰ kN	ظرفیت (A)
۲,۵ mV/V	شدت خروجی (A)
$(5000 \times 10^{-6} \text{ strain}) \pm \% / 5$	میزان غیرخطی بودن
RO $\% / 5$	فرکانس طبیعی
۵,۶ kHz	بازه‌ی درجه حرارت مجاز
-۳۰ ~ +۸۰ °C	ولتاژ تحریک
کمتر از ۱۰ V	پیشنهادهی (A)
۲۰ V	ولتاژ تحریک مجاز
۱۷ kg	وزن
۰,۰۴	ضریب کالیبراسیون جهت معادل سازی واحدها با کیلونیوتن در نرم افزار مرتبط

ظرفیت لودسل = ضریب کالیبراسیون
 $(1000 \times \text{ولتاژ تحریک دیتالاگر TML} \times \text{شدت خروجی}) /$
 $0,04 = 200 / (2,5 \times 2 \times 1000) =$ ضریب کالیبراسیون



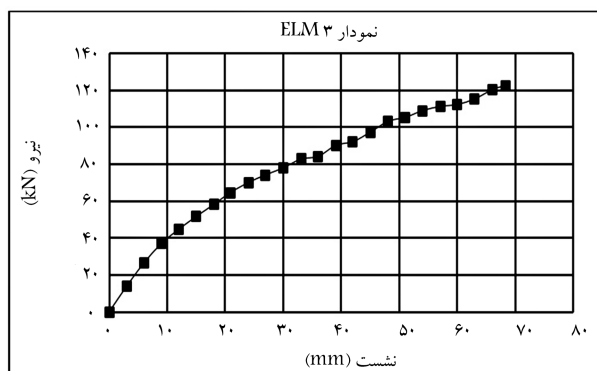
شکل ۱۶. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای خاکریز ELM1.



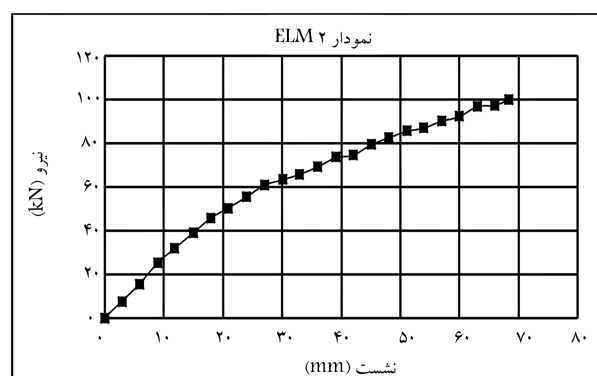
شکل ۱۷. نشست‌ها و سطوح گسیختگی در خاکریز ELM1.

بستر در طرفین خاکریز ناچیز بوده و نشانی از بالازدگی مشاهده نشده است. در شکل ۱۶، نمودار نیرو - جابه‌جایی برای مدل ELM1 مشاهده می‌شود. هنگام بارگذاری، گسیختگی برای سمت چپ خاکریز در قسمت فوقانی و برای سمت راست خاکریز، علاوه بر قسمت فوقانی در وسط بدنه‌ی خاکریز هم مشاهده شد و سطح لغزش اندکی به نیمه‌ی پایینی خاکریز رسیده است (سمت راست خاکریز) (شکل ۱۷) علت این تغییرات و سطوح لغزش به خاطر تراکم خاک حین بارگذاری است که علاوه بر متراکم کردن خاک، به علت ساختار سه‌بعدی ژئوسل و عملکرد محصورکنندگی آن، خاک درون خود را محصور و ترکیبی همانند دال ایجاد می‌کند و با اعمال بارگذاری این دال به پایین جابه‌جا می‌شود و به بدنه‌ی خاکریز جابه‌جایی وارد می‌کند که در نهایت منجر به ترک و ایجاد سطح لغزش می‌شود و به شکل خمربندی در می‌آید.

-- نتایج آزمایش بارگذاری مدل ELM2: خاکریز ELM2، خاکریز ساخته شده با ۲ لایه ژئوسل بود. ژئوسل اجرا شده، چشمه‌های ۵ × ۵ سانتی متری و لایه‌ی اول به ابعاد ۲/۴ × ۰/۲۳ متر و لایه‌ی دوم به ابعاد ۲/۴ × ۰/۳۳ متر به ترتیب در بالاترین قسمت خاکریز (تاج خاکریز) بر روی هم قرار داشتند. در این آزمایش نیروسنج عدد ۱۰۰/۱ kN معادل تنش ۱۸۱/۳ kN/m² و نشست ۶۸/۳ mm را نشان داد. همچنین میزان تغییر مکان‌های روی بستر در راست و چپ اتاقک بارگذاری به ترتیب ۷۹ mm و ۸۱ mm ثبت شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تغییر مکان (بالازدگی) بستر در طرفین خاکریز همچنان ناچیز است و نشانی از بالازدگی مشاهده نمی‌شود. در شکل ۱۸، نمودار نیرو - جابه‌جایی برای مدل ELM2 مشاهده می‌شود. هنگام بارگذاری، گسیختگی در قسمت فوقانی خاکریز در دو طرف رخ داده و عمده‌ی سطح لغزش به نیمه‌ی پایینی خاکریز رسیده است، که همان‌طوری که مشاهده می‌شود در فاصله‌ی ۲۰ سانتی متری از بستر اصلاح شده گسیختگی بزرگی در دو طرف وجود دارد (شکل‌های ۱۹ و ۲۰). فشاری که به خاکریز اعمال می‌شود، بخشی از آن صرف تراکم خاک درون ژئوسل می‌شود و بخش دیگر آن ترکیب خاک و ژئوسل را که به صورت دال عمل



شکل ۲۱. نمودار نیرو - جابه جایی برای خاکریز ELM3.



شکل ۱۸. نمودار نیرو - جابه جایی برای خاکریز ELM2.



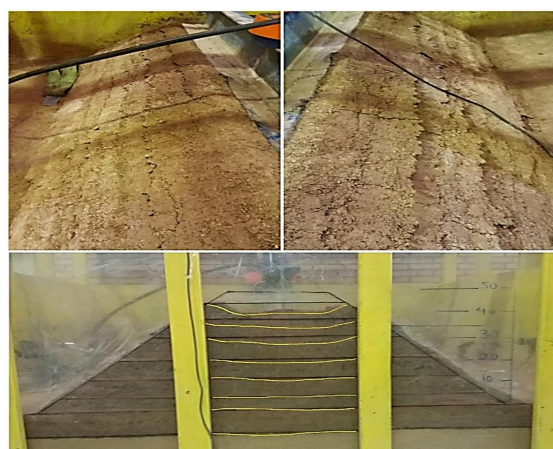
شکل ۲۲. نشست ها و سطوح گسیختگی در خاکریز ELM3.



شکل ۱۹. گسیختگی خاکریز ELM2 در ارتفاع ۲۰ سانتی متری از بستر اصلاح شده.

عدد $122,56 \text{ kN}$ معادل تنش $222,03 \text{ kN/m}^2$ و نشست $68,32 \text{ mm}$ را نشان داد. همچنین میزان تغییر مکان های روی بستر در راست و چپ اتاقک بارگذاری به ترتیب $2,09 \text{ mm}$ و $2,52 \text{ mm}$ ثبت شد. همان طور که ملاحظه می شود، تغییر مکان (بالا زدگی) بستر در طرفین خاکریز ناچیز بوده و نشانی از بالا زدگی مشاهده نشده است. در شکل ۲۱، نمودار نیرو - جابه جایی برای مدل ELM3 نشان داده شده است. هنگام بارگذاری، گسیختگی در قسمت فوقانی خاکریز در دو سطح، که مربوط به لایه های ژئوسل هستند، رخ داده و سطح لغزش اندکی به نیمه ی پایینی خاکریز رسیده است. همچنین ترک هایی عمودی در بدنه ی خاکریز در هر دو طرف مشاهده شد (شکل ۲۲) که از جمله علل آن سه لایه بودن ژئوسل است که ترکیب متراکم و دال مانند را ایجاد می کند و صلبیت آن باعث فشار آوردن به خاک های اطراف می شود و در لایه های بالایی، ایجاد ترک می کند.

-- نتایج آزمایش بارگذاری مدل ELM4: خاکریز ELM4 ساخته شده با ۴ لایه ژئوسل بود. ژئوسل اجرا شده، چشمه های 5×5 سانتی متری و لایه ی اول به ابعاد $2,4 \times 0,23$ متر، لایه ی دوم به ابعاد $2,4 \times 0,33$ متر، لایه ی سوم به ابعاد $2,4 \times 0,43$ متر و لایه ی چهارم به ابعاد $2,4 \times 0,53$ متر است. لایه های ژئوسل به ترتیب از تاج خاکریز تا تراز 20 cm زیر تاج، پشت سر هم اجرا می شوند. در این آزمایش نیرو سنج عدد $130,16 \text{ kN}$ معادل تنش $235,8 \text{ kN/m}^2$ و نشست $68,32 \text{ mm}$ را نشان داد. همچنین میزان تغییر مکان های روی بستر در راست و چپ اتاقک بارگذاری به ترتیب $2,06 \text{ mm}$ و $2,63 \text{ mm}$ ثبت شد.



شکل ۲۰. نشست ها و سطوح گسیختگی در خاکریز ELM2.

می کند به پایین رانده و منجر به فشار به لایه های زیرین می شود که در نهایت جابه جایی افقی نتیجه ی آن است و ترک در بدنه را به وجود می آورد.

-- نتایج آزمایش بارگذاری مدل ELM3: خاکریز ELM3 ساخته شده با ۳ لایه ژئوسل بود. ژئوسل اجرا شده، چشمه های 5×5 سانتی متری و لایه ی اول به ابعاد $2,4 \times 0,23$ متر، لایه ی دوم به ابعاد $2,4 \times 0,33$ متر و لایه ی سوم به ابعاد $2,4 \times 0,43$ متر است. سه لایه ی مذکور به ترتیب از تراز تاج خاکریز تا 15 cm زیر تاج خاکریز را پوشش می دهد. در آزمایش مذکور، نیرو سنج

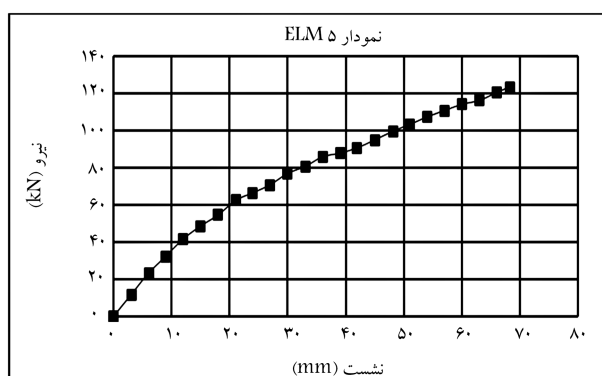
همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تغییرمکان (بالازدگی) بستر در طرفین خاکریز ناچیز بوده و نشانی از بالازدگی مشاهده نشده است. در شکل ۲۳، نمودار نیرو - جابه‌جایی برای مدل ELM۴ نشان داده شده است. هنگام بارگذاری، گسیختگی در قسمت فوقانی خاکریز رخ داده و سطح لغزش برای هر دو طرف در لایه‌ی اول ژئوسل و در سمت چپ گسیختگی به زیر لایه‌ی سوم هم رسیده است (شکل ۲۴). با خاصیت محصورکنندگی خاک توسط ژئوسل مقاومت برشی خاکریز افزایش می‌یابد. همچنین شکل ۲۳، نسبت به نمودارهای قبلی در نشست بالای 35 mm مقادیر فشار بیشتر و سختی بیشتر خاکریز را نشان می‌دهد (برای مشاهده این خاصیت مقایسه نتایج در شکل ۲۷ را مشاهده کنید).

-- نتایج آزمایش بارگذاری مدل ELM۵: خاکریز ELM۵ ساخته شده با ۵ لایه ژئوسل بود. ژئوسل اجرا شده، چشمه‌های 5×5 سانتی‌متری با لایه‌ی اول به ابعاد $2/4 \times 0/23$ متر، لایه‌ی دوم به ابعاد $2/4 \times 0/33$ متر، لایه‌ی سوم به ابعاد $2/4 \times 0/43$ متر، لایه‌ی چهارم به ابعاد $2/4 \times 0/53$ متر و لایه‌ی پنجم به ابعاد $2/4 \times 0/63$ متر است. لایه‌های ژئوسل به ترتیب از لایه‌ی اول تا پنجم از تاج خاکریز تا تراز 25 cm از بالای تاج خاکریز پشت سر هم اجرا می‌شوند. در این آزمایش نیروسنج عدد $123/44\text{ kN}$ معادل تنش $223/62\text{ kN/m}^2$ و نشست $68/28\text{ mm}$ را نشان داد. همچنین میزان تغییرمکان‌های روی بستر در راست و چپ اتاقک بارگذاری به ترتیب $2/18\text{ mm}$ و $2/59\text{ mm}$ ثبت شد. این تذکر لازم است که عدد نیروسنج با خاکریز با ۵ لایه ژئوسل تقریباً کمی بیشتر از خاکریز با ۳ لایه ژئوسل شده است و از مقدار خاکریز با ۴ لایه ژئوسل

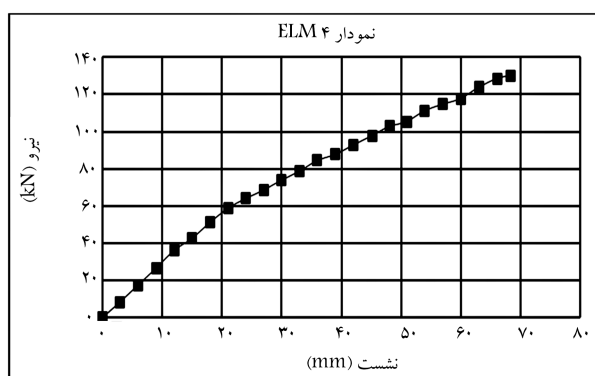
کمتر شده است که حاکی از تأثیر کم لایه‌ی پنجم در خاکریز است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تغییرمکان (بالازدگی) بستر در طرفین خاکریز ناچیز بوده و نشانی از بالازدگی مشاهده نشده است. در شکل ۲۵، نمودار نیرو - جابه‌جایی برای مدل ELM۵ مشاهده می‌شود. هنگام بارگذاری، گسیختگی در قسمت فوقانی خاکریز یعنی در لایه‌ی اول و دوم ژئوسل رخ می‌دهد و شروع به گسیختگی در لایه‌ی سوم در سمت چپ مشاهده می‌شود (شکل ۲۶). این مورد شبیه به آزمایش ۳ لایه‌ی ژئوسل است، که گسیختگی در لایه‌ی دوم بوده و به لایه‌ی سوم رسیده است؛ پس می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر لایه‌های چهارم و پنجم در آزمایش ذکرشده ناچیز است و باربری در حد همان خاک بدون ژئوسل دارند.

به‌عنوان جمع بندی نتایج به‌دست آمده در بخش حاضر می‌توان گفت با افزایش تعداد لایه‌های ژئوسل با فرض تغییرمکان یکسان، افزایش ظرفیت باربری خاکریز مشاهده می‌شود که با توجه به جدول ۷، این روند تا لایه‌ی چهارم افزایشی و لایه‌ی پنجم نسبت به لایه‌ی چهارم کاهش می‌یابد. در شکل ۲۷، نتایج تنش - نشست تمامی آزمایش‌ها به صورت یک‌جا مشاهده می‌شود. بیشینه‌ی افزایش ظرفیت باربری نسبت به حالت بدون ژئوسل $28/6\%$ است.

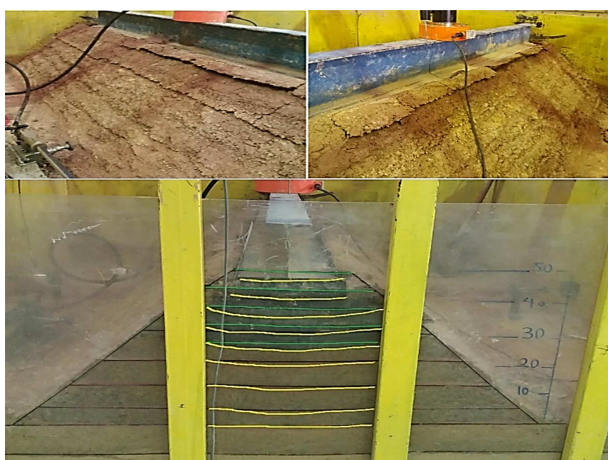
با توجه به جدول ۷، روند افزایش تا لایه‌ی دوم به طور یکنواخت و پس از آن به صورت جهشی افزایش می‌یابد، این پدیده تا نشست 20 mm ، زیاد محسوس نیست، اما با افزایش بار وارده، نشست زیاد می‌شود و لایه‌های ژئوسل سوم تا پنجم اثر خود را نشان خواهند داد. اغلب ترک‌های افقی گسیختگی در شیب خاکریز در لایه‌ی اول و دوم بوده و بعضاً به لایه‌ی سوم هم رسیده است. با افزایش



شکل ۲۵. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای خاکریز ELM۵.



شکل ۲۳. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای خاکریز ELM۴.



شکل ۲۶. نشست‌ها و سطوح گسیختگی در خاکریز ELM۵.



شکل ۲۴. نشست‌ها و سطوح گسیختگی در خاکریز ELM۴.

جدول ۷. مقایسه‌ی نتایج بار - نشست خاکریزها.

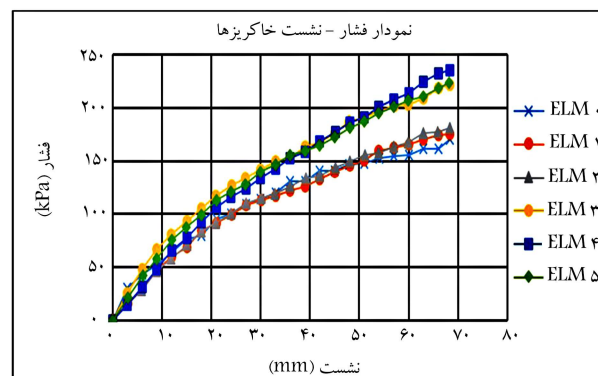
نام خاکریز	نشست (mm)	نیرو (kN)	بار وارده (kN/m ²)	درصد افزایش بار	کاهش نشست
ELM ^۰	۶۸/۳۰	۹۳/۹	۱۷۰/۱۰	۰	۰
ELM ^۱	۶۸/۳۲	۹۶/۸۰	۱۷۵/۳۶	۳/۱	۷/۷۶
ELM ^۲	۶۸/۳۰	۱۰۰/۱۰	۱۸۱/۳۰	۶/۶	۹/۲۲
ELM ^۳	۶۸/۳۲	۱۲۲/۵۶	۲۲۲/۰۳	۳۰/۵۳	۳۶/۳۰
ELM ^۴	۶۸/۳۲	۱۳۰/۱۶	۲۳۵/۸۰	۳۸/۶۰	۳۷/۰۰
ELM ^۵	۶۸/۲۸	۱۲۳/۴۴	۲۲۳/۶۲	۳۱/۴۶	۳۵/۵۸

جدول ۸. مقایسه‌ی نتایج نشست چپ و راست و تعداد لایه‌ها.

نام خاکریز	نشست راست (mm)	نشست چپ (mm)	لایه‌ی				
			اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم
ELM ^۰	۰/۴۲	۰/۵۴	-	-	-	-	-
ELM ^۱	۰/۶۵	۰/۹۵	*	-	-	-	-
ELM ^۲	۰/۷۹	۱/۸۱	*	*	-	-	-
ELM ^۳	۲/۰۹	۲/۵۲	*	*	*	-	-
ELM ^۴	۲/۰۶	۲/۶۳	*	*	*	*	-
ELM ^۵	۲/۱۸	۲/۵۹	*	*	*	*	*

جدول ۹. ضریب اطمینان نسبی خاکریز و سختی آن.

نام خاکریز	سختی (kN/m ²)	ضریب اطمینان نسبی خاکریز با ژئوسل نسبت به بدون ژئوسل
ELM ^۰	۰/۰۵۹۲	-
ELM ^۱	۰/۰۵۸۷	۱/۰۳۱
ELM ^۲	۰/۰۵۹۹	۱/۰۶۶
ELM ^۳	۰/۰۷۳۱	۱/۳۰۵
ELM ^۴	۰/۰۶۷۳	۱/۳۸۶
ELM ^۵	۰/۰۶۹۸	۱/۳۱۵



شکل ۲۷. مقایسه‌ی نتایج ۶ مدل آزمایشگاهی.

باربری بیشینه‌ی خاکریزهای مسلح به ظرفیت باربری خاکریز غیرمسلح است، ارائه شده است. همچنین سختی خاکریز که از بخش خطی اولیه نمودار به دست می‌آید، در جدول گنجانده شده است.

۳. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی ظرفیت باربری خاکریزهای راه‌آهن با استفاده از ژئوسل انجام شد. با مرور مطالعات پیشین، تأثیر تعداد لایه و تراز قرارگیری ژئوسل در کنترل پایداری و نشست خاکریزهای راه‌آهن مشخصاً بررسی نشده است، لذا در پژوهش حاضر، ۶ مدل آزمایشگاهی با مقیاس ۱:۲۰ از خاکریز ۱۰ m انجام شد. سپس با انجام بارگذاری تا لحظه‌ی گسیختگی خاکریز، نتایج بار و تغییرمکان

تعداد لایه‌ها، خاکریز حالت خمربندی پیدا کرده است، که حاکی از گوه و سطح گسیختگی در لایه‌های مذکور بوده است. ترک‌هایی عمودی در کل خاکریزها وجود داشت، اما ترک در لایه‌ی سوم به بعد مشهودتر بود. نشست‌های چپ و راست، مطابق جدول ۸ اندک بوده و نشانی از بالازدگی مشاهده نشده و قابل چشم‌پوشی بوده است. انتظار می‌رفت که نتایج، افزایش باربری و نشست کمتری را نشان می‌دادند که یکی از علل کم بودن درصد افزایش بار به دلیل مصالح ژئوسل بوده است که نسبت به ژئوسل واقعی نرم‌تر و صاف‌تر است، و نتایج کمتری را نشان داد. اتصالات ژئوسل واقعی به‌صورت جوش و یا چسب بوده و نسبت به ژئوسل ساخته شده محکم‌تر بوده است. اتصالات ژئوسل ساخته شده به‌صورت کام و زبانه و فرورونده در شیار یکدیگر هستند و آن استحکام لازم را به وجود نمی‌آورند. در جدول ۹، ضرایب اطمینان نسبی خاکریز که حاصل تقسیم ظرفیت

ثبت شد. با بررسی شکل‌ها و نمودارهای آزمایشگاهی در مورد به‌کارگیری ژئوسل در خاکریزها، عمده‌ی این نتایج به‌دست آمده است:

۱. افزایش تعداد لایه‌های ژئوسل باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود که در پژوهش حاضر، روند مذکور تا ۴ لایه، افزایشی و لایه‌ی پنجم نسبت به لایه‌ی چهارم، کاهش یافته است.

۲. با جای‌گذاری لایه‌ی اول ۱/۳٪، لایه‌ی دوم ۶/۶٪، لایه‌ی سوم ۵۳/۳۰٪، لایه‌ی چهارم ۳۸/۶۰٪ و لایه‌ی پنجم ۳۱/۴۶٪ نسبت به خاکریز بدون ژئوسل افزایش ظرفیت باربری حاصل شده است. بیشینه‌ی افزایش ظرفیت باربری نسبت به حالت بدون ژئوسل، ۳۸/۶۰٪ بوده است.

۳. با جای‌گذاری لایه‌ی اول ۷/۷۶٪، لایه‌ی دوم ۹/۲۲٪، لایه‌ی سوم ۳۶/۳۰٪، لایه‌ی چهارم ۳۷/۰٪ و لایه‌ی پنجم ۳۵/۵۸٪ نسبت به خاکریز بدون ژئوسل، کاهش نشست مشاهده شده است. بیشینه‌ی کاهش نشست نسبت به حالت بدون ژئوسل، ۳۷٪ بوده است.

۴. روند افزایش باربری تا لایه‌ی دوم به طور یکنواخت و پس از آن به صورت جهشی افزایش می‌یابد، این پدیده تا نشست 20 mm زیاد محسوس نیست،

- اما با افزایش بار وارده نشست زیاد می‌شود و لایه‌های ژئوسل سوم تا پنجم، اثر خود را نشان خواهند داد.
۵. در تمام آزمایش‌ها، سطح لغزش دایره‌یی و سطحی است و عمیق نیست و شیروانی خاک را در بالای شیب قطع می‌کند که با توجه به گسیختگی مذکور، ترک‌های افقی در شیب خاکریز در لایه‌ی اول و دوم بوده و بعضاً به لایه‌ی سوم هم رسیده است.
۶. در طول انجام آزمایش‌ها و پس از پایان آن‌ها، نشست‌های چپ و راست خاکریز روی بستر اندک بوده و نشانی از بالازدگی مشاهده نشده است.
۷. با افزایش لایه‌های ژئوسل، سختی خاکریز افزایش یافته است که به علت ایجاد ترکیب خاک محصور در درون ژئوسل بوده است.
۸. خاک درون ژئوسل پس از اندکی بارگذاری متراکم شده و سیستم ترکیبی متراکمی همانند دال ایجاد کرده است که تحت خمش قرار می‌گیرد و می‌تواند بار را تحمل کند.
۹. استفاده از ورق ژئوممبرین به علت نرم و صاف بودن و اتصال کام و زبانه در پروژه‌ی حاضر باعث شده است که نتایج، مقادیر کمتری نسبت به ژئوسل‌های دوپنت و دیگر انواع ژئوسل داشته باشند.

پانویس‌ها

1. stabilization
2. compaction
3. grouting
4. deep mixing
5. jet grouting
6. nailing
7. tie back
8. micro pile
9. stone column
10. geocell
11. accelerated pavement testing
12. subgrade
13. modified subgrade
14. embankment
15. american standard for testing & materials
16. data logger
17. load cell

منابع (References)

1. Organization, P.B. (<http://www.amar.org.ir/Portals/0/PeopertyAgent/461/Files/6852/Rili%20Mahaneh.xisx>).
2. Zhang, L., Zhao, M., Shi, C. and et al. "Bearing capacity of geocell reinforcement in embankment engineering", *Geotextiles and Geomembranes*, **28**(5), pp. 475-482 (2010).
3. Leshchinsky, B. and Ling, H.I. "Numerical modeling of behavior of railway ballasted structure with geocell confinement", *Geotextiles and Geomembranes*, **36**, pp. 33-43 (2013).
4. Bathurst, R.J. and Knight, M.A. "Analysis of geocell reinforced-soil covers over large span conduits", *Computers and Geotechnics*, **22**(3), pp. 205-219 (1998).
5. Bush, D., Jenner, C. and Bassett, R. "The design and construction of geocell foundation mattresses supporting embankments over soft grounds", *Geotextiles and Geomembranes*, **9**(1), pp. 83-98 (1990).
6. Cowland, J. and Wong, S. "Performance of a road embankment on soft clay supported on a geocell mattress foundation", *Geotextiles and Geomembranes*, **12**(8), pp. 687-705 (1993).
7. Zhou, H. and Wen, X. "Model studies on geogrid-or geocell-reinforced sand cushion on soft soil", *Geotextiles and Geomembranes*, **26**(3), pp. 231-238 (2008).
8. Yang, X., Han, J., Pokharel, S.K. and et al. "Accelerated pavement testing of unpaved roads with geocell-reinforced sand bases", *Geotextiles and Geomembranes*, **32**, pp. 95-103 (2012).
9. Dash, S.K. and Shivadas, A.S. "Performance improvement of railway ballast using geocells", *Indian Geotechnical Journal*, **42**(3), pp. 186-193 (2012).
10. Mandal, J. and Gupta, P. "Stability of geocell-reinforced soil", *Construction and Building Materials*, **8**(1), pp. 55-62 (1994).
11. Madhavi Latha, G., Rajagopal, K. and Krishnaswamy, N. "Experimental and theoretical investigations on

- geocell-supported embankments", *International Journal of Geomechanics*, **6**(1), pp. 30-35 (2006).
12. Leshchinsky, B. and Ling, H. "Effects of geocell confinement on strength and deformation behavior of gravel", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **139**(2), pp. 340-352 (2012).
13. Sitharam, T. and Hegde, A. "Design and construction of geocell foundation to support the embankment on settled red mud", *Geotextiles and Geomembranes*, **41**, pp. 55-63 (2013).
14. Mehdipour, I., Ghazavi, M. and Moayed, R.Z. "Numerical study on stability analysis of geocell reinforced slopes by considering the bending effect", *Geotextiles and Geomembranes*, **37**, pp. 23-34 (2013).
15. Davarifard, S. and Tafreshi, S.N.M. "Plate load tests of multi-layered geocell reinforced bed considering embedment depth of footing", *Procedia Earth and Planetary Science*, **15**, pp. 105-110 (2015).
16. Tafreshi, S.M., Sharifi, P. and Dawson, A. "Performance of circular footings on sand by use of multiple-geocell or-planar geotextile reinforcing layers", *Soils and Foundations*, **56**(6), pp. 984-997 (2016).
17. Biabani, M.M., Indraratna, B. and Ngo, N.T. "Modelling of geocell-reinforced subballast subjected to cyclic loading", *Geotextiles and Geomembranes*, **44**(4), pp. 489-503 (2016).
18. Biabani, M.M., Ngo, N.T. and Indraratna, B. "Performance evaluation of railway subballast stabilised with geocell based on pull-out testing", *Geotextiles and Geomembranes*, **44**(4), pp. 579-591 (2016).
19. Esmaeili, M. and Arbabi, B. "Railway embankments stabilization by tied back-to-back system", *Computers and Geotechnics*, **67**, pp. 110-120 (2015).
20. UIC, E. "Track-bed layers for railway lines, UIC code 719 R", International Union of Railways, Paris, France (1994).
21. Esmaeili, M. and Arbabi, B. "Laboratory and numerical investigation on performance of tieback system for increasing loading capacity of railway embankments", Faculty of railway Engineering, Iran University of Science & Technology: Iran (2014).
22. Esmaeili, M., Gharouni Nik, M. and Khajehei, H. "Laboratory investigation of mechanical behavior of embankments rested on loose sandy grounds stabilized with soil cement columns", Faculty of Railway Engineering, Iran University of Science & Technology: Iran (2013).
23. ASTM, D., 422-63 (2007), Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (2011).
24. Esmaeili, M. and Khajehei, H. "Mechanical behavior of embankments overlying on loose subgrade stabilized by deep mixed columns", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **8**(5), pp. 651 (2016).
25. ASTM, D., 4254-00, Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density, 1 (2006).
26. ASTM, D., 4253, "Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table", ASTM International, West Conshohocken, PA (2006).
27. ASTM, D., 3080-90: *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions*, Annual Book of ASTM Standards, 4, pp. 290-295 (1994).
28. ASTM, D., 1194-94: *Standard Test Method for Bearing Capacity of Soil for Static Load and Spread Footings*, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken (2003).
29. Standard, A., "D422-63 Standard test method for particle-size analysis of soils", ASTM International, West Conshohocken. doi, 10, p. 1520 (2007).
30. ASTM, D., "698 Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort", ASTM International, 100 (2003).
31. ASTM, D., "638 Standard test method for tensile properties of plastics", ASTM, West Conshohocken, PA (2003).
32. Wood, D.M. "Geotechnical modelling", CRC Press, 1 (2003).
33. Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. ([http:// www.tml.jp/e/product/instrument/instrumeny_sub/tmr211.html](http://www.tml.jp/e/product/instrument/instrumeny_sub/tmr211.html)).