

بررسی رفتار سیکلی پی‌های نواری در ماسه‌های تقویت شده با ژئوسل و خرده لاستیک

محمودرضا محمدی (کارشناس ارشد)

سید مجدالدین میر محمد حسینی* (استاد)

محسن کارگر (دکتری)

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران شهریه، زمستان ۱۳۹۶
دوری ۲ - ۳۳، شماره ۱/۴، ص. ۵۹-۴۹

ژئوسل یکی از انواع مسلح کننده‌های سه بعدی خاک است که به لحاظ ساختار سلولی شکل خود، عملکرد مطلوبی از لحاظ افزایش ظرفیت باربری خاک از خود نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر، به منظور مطالعه رفتار سیکلی و فراسیکلی پی‌های نواری واقع بر خاک ماسه‌ای مسلح شده با ژئوسل، از یک مدل فیزیکی کوچک مقیاس استفاده شده است که چشمه‌های ژئوسل به کار رفته در آن با استفاده از فقط ماسه و خرده لاستیک و نیز مخلوط خاک - ذرات لاستیکی، با شرایط تراکمی کنترل شده پر شده است. نتایج نشان داده‌اند که در شرایط تراکمی یکسان با جایگزین کردن بخشی از ماسه با خرده‌های لاستیک با ابعاد بزرگ‌تر از دانه‌های ماسه (با درصد اختلاط خاص)، کاهش تغییر شکل‌های خمیری و افزایش تغییر شکل‌های کشسان ایجاد می‌شود؛ لذا با در نظر گرفتن شرایط هندسی ژئوسل و درصد اختلاط بهینه، استفاده از مخلوط ماسه - خرده لاستیک (با دانه بندی درشت‌تر از دانه‌های خاک)، ضمن بهره‌مندی از ضایعات لاستیکی، به بهبود رفتار سیکلی، افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پی‌های نواری منجر می‌شود.

واژگان کلیدی: ژئوسل، خرده لاستیک، بارگذاری سیکلی، ظرفیت باربری، پی نواری، نشست خمیری، نشست کشسان.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از ژئوسنتتیک‌ها به عنوان مسلح کننده‌ی خاک شالوده‌ها به خصوص در بسترهای سست بسیار رواج یافته است. یکی از مؤثرترین انواع مسلح کننده‌ها جهت بهبود برخی از رفتارهای مکانیکی خاک (بالاخص خاک‌های دانه‌بی)، ژئوسل است که با توجه به ساختار سلولی شکل خود و تأمین محصورشدگی لازم برای خاک داخل سلول‌ها، عملکرد بسیار مناسبی از لحاظ افزایش ظرفیت باربری و سختی خاک مسلح در مقایسه با مسلح کننده‌های مسطح، مانند ژئوتکستایل و ژئوگرید از خود نشان می‌دهد.^[۱] هر چند متأسفانه استفاده از آن به دلیل نبود استاندارد طراحی و نیز نداشتن شناخت کافی از رفتار خاک مسلح شده با ژئوسل، در کشور ما کمتر به آن توجه شده است. عملکرد مطلوب ژئوسل به عنوان عنصر تسلیح خاک، وابسته به موارد زیادی است که از پارامترهای کلیدی آن سختی و مقاومت کششی دیواره‌های ژئوسل و نیز جنس و تراکم مصالح پرکننده‌ی سلول‌های آن در کنار سایر پارامترهای مسلح کننده و بستر زیرین خاک مسلح است. در این خصوص پژوهشگران زیادی به مطالعه‌ی رفتار خاک مسلح شده با ژئوسل و بررسی نقش پارامترهای متنوع در عملکرد آن پرداخته‌اند؛ از جمله در سال ۱۹۹۴ یک

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۷/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۲/۱، پذیرش: ۱۳۹۵/۲/۷.

m.r.mohammadi@aut.ac.ir
smmirhos@aut.ac.ir
mohsenkargar@aut.ac.ir

مقطع راه‌آهن با ۳/۵ متر طول و ۷ متر عرض جهت بررسی بستر مسلح شده با ژئوسل حاوی خرده سنگ ساخته و بارهای تناوبی به میزان ۹۰ کیلو نیوتن و بسامد ۱۱ هرتز به ریل‌ها اعمال و نتیجه گرفته شده است که وجود ژئوسل در کاهش تغییر شکل‌های بستر راه (بالاخص زمانی که ظرفیت باربری خاک بستر پایین است) بسیار مؤثر است، به شرطی که تراکم مصالح داخل سلول‌ها کافی باشد.^[۲]

همچنین در سال ۲۰۱۰، با انجام مطالعات آزمایشگاهی، تأثیر ۵ عامل کلیدی (شکل، نوع و عمق قرارگیری ژئوسل، ضخامت ناحیه‌ی مسلح شده و کیفیت مصالح درون ژئوسل) در رفتار بسترهای مسلح شده با ژئوسل تک سلولی تحت بارهای استاتیکی و مقایسه‌ی آن با ماسه‌ی مسلح شده با ژئوسل چند سلولی بررسی شده و بخشی از نتایج آن حاکی از این بوده است که بستر مسلح شده با ژئوسل و مدول کشسان بیشتر، سختی و ظرفیت باربری بیشتری خواهد داشت.^[۳] در سال ۲۰۱۰، نیز با هدف مقایسه‌ی استفاده از ژئوتکستایل سه بعدی و ژئوتکستایل صفحه‌ای، با انجام آزمایش‌هایی از طریق اعمال بار تناوبی بر یک مدل شالوده‌ی نواری واقع بر خاک دانه‌بی نشان داده شده است که بیشینه‌ی نشست شالوده تحت بار تناوبی معادل ۲۰٪ بار استاتیکی، در صورت استفاده از مسلح کننده‌ی صفحه‌ای و سه بعدی به ترتیب حدود ۴۵٪ و ۶۰٪ کاهش می‌یابد؛ در نتیجه، در صورت استفاده از ژئوتکستایل سه بعدی در مقایسه با ژئوتکستایل صفحه‌ای با همان ویژگی‌ها و همان وزن، اثر تسلیح

از خرده‌های لاستیک یا پودر لاستیک با شرایط تراکمی کنترل شده پر شده و در انتها، یک لایه ماسه به ضخامت ۵ میلی‌متر (معادل با ۱۰٪ عرض مدل فونداسیون نواری) بر سطح فوقانی ژئوسل پر شده بارش شده است. فرایند بارگذاری بر مدل فونداسیون نواری واقع بر خاک مسلح بدین صورت بوده است که در مرحله اول، بارگذاری استاتیکی با نرخ ثابت و تا میزان بار تعریف شده انجام شده و بعد از آن تا ۱۰۰۰ سیکل، فرایند بارگذاری - باربرداری تناوبی با بسامد ۰/۴۶ هرتز بر نمونه اعمال شده و در نهایت به منظور بررسی رفتار فراسیکلی مجدداً بارگذاری استاتیکی با نرخ ثابت تا لحظه گسیختگی صورت پذیرفته است. در طول فرایند بارگذاری میزان نشست پی و مقادیر بار اعمالی توسط سیستم ابزار دقیق تعبیه شده، با سرعتی حدود ۵۰ داده در ثانیه خوانده و ثبت شده است.

۲. آمار تولید ضایعات لاستیک و مشکلات زیست

محیطی

گسترش صنعت حمل و نقل مانند سایر صنایع همواره تبعات زیست‌محیطی فراوانی به همراه داشته است که مشکلات ناشی از انباشته شدن سالانه‌ی میلیون‌ها حلقه لاستیک ضایعاتی در مناطق مختلف جهان نمونه‌ی بارزی از آنهاست. مثلاً در سال ۱۹۹۱، طی مدارک منتشرشده توسط آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده (EPA)^۳، سالانه ۲۷۹ میلیون حلقه لاستیک به بیش از ۲ میلیارد لاستیک موجود در آن زمان اضافه شده است که این رقم در سال ۱۹۹۸ تا میزان سالانه ۲۸۵ میلیون حلقه افزایش یافته است.^[۱۶] در سال ۲۰۰۷، نیز بیش از ۳۰۳ میلیون تیر در ایالات متحده‌ی آمریکا تولید شده است که ۲۷۰ میلیون از آنها بازیافت شده و حدود ۱۶٪ از لاستیک‌های فرسوده‌ی بازیافتی، در مهندسی عمران به مصرف رسیده‌اند. آمارها حاکی از این است که مجموع لاستیک‌های مصرفی در اتحادیه‌ی اروپا نیز بیش از دو میلیون و هفتصد هزار تن بوده است. در کانادا نیز، سالانه بیش از ۸ میلیون حلقه تیر فرسوده می‌شوند، که فقط ۳۰٪ از آنها به مراکز دفع زباله وارد می‌شوند. در انگلستان سالانه حدود ۵۰ میلیون حلقه تیر یعنی حدود ۵/۰ میلیون تن تیر مستهلک می‌شوند که طبق قوانین جدید از ماه جولای سال ۲۰۰۶، تیرهای مذکور حتی به صورت خردشده نیز، حق ورود به مراکز دفن را ندارند و باید به مصارف دیگری برسند.

در کشور ایران نیز طبق گزارشی در سال ۱۳۸۵،^[۱۷] آمار تولید لاستیک فرسوده سالانه بیش از ۲۵۰۰۰۰ تن بوده است. طبق گزارش‌های آماری مذکور، حدود ۳۵٪ لاستیک‌های فرسوده در موارد گوناگونی مانند: روکش کردن لاستیک‌های فرسوده، مخلوط آسفالت، بازیافت و رب‌کلیم رابر^۴ (کانوچوی احیا شده) مصرف و باقی‌مانده‌ها دیو و انباشت می‌شوند؛ همچنین در گزارش مذکور اشاره شده است که در ایران سرانه‌ی تیر فرسوده به ازاء هر ۵ تا ۶ نفر، یک حلقه لاستیک است. طبق آمار جدیدتری که در نوشتاری در سال ۱۳۹۰ منتشر شده است،^[۱۸] میزان تولید لاستیک داخل کشور و واردات آن در سال ۱۳۸۷، برابر با ۳۱۲۰۰۰ تن بوده است که به صورت تخمینی سالانه ۳۰٪ از آن به صورت لاستیک فرسوده انباشت شده است.

سهم بخش‌های مختلف چرخه‌ی حیات تایرها از آثار منفی زیست‌محیطی آنها در شکل ۱ نشان داده شده است.^[۸] مطابق شکل ۱، فقط ۱۴٪ از سهم آثار منفی زیست‌محیطی تایرها مربوط به تولید آنها می‌شود و بیشترین سهم به آثار زیان‌بار تایرهای باقی‌مانده اختصاص دارد (چیزی حدود ۶۵٪) که به تنهایی از مجموع تمامی موارد دیگر بیشتر است.^[۸]

ماسه به‌ویژه در کاهش نشست شالوده و بالا آمدگی سطح خاک بستر شالوده به مراتب بیشتر است و نیز حالت پایدار خمیری^۱، سریع‌تر و با تعداد سیکل‌های بارگذاری - باربرداری کمتری اتفاق می‌افتد.^[۵] همچنین در سال ۲۰۱۲، با انجام آزمایش‌هایی بر روی بستر غیرمسلح و مسلح شده با ژئوسل تحت بارگذاری چرخ کامیون، میزان شیارافتادگی بستر و کرنش مسلح‌کننده‌ها بررسی شده و نتایج مطالعات مذکور نشان داده است که در مسیر واقع در زیر چرخ‌های کامیون، چشمه‌های ژئوسل بعضاً دچار گسیختگی اتصالات (گسیختگی سلولی) شده و در اثر آن، چشمه‌های ژئوسل از هم جدا شده‌اند و این امر منجر به فرار توده‌ی خاک محصورشده در داخل سلول‌ها شده است و نیز با افزایش ارتفاع ژئوسل، میزان شیارافتادگی بستر مسلح شده با آن در مسیر چرخ‌ها کاهش یافته است.^[۶] در سال ۲۰۱۳، نیز آزمایش‌های بزرگ مقیاس بر روی خاک مسلح شده با ژئوسل تحت اعمال فرایند بارگذاری - باربرداری سیکلی با هدف بررسی اثر چرخ و وسایط نقلیه و مدول عکس‌العمل بستر انجام شده و نتایج آن‌ها نشان داده است که استفاده از ژئوسل (جهت تسلیح بستر) منجر به کاهش نشست‌های خمیری بستر می‌شود و با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری، نرخ افزایش نشست تجمعی خمیری کاهش می‌یابد.^[۷]

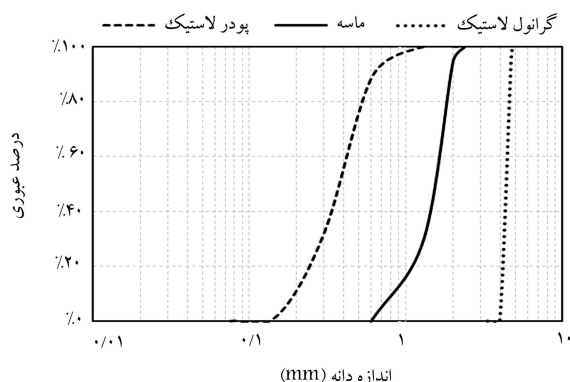
در مورد ضایعات تایرهای فرسوده نیز باید گفت در سال‌های اخیر رشد روزافزون تولید لاستیک و متعاقباً ازدیاد تایرهای فرسوده در طبیعت، مشکلات متنوع و خسارات فراوان زیست‌محیطی را ایجاد کرده است. در این خصوص، از میان سهم بخش‌های مختلف چرخه‌ی حیات تایرها از آثار منفی زیست‌محیطی آن‌ها، چیزی حدود ۶۵٪ به آثار زیان‌بار تایرهای باقی‌مانده در طبیعت اختصاص دارد.^[۸] این در حالی است که در حیطه‌ی مهندسی ژئوتکنیک با اختلاط مناسب فرآورده‌های حاصل از ضایعات لاستیک با خاک و استفاده از آن به همراه ژئوستتیک‌ها، می‌توان به نقاط قوت بسیاری برای مخلوط حاصل دست یافت که از جمله‌ی آن‌ها ظرفیت بالای جذب انرژی،^[۹] کاهش تنش انتقال‌یافته در عمق توده،^[۱۱] افزایش مقاومت برشی،^[۱۲] افزایش تغییر شکل‌های برگشت‌پذیر و کاهش تغییر شکل‌های خمیری است.^[۱۳]

همچنین در سال ۲۰۱۲، آزمایش‌هایی به منظور روشن شدن جنبه‌های مختلف اثر مخلوط «خاک - نوارهای لاستیکی» در ظرفیت باربری پی‌ها انجام و برای این منظور از یک مدل فیزیکی به ابعاد $65 \times 60 \times 60 \text{ cm}^3$ استفاده شده و نتایج نشان داده است که در صورت استفاده از مخلوط خاک - خرده لاستیک، رفتار تنش - نشست و نحوه‌ی گسیختگی خاک زیر پی، علاوه بر نوع خاک و تراکم آن، به درصد خرده لاستیک و ضخامت مخلوط بستگی خواهد داشت؛ و نیز صرف‌نظر از میزان نشست پی (S/B)، با افزایش درصد خرده لاستیک تا یک میزان مشخص (مقدار بهینه)، ظرفیت باربری پی افزایش و پس از آن کاهش یافته است.^[۱۵]

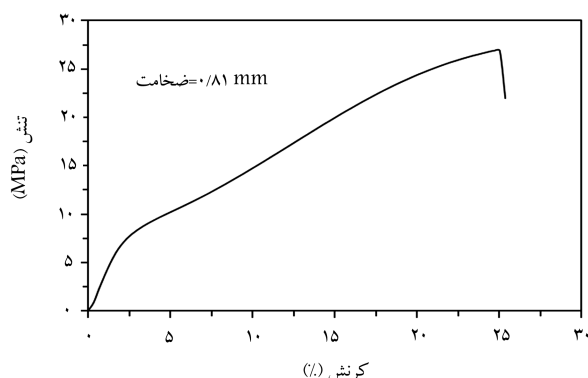
علی‌رغم مطالعات صورت گرفته در خصوص رفتار خاک مسلح شده با ژئوسل و نیز خاک مخلوط شده با خرده لاستیک، کمتر به بررسی ترکیب موارد مذکور جهت تسلیح خاک پرداخته شده است؛ لذا در پژوهش حاضر به بررسی اثراندازی ذرات لاستیک مخلوط شده با ماسه به عنوان پرکننده‌ی چشمه‌های ژئوسل در رفتار سیکلی و فراسیکلی خاک مسلح شده با ژئوسل با استفاده از یک مدل فیزیکی کوچک مقیاس^۲، شامل یک فونداسیون صلب واقع بر خاک مسلح در آزمایشگاه دینامیک خاک دانشگاه صنعتی امیرکبیر پرداخته شده است. در تمامی آزمایش‌های پژوهش حاضر از ژئوسل‌های مشابه (تولید شده توسط پژوهشگران پژوهش حاضر) و با شرایط هندسی و مکانیکی یکسان استفاده شده است که در موقعیت مشخصی از نمونه‌های ماسه‌پی (آماده شده با روش بارش) قرار گرفته‌اند. در آزمایش‌های مختلف، سلول‌های ژئوسل با فقط ماسه و خرده لاستیک، و مخلوط خاک حاوی درصدی



شکل ۲. گرانول لاستیک، ماسه و پودر لاستیک.



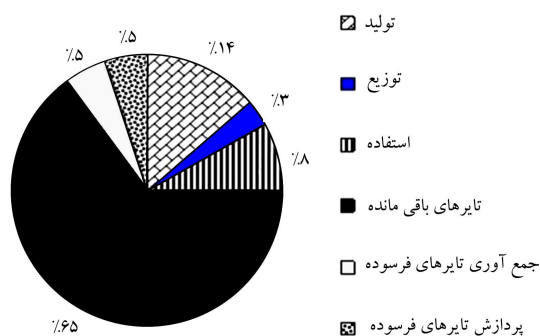
شکل ۳. منحنی دانه‌بندی ماسه، گرانول و پودر لاستیک.



شکل ۴. منحنی تنش - کرنش کششی، برای ژئوتکستایل مورد استفاده.

۳.۳. ژئوسل

یکی از دغدغه‌هایی که در پژوهش آزمایشگاهی حاضر در مقایسه با مطالعات مشابه وجود داشته است، عدم دسترسی به نمونه‌ی کوچک مقیاس ژئوسل^۷ با مقاومت مطلوب اتصالات آن بوده است. لذا با توجه به اهمیت موضوع، نوع خاصی از ژئوسل جهت انجام پروژه‌ی حاضر برای اولین بار ابداع و تولید شده است که اتصالات دوختی و مقاوم داشته و در نتیجه به دلیل عدم آسیب دیدگی از اتصالات، این اطمینان حاصل شده است که بیشینه‌ی مقاومت کششی ژئوتکستایل و در نتیجه، بیشینه‌ی مقاومت غیرفعال^۸ در داخل سلول‌ها، در پروسه‌ی باربری بسیج شده و آسیب دیدگی ژئوسل در حین باربری به هیچ وجه از سستی اتصالات نبوده است. در تولید ژئوسل‌ها از ژئوتکستایل بافته شده^۹ استفاده شده است که از جنس پلی‌استر و «مقاومت کششی نهایی» آن برابر با $21/8 kN/m$ و مدول سکانت آن در کرنش ۵٪ برابر با $72 kN/m$ بوده است. نتایج آزمایش کشش ژئوتکستایل (مطابق با استاندارد $ASTM D6637$) که توسط پژوهشگران پژوهش حاضر انجام شده است (شکل ۴). لازم به ذکر است که تصویر و مشخصات هندسی ژئوسل مصرفی جهت انجام آزمایش‌ها در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۱. سهم مراحل مختلف چرخه‌ی حیات تایرها از اثرات منفی زیست‌محیطی آن‌ها. [۸]

۳. مصالح مورد استفاده در پژوهش

مصالح مورد استفاده در پژوهش حاضر، خاک ماسه‌یی، ژئوسل تهیه شده از منسوج صنعتی، خرده لاستیک و پودر لاستیک هستند که در ادامه توضیحات لازم در این خصوص ارائه شده است.

۱.۳. گرانول لاستیک و پودر لاستیک

در پژوهش حاضر، ضایعات لاستیک به دو صورت پودر و گرانول کوچک مقیاس استفاده شده است. پودر لاستیک مصرفی به روش صنعتی و گرانول به صورت دستی (به شکل شبه‌استوانه‌یی با مقطع دایره‌یی) تهیه شده است. نسبت اندازه‌ی دانه‌های ماسه به دانه‌های لاستیک در نحوه‌ی رفتار مخلوط ماسه - ذرات لاستیک بسیار تأثیرگذار خواهد بود؛ لذا جهت معرفی شرایط نسبت ابعادی، از پارامتری با عنوان ضریب اندازه‌ی نسبی (R_s) مطابق روابط ۱ و ۲ استفاده شده است:

$$R_s(\text{گرانول لاستیک}) = \frac{D_{50}(\text{گرانول لاستیک})}{D_{50}(\text{ماسه})} = \frac{4/45}{1/54} = 2/88 \quad (1)$$

$$R_s(\text{پودر لاستیک}) = \frac{D_{50}(\text{پودر لاستیک})}{D_{50}(\text{ماسه})} = \frac{0/38}{1/54} = 0/24 \quad (2)$$

در شکل ۲، تصاویر دانه‌های لاستیک^۵، ماسه و پودر لاستیک^۶ مورد استفاده در پژوهش حاضر نشان داده شده است. در پژوهش حاضر، در حالات استفاده از مخلوط ماسه‌ی حاوی ذرات لاستیک، درصد پودر یا دانه‌های لاستیک موجود در مخلوط به طور ثابت ۱۰٪ در نظر گرفته شده و وزن مخصوص نمونه‌های مخلوط ماسه - ذرات لاستیک نیز برابر با $1/47 gr/cm^3$ γ بوده است.

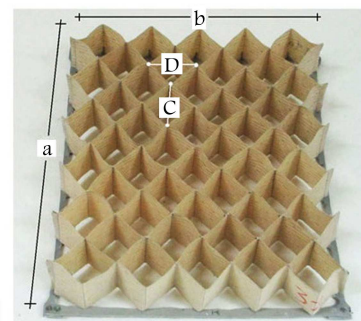
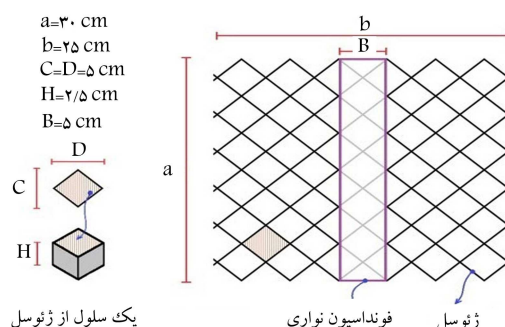
۲.۳. ماسه

ماسه‌ی مورد استفاده از نوع سیلیسی تیز گوشه بوده و از سنگ سیلیس معدن فیروزکوه تهیه شده است که از محصولات شرکت تاوان سیلیس است. جهت حذف اثر چسبندگی و آب، ماسه‌ی مصرفی ابتدا شسته (تا ریزدانه‌ها حذف شوند) و سپس کاملاً خشک شده است. ماسه‌ی مذکور دانه‌بندی یکنواخت داشته است، تا در حین بارش، تفکیک دانه‌ها رخ ندهد و تحلیل نتایج نیز آسان‌تر شود. چکیده‌ی مشخصات ماسه‌ی مصرفی در جدول ۱ و منحنی دانه‌بندی ماسه، خرده لاستیک و پودر لاستیک در شکل ۳ ارائه شده است.

جدول ۱. چکیده مشخصات ماسه‌ی مصرفی.

آزمایش	مقدار	علامت اختصاری	استاندارد آزمایش
ASTM D۴۲۲	۲/۱۸	C_u	ضریب یکنواختی
	۱/۳۸	C_c	ضریب انحناء منحنی دانه‌بندی
	۱/۵۴	D_{50}	اندازه‌ی متوسط دانه‌ها (mm)
ASTM D۸۵۴	۲/۶۷	G_s	توده‌ی ویژه
ASTM D۴۲۵۳	۰/۸۷۸	e_{max}	تخلخل بیشینه
	۰/۵۷۵	e_{min}	تخلخل کمینه
	۱/۴۲	γ_{dmin}	وزن مخصوص خشک کمینه (kN/m^3)
	۱/۷۱	γ_{dmax}	وزن مخصوص خشک بیشینه (kN/m^3)
	۷۲	D_r	چگالی نسبی * (%)
ASTM D۲۲۱۶	°	ω	درصد رطوبت (%)

* توجه: چگالی نسبی برای ماسه‌ی متراکم ارائه شده است.



شکل ۵. تصویر ژئوسل و پلان شماتیک آن نسبت به فونداسیون نواری.

شکل ۶. تصویر کلی از اجزاء مدل فیزیکی مورد استفاده در پژوهش حاضر.

و ضخامت ۷۵ میلی‌متر بوده است که مدلی از یک فونداسیون نواری صلب بوده و جهت مدل‌سازی شرایط واقعی تماسی فونداسیون با خاک، از کاغذ سنباده در کف آن استفاده شده است.

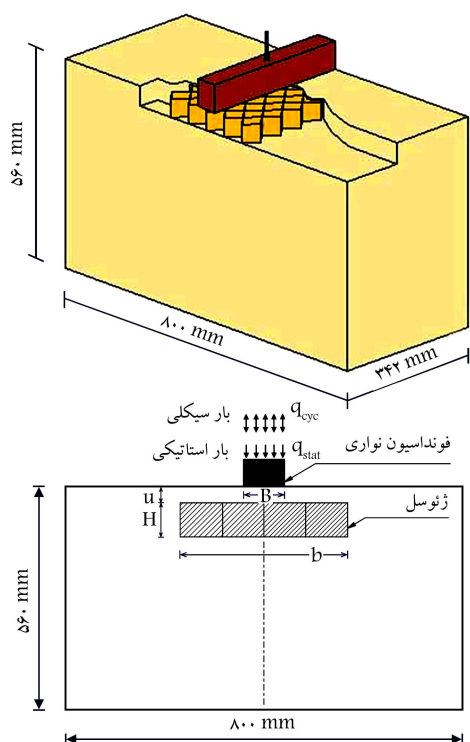
- محفظه‌ی اصلی خاک در دستگاه آزمایش، با ابعاد داخلی به طول ۱۲۵cm، عرض ۸cm و ارتفاع ۷۵cm، کلیه‌ی شرایط موردنظر را به لحاظ صلبیت و امکانات داشته است. به‌منظور انجام آزمایش‌های پژوهش حاضر، محفظه‌ی با ابعاد داخلی به طول ۸cm، عرض ۳۴/۲cm و ارتفاع ۷۵cm در داخل محفظه‌ی اصلی تعبیه شده است که کف آن و دیواره‌ی قرارگیری ابزار از ورق فلزی به ضخامت ۱mm و سایر دیواره‌های محفظه از ورقه‌ی پلکسی ساخته شده و به‌وسیله‌ی مجموعه‌ی پروفیل‌های فولادی مهار شده‌اند تا ضمن جلوگیری از ایجاد تغییر شکل‌های جانبی (خارج از صفحه)، تا حد امکان اصطکاک بین مصالح خاکی و دیواره‌های محفظه کاهش یابد و اثرات اصطکاک شرایط مرزی که از عوامل ایجاد خطا در نتایج است، به میزان کمینه‌ی ممکن برسد. قاب محفظه نیز از پروفیل‌های فولادی UNP۸ و ۸۰ × ۸ ساخته شده است. با توجه به اینکه طول محفظه ۱۶ برابر از عرض شالوده بزرگ‌تر است، مرزهای جانبی مدل فیزیکی تأثیری در نتایج آزمایش‌ها نخواهند گذاشت.

۴. دستگاه آزمایش، آماده‌سازی نمونه‌ها و اثرات مقیاس

۴.۱. دستگاه آزمایش

اجزاء کلی دستگاه آزمایش عبارت‌اند از: مدل فونداسیون نواری، محفظه‌ی خاک، قاب بارگذاری و ملحقیات آن، دستگاه بارش، سیستم بارگذاری و سیستم قرائت و ثبت اطلاعات که تصویر کلی مجموعه‌ی مذکور در شکل ۶ ارائه و در ادامه، نیز به اختصار توضیحات لازم بیان شده است:

- مدل فونداسیون، مکعب مستطیلی از جنس آلومینیوم با عرض ۵cm، طول ۳۴cm،



شکل ۷. ابعاد کلی نمونه و موقعیت قرارگیری مدل فونداسیون نواری و ژئوسل.

کننده باید در شرایط واقعی به ترتیب λ و λ^2 برابر مقادیر متناظر در مدل آزمایشگاهی باشند [۲۰].

به منظور لحاظ کردن اثرات مقیاس در پژوهش حاضر از مصالح ژئوسل تجاری استفاده نشده و به جای آن، مصالح‌کننده‌ها به صورت دستی از مصالح ژئوتکتایل تاری - پودی با کاربردهای سبک‌تر غیرعمرانی ساخته شده‌اند تا هم از لحاظ مشخصات هندسی (ضخامت، ارتفاع و قطر) و هم از لحاظ مشخصات مکانیکی (سختی و مقاومت نهایی) با مدل کوچک مقیاس در نظر گرفته شده برای انجام آزمایش‌ها هم‌خوانی داشته باشند.

در آزمایش‌های ارائه شده در نوشتار حاضر، ژئوسل‌های مورد استفاده از مصالحی با مدول 275 kN/m در سطح کرنش ۲٪ و مدول 72 kN/m در سطح کرنش ۵٪

جدول ۲. چکیده‌ی برنامه‌ی آزمایش‌ها.

ردیف	ابعاد ژئوسل (cm)				مصالح پرکننده‌ی سلول‌ها		چگالی مصالح (gr/cm^3)			بارگذاری مرحله‌ی		
	a	b	C	H			پرکننده	بستر		اول	دوم	سوم
۱	۰	۰	۰	۰	(غیرمسلح)		-	۱٫۶۳	✓ گسیختگی	استاتیکی اولیه	سیکلی	استاتیکی
۲	۳۰	۲۵	۵	۲٫۵	ماسه‌ی متراکم		۱٫۶۳	۱٫۶۳	✓ گسیختگی		۷۵ kPa	(فراسیکلی)
۳	۳۰	۲۵	۵	۲٫۵	ماسه‌ی متراکم		۱٫۶۳	۱٫۶۳	✓ گسیختگی	✓	۰٫۴۶ Hz	۱ kPa/s
۴	۳۰	۲۵	۵	۲٫۵	گرانول لاستیک		۰٫۶	۱٫۶۳	✓ گسیختگی	✓		
۵	۳۰	۲۵	۵	۲٫۵	۹۰٪ ماسه + ۱۰٪ پودر لاستیک		۱٫۴۷	۱٫۶۳	✓ گسیختگی	✓		
۶	۳۰	۲۵	۵	۲٫۵	۹۰٪ ماسه + ۱۰٪ گرانول لاستیک		۱٫۴۷	۱٫۶۳	✓ گسیختگی	✓		
۷	۳۰	۲۵	۵	۲٫۵	ماسه‌ی سست		۱٫۴۷	۱٫۶۳	✓ گسیختگی	✓		

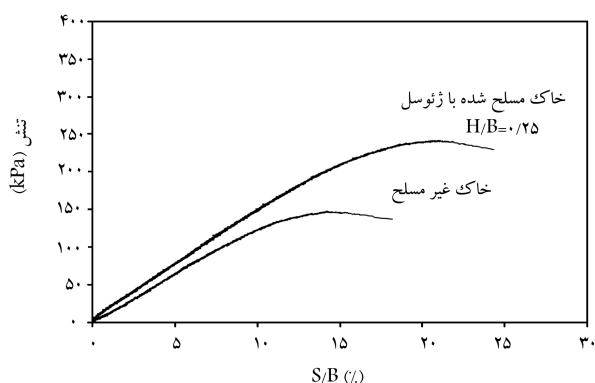
- دستگاه بارش به‌طورکلی از تکیه‌گاه، مخزن متحرک (با قابلیت نصب صفحات مشبک در خروجی آن) و سیستم بالابر تشکیل شده است. در انتهای قیف مخزن بارش، دریچه‌یی با ابعاد $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ با قابلیت نصب دو کشو تعبیه شده است که امکان نصب درب تحتانی مخزن و صفحات مشبک جهت کنترل نرخ بارش ماسه و در نتیجه کنترل چگالی نسبی نمونه‌ی ماسه را فراهم می‌کند.
- جهت تولید و اعمال بار قائم استاتیکی و سیکلی، از سیستم هوای فشرده 1° استفاده شده است و امکان بارگذاری با نرخ‌ها و بسامدهای مختلف وجود دارد.
- برای اندازه‌گیری تغییرمکان فونداسیون، از یک LVDT با کورس 100 mm و دقت 0.05 mm استفاده شده است که قابلیت حرکت با سرعت‌هایی تا 10 m/s را دارد. مدل اندازه‌گیری نیرو 1° نیز از نوع S شکل و با ظرفیت 2.5 N ، جهت اندازه‌گیری نیروی محوری وارده بر مدل فونداسیون تعبیه شده است.
- سیستم جمع‌آوری، تبدیل و ثبت اطلاعات نیز شامل دستگاه Data logger، رایانه و کارت A/D بوده است.

۲.۴. آماده‌سازی نمونه‌ها و برنامه‌ی انجام آزمایش‌ها

برای انجام هر یک از آزمایش‌ها، ابتدا نمونه‌ی خاک ماسه‌یی توسط سیستم بارش، در مخزن دستگاه تا جایی بارش شده است، که ارتفاع بستر خاکی به تراز محل قرارگیری کف ژئوسل برسد. سپس با قراردادن ژئوسل بر روی بستر خاکی، داخل سلول‌های آن مطابق با اطلاعات مندرج در جدول ۲ پر شده‌اند. در نهایت، روی تراز فوقانی ژئوسل، یک لایه‌ی ماسه‌یی به ضخامت ۵ میلی‌متر معادل با مقدار بهینه‌ی $u/B = 0.1$ بارش شده است [۱۹]. در هر آزمایش، پس از اتمام آماده‌سازی نمونه‌ی موردنظر (اعم از خاک مسلح‌شده با ژئوسل یا خاک غیرمسلح)، مدل فونداسیون نواری بر روی نمونه قرار گرفته و فرایند بارگذاری صورت پذیرفته است. تصویر شماتیک سه‌بعدی از نمونه‌ی آزمایش در شکل ۷ ارائه شده است.

۳.۴. محدودیت‌ها و اثرات مقیاس

با توجه به برنامه‌ی انجام آزمایش‌ها در مدل فیزیکی با مقیاس کاهش یافته، لازم است جهت توسعه‌ی رفتار خاک مسلح‌شده با ژئوسل و خرده‌لاستیک از مدل آزمایشگاهی به شرایط میدانی (پروتوتایپ) 1° ، تحلیل ابعادی صورت پذیرد. با توجه به نتایج تحلیل ابعادی، در صورتی که λ ضریب مقیاس هندسی مدل باشد، مدول خاک و مسلح



شکل ۸. نمودارهای تنش بر حسب S/B برای خاک غیرمسلح و خاک مسلح.

زاویه‌ی پخش معینی باز توزیع می‌کند. در نتیجه، بارهای شالوده در سطح وسیع‌تری انتقال می‌یابد، که این امر منجر به عملکرد بهتر آن می‌شود. در نهایت می‌توان چنین نتیجه گرفت که لایه‌ی مسلح شده با ژئوسل به عنوان یک جسم کامپوزیت با مقاومت برشی و سختی بالاتر عمل می‌کند و این موضوع باعث بهبود عملکرد خاک مسلح می‌شود.

با توجه به شکل ۸، ظرفیت باربری نهایی (متناظر با لحظه‌ی گسیختگی نمونه) برای خاک غیرمسلح حدود 150 kPa است، لذا بار استاتیکی اولیه در تمامی آزمایش‌های سیکلی با الهام گرفتن از این مطلب و لحاظ کردن ضریب اطمینان ۳، برابر با ظرفیت باربری نهایی خاک غیرمسلح در نظر گرفته شده است (یعنی بار استاتیکی اولیه 50 kPa در نظر گرفته شده است). همچنین، در آزمایش‌های سیکلی دامنه‌ی بار تناوبی حدود ظرفیت باربری نهایی خاک غیرمسلح و برابر با 75 kPa (متناظر با بار اعمالی 123 kgf) در نظر گرفته شده است.

۲.۵. بررسی اثر افزودن ذرات لاستیک به خاک در نشست‌های

خمیری و کشسان خاک مسلح

برای بررسی اثر ذرات لاستیکی مخلوط شده با خاک به عنوان پرکننده‌ی ژئوسل، سول‌ها با استفاده از فقط ماسه و خرده‌لاستیک و ماسه‌ی حاوی درصدی از خرده‌های لاستیک یا پودرلاستیک با شرایط تراکمی مشخص پر شده‌اند (چکیده‌ی برنامه‌ی آزمایش‌ها در جدول ۲ قابل مشاهده است). در مرحله‌ی اول، بارگذاری استاتیکی اولیه با نرخ ثابت و تا میزان بار مشخص انجام و در مرحله‌ی دوم 1000 سیکل بارگذاری - باربرداری سیکلی با بسامد 0.46 هرترز و دامنه‌ی 123 kgf (متناظر با 75 kPa) بر نمونه اعمال شده است. شکل ۹، بخشی از نمودار فرایند بارگذاری - باربرداری سیکلی را بر حسب زمان نشان می‌دهد.

به دلیل حجم زیاد داده‌های ذخیره شده و جهت گویایی بیشتر نمودار نشست - زمان در فرایند بارگذاری - باربرداری سیکلی، بخش‌هایی از نمودار نشست - زمان سیکلی با مقیاس بزرگ‌تر در شکل ۱۰ ارائه شده است. در حالت پر کردن سول‌های ژئوسل با استفاده از فقط گرانول لاستیک ($\gamma_{rubber granular} = 0.6 \text{ gr/cm}^3$)، تراکم محتویات سول‌ها به شدت کاهش می‌یابد. براین اساس، کاهش چگالی محتویات سول‌ها (درکنار شکل‌پذیری ذاتی ذرات لاستیکی) یکی از عوامل کاهشدهنده‌ی مقدار باربری و سختی خاک مسلح است. مطابق شکل ۱۰، استفاده از 10% گرانول لاستیک (به عنوان مصالح پرکننده‌ی ژئوسل)، موجب افزایش نشست‌های کلی در فرایند بارگذاری - باربرداری تناوبی (و نیز بارگذاری استاتیکی) و همچنین افزایش نشست‌های خمیری شده است؛ این در حالی است که با توجه به رفتار ارتجاعی

تولید شده‌اند (با توجه به نتایج آزمون کشش در شکل ۴). در نتیجه با در نظر گرفتن ضریب مقیاس $\lambda = 4$ (معادل با شرایط ابعاد بار ترافیکی) برای اینکه نتایج بار - نشست در مدل آزمایشگاهی از لحاظ کمی به شرایط میدانی تعمیم شود، ژئوسل واقعی باید مدول‌های ۱۶ برابر بزرگ‌تر داشته باشد. واضح است که استفاده از مسلح کننده با سختی کمتر در پروژه‌ی واقعی منجر به ضرایب بهبود کمتری نسبت به نتایج مدل آزمایشگاهی خواهد شد.

شایان ذکر است که مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در سال ۱۹۹۷ نشان داده است که رفتار کلی بار - نشست شالوده در آزمایش‌های کوچک مقیاس بر روی خاک ماسه‌یی مسلح شده با مصالح ژئوسینتتیک، در آزمایش‌های بزرگ مقیاس نیز به وجود می‌آیند؛ [۲۱] لذا مکانیزم عمومی رفتار خاک مسلح شده با ژئوسل و خرده لاستیک در مدل فیزیکی کوچک مقیاس مشابه با شرایط میدانی و مقیاس کامل بوده است.

۵. نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آن‌ها

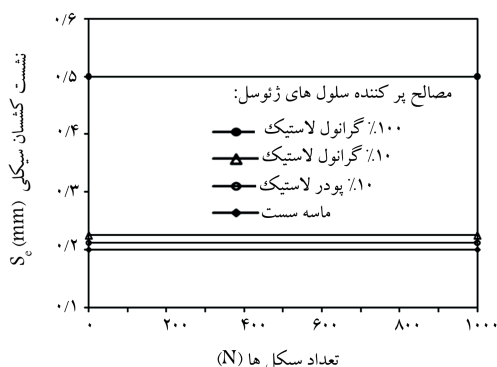
نتایج آزمایش‌ها در ۳ گروه ارائه شده است: بخش ۱.۵ به «بررسی رفتار بار - نشست شالوده واقع بر خاک غیرمسلح و خاک مسلح شده با ژئوسل تحت بار استاتیکی» اختصاص دارد. بخش‌های ۲.۵ و ۳.۵ به ترتیب به «بررسی تغییرات نشست‌های خمیری و کشسان خاک مسلح در فرایند بارگذاری - باربرداری تناوبی» و «بررسی رفتار فراتناوبی خاک مسلح» در حالتی که از مخلوط خاک - ذرات لاستیکی به عنوان پرکننده‌ی چشمه‌های ژئوسل استفاده شده است، می‌پردازند.

۱.۵. بررسی رفتار بار - نشست فونداسیون نواری واقع بر خاک

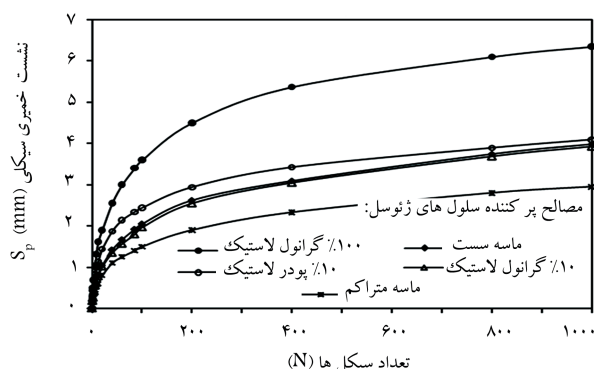
غیرمسلح و خاک مسلح شده با ژئوسل

آزمایش‌های این قسمت متناظر با اطلاعات مندرج در ردیف‌های ۱ و ۲ از جدول ۲ هستند. هدف از انجام آزمایش‌های این بخش، آگاهی یافتن از ظرفیت باربری خاک غیرمسلح و خاک مسلح شده با ژئوسل است. این موضوع ضمن بررسی تأثیر مسلح کننده‌ی ژئوسل در عملکرد خاک مسلح متناظر، جهت انتخاب مقادیر بارهای استاتیکی اولیه و نیز دامنه‌ی بارهای سیکلی (در آزمایش‌های بارگذاری - باربرداری سیکلی)، بسیار مفید خواهد بود. در این خصوص، نتایج اولیه‌ی آزمایش‌ها در قالب نمودارهای تنش بر حسب S/B ، برای خاک غیرمسلح و خاک مسلح شده با ژئوسل، در شکل ۸ ارائه شده است.

در شکل ۸، S بیانگر نشست فونداسیون نواری است؛ همچنین، B عرض شالوده و H ارتفاع ژئوسل است. مطابق شکل مذکور استفاده از ژئوسل با ارتفاع معادل 0.25 عرض فونداسیون نواری، ظرفیت باربری خاک مسلح را نسبت به خاک غیرمسلح حدوداً $1/6$ برابر کرده است؛ به عبارتی، ظرفیت باربری نهایی خاک مسلح شده با ژئوسل مفروض (طبق مشخصات ارائه شده در بخش ۳.۳ و شکل ۵)، تقریباً 240 kPa بوده و گسیختگی نمونه نیز در کرنش‌های بالاتری رخ داده است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها واضح است که مسلح کننده‌ی ژئوسل به طور قابل توجهی ظرفیت باربری نهایی شالوده را نسبت به خاک غیرمسلح افزایش می‌دهد. همچنین مسلح کردن خاک با ژئوسل باعث تأمین تکیه‌گاه سخت‌تری می‌شود که منجر به کاهش نشست شالوده در سطح بار مشخص می‌شود؛ زیرا محصورشدگی تأمین شده به سبب سختی قابل ملاحظه‌ی دیواره‌های ژئوسل، حرکت جانبی ذرات خاک درون ژئوسل را مقید می‌سازد. لایه‌ی مسلح شده با ژئوسل مشابه یک شالوده ثانویه عمل می‌کند که تنش‌ها را از زیر شالوده به پایین لایه‌ی خاک مسلح، تحت



الف) نمودار نشست کشسان بر حسب تعداد سیکل های بارگذاری - باربرداری برای خاک مسلح (ژئوسل حاوی پرکننده های مختلف)؛



ب) نمودار نشست خمیری بر حسب تعداد سیکل های بارگذاری - باربرداری برای خاک مسلح (ژئوسل حاوی پرکننده های مختلف).

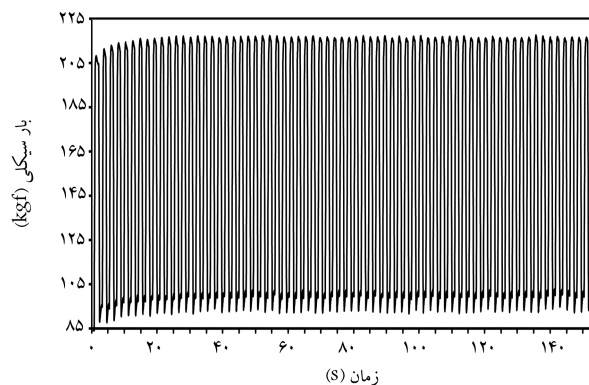
شکل ۱۱. تغییرات نشست های کشسان و ماندگار در سیکلهای مختلف درزیرپی واقع بر خاک مسلح شده با ژئوسل.

است). لازم به یادآوری است مطابق جدول ۲، چگالی توده‌ی متشکل از گرانول لاستیک برابر 0.6 gr/cm^3 و چگالی‌های ماسه‌ی سست و مخلوط ماسه - ذرات لاستیک برابر با 1.47 gr/cm^3 است.

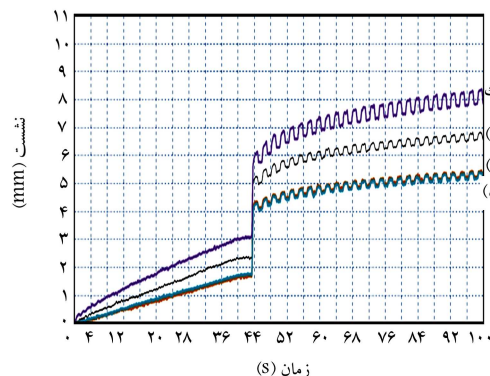
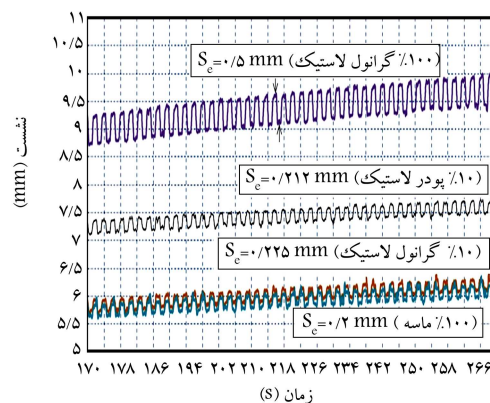
همان‌طوری که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، استفاده از ۱۰۰٪ گرانول لاستیک به عنوان پرکننده‌ی سلول‌های ژئوسل منجر به افزایش چشم‌گیر نشست‌های خمیری و کشسان شده است. ولی استفاده از ۱۰٪ گرانول لاستیک با ذرات درشت‌تر از دانه‌های ماسه (مطابق رابطه‌ی ۱: ۲/۸۸، ضریب اندازه‌ی نسبی گرانول لاستیک) منجر به کاهش ناچیز در نشست‌های خمیری و نیز افزایش تقریباً ۱۰ درصدی در نشست‌های کشسان خاک مسلح با ژئوسل شده است. این درحالی است که استفاده از ۱۰٪ پودر لاستیک با ذرات کوچک‌تر از دانه‌های ماسه (مطابق رابطه‌ی ۲: ۰/۲۴، ضریب اندازه‌ی نسبی پودر لاستیک) منجر به افزایش تغییرشکل‌های خمیری شده است. جهت مقایسه‌ی دقیق‌تر نرخ کاهش نشست‌های خمیری و کشسان، در پژوهش حاضر از پارامترهایی با عنوان نسبت نشست خمیری (PSR) ^{۱۳}، نسبت نشست کشسان (ESR) ^{۱۴} و نسبت نشست کل (TSR) ^{۱۵} در هر سیکل بارگذاری - باربرداری استفاده شده است که مطابق روابط ۳ تا ۵ تعریف می‌شوند:

$$ESR_{(N \text{ سیکل})} = \frac{\text{نشست کشسان (مخلوط مسلح شده با ژئوسل)}}{\text{نشست کشسان (ماسه‌ی مسلح شده با ژئوسل)}} \quad (۳)$$

$$PSR_{(N \text{ سیکل})} = \frac{\text{نشست خمیری (مخلوط مسلح شده با ژئوسل)}}{\text{نشست خمیری (ماسه‌ی مسلح شده با ژئوسل)}} \quad (۴)$$

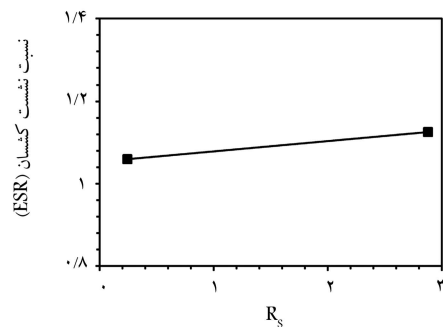


شکل ۹. نمونه‌یی از الگوی بارهای سیکلی (دامنه بار بر حسب زمان).

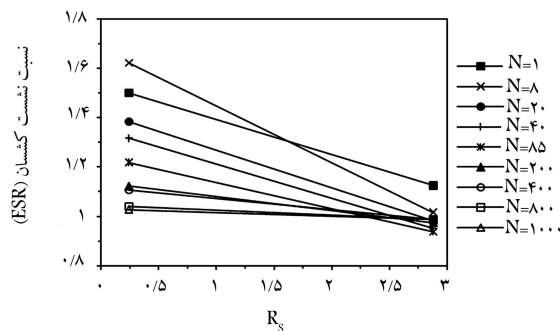


شکل ۱۰. درشت نمایی بخش‌هایی از نمودار نشست - زمان در فرایند بارگذاری - باربرداری سیکلی.

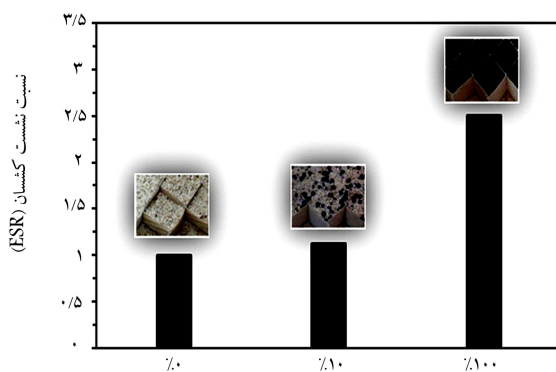
دانه‌های لاستیک، انتظار می‌رود افزودن ذرات لاستیک به ماسه، موجب ارتجاعی‌تر شدن رفتار مخلوط شود؛ این موضوع کاملاً در بخش فوقانی شکل ۱۰ مشهود است. همچنین شکل ۱۰ بیانگر این موضوع است که در حالت پرکردن سلول‌های ژئوسل با استفاده از «فقط گرانول لاستیک»، نسبت به استفاده از «۱۰٪ ذرات لاستیکی (پودر یا گرانول) در کنار ۹۰٪ ماسه»، نشست‌های کشسان حدود ۲ برابر افزایش نیز در مقایسه با استفاده از فقط ماسه (به عنوان پرکننده)، حدود ۲/۵ برابر افزایش داشته است. در خصوص مقایسه‌ی مخلوط ماسه و ذرات لاستیکی نیز باید گفت؛ جایگزین کردن ۱۰٪ وزن ماسه با ذرات لاستیکی و تبدیل ماسه به مخلوط ماسه - ذرات لاستیک، نشست‌های کشسان آن را تقریباً ۱/۱ برابر کرده است. جهت تفسیر و مقایسه‌ی بهتر نشست‌های خمیری و کشسان برحسب سیکل‌های بارگذاری - باربرداری تاوایی از شکل ۱۱ استفاده شده است (که اقتباس شده از شکل ۱۰ -



الف) نمودار نسبت کشسان بر حسب R_s



ب) نمودار نسبت نشست خمیری بر حسب R_s در سیکل‌های مختلف

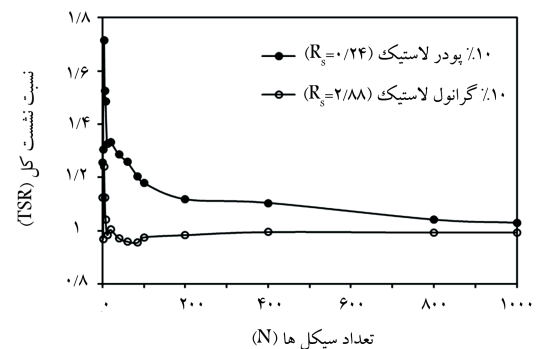


درد گرانول لاستیک در سلول‌های ژئوسل

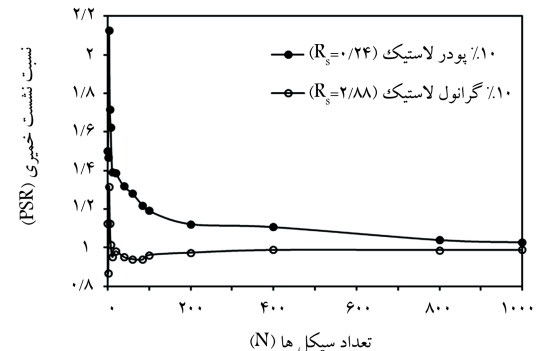
ج) نمودار مقایسه‌ی تغییرات نسبت نشست کشسان بر حسب درصد گرانول لاستیک مخلوط شده با ماسه ی پرکننده ی چشمه‌های ژئوسل.

شکل ۱۳. تغییرات نسبت نشست‌های کشسان و خمیری با اندازه نسبی و درصد دانه‌های لاستیک مورد استفاده.

یابد). همچنین شکل ۱۲ نشان می‌دهد که مخلوط ماسه - پودر لاستیک نیز در سیکل‌های اولیه، کمی بی‌نظمی رفتاری (صعود و نزول در مقدار نسبت نشست) داشته است؛ ولی در مقایسه با مخلوط ماسه - گرانول لاستیک، سریع‌تر به روند منطقی خود (یعنی بخش نزولی نمودار شکل ۱۲) رسیده است، این موضوع می‌تواند به دلیل همگنی بیشتر مخلوط ماسه - پودر لاستیک در قیاس با شکل لاستیک در قیاس با ماسه - گرانول لاستیک باشد. در شکل ۱۳، به مقایسه‌ی شفاف‌تر نسبت نشست خمیری و نسبت نشست کشسان بر حسب ضریب اندازه‌ی نسبی دانه‌ها و درصد دانه‌های لاستیک پرداخته شده است. مطابق شکل ۱۳ و همان‌طور که قبلاً نیز بیان شده است، حضور ذرات لاستیکی در ماسه، رفتار سیکلی مخلوط



الف) نمودار نسبت نشست کل بر حسب تعداد سیکل



ب) نمودار نسبت نشست خمیری بر حسب تعداد سیکل برای خاک مسلح (ژئوسل حاوی مصالح پرکننده ی مختلف).

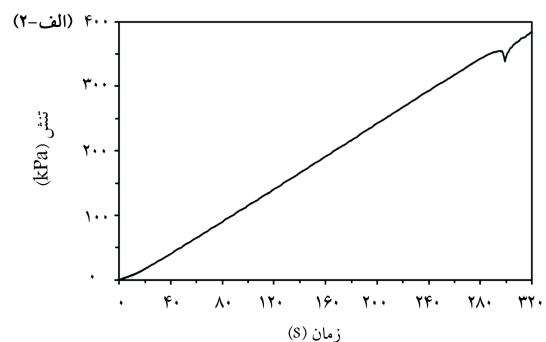
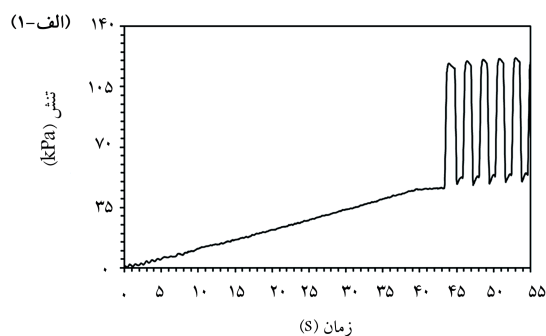
شکل ۱۲. تغییرات نسبت نشست‌های کل و خمیری در سیکل‌های مختلف در زیر پی واقع بر خاک مسلح شده با ژئوسل.

$$TSR_{(N \text{ سیکل})} =$$

$$\frac{\text{نسبت کشسان} + \text{نسبت نشست خمیری (مخلوط مسلح شده با ژئوسل)}}{\text{نسبت کشسان} + \text{نسبت نشست خمیری (ماسه‌ی مسلح شده با ژئوسل)}} \quad (5)$$

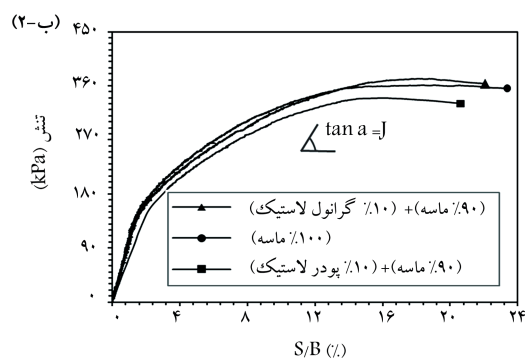
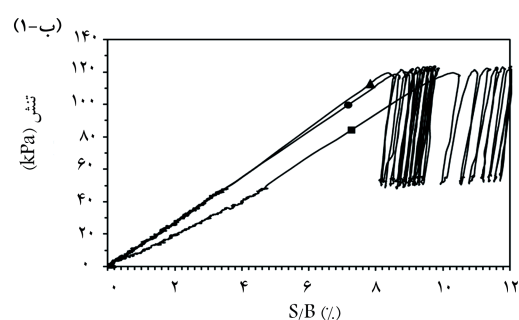
در روابط ۳ الی ۵، منظور از «مخلوط» در صورت کسرها، «مخلوط ماسه - ذرات لاستیکی» است. همچنین تأکید می‌شود که در روابط مذکور، مخرج کسرها به ماسه‌ی مسلح شده با ژئوسل اشاره می‌کنند (نه ماسه‌ی غیرمسلح). بر این اساس، نسبت نشست خمیری و نسبت نشست کل بر حسب تعداد سیکل‌های بارگذاری - باربرداری، برای مخلوط ماسه‌ی حاوی ۱۰٪ ذرات لاستیک در شکل ۱۲ ارائه شده است.

شکل ۱۲ نشان می‌دهد در سیکل‌های اولیه ($N < 20$)، افزودن گرانول لاستیک به ماسه ($R_s = 2/88 > 1$)، نشست‌های کل و خمیری را افزایش داده، ولی در سیکل‌های بالاتر ($N > 20$) متجر به کاهش نشست‌های کشسان و خمیری شده است. به نظر می‌رسد این بی‌نظمی اولیه در نمودار به دلیل توزیع تصادفی دانه‌های لاستیک در مخلوط ماسه - ذرات لاستیک بوده است که پس از طی تعداد سیکل‌های خاص به رفتار منطقی (صعود یا نزول در مقدار نسبت نشست) و باثبات‌تر رسیده است. درخصوص افزودن پودر لاستیک به خاک نیز ($R_s = 0.24 < 1$) باید گفت که هر دو مورد نشست‌های کل و خمیری در تمام سیکل‌ها افزایش یافته‌اند (البته نسبت افزایش نشست در سیکل‌های اولیه بیشتر بوده است و این به دلیل ماهیت رفتارهای سیکلی خاک‌های سست است که در سیکل‌های اولیه نشست بیشتری را تجربه خواهند کرد تا رفته‌رفته تراکم آن‌ها افزایش



الف) نمودارهای تنش - زمان در بارگذاری استاتیکی اولیه و اوایل بارگذاری سیکلی و نیز بارگذاری استاتیکی ثانویه قسمت؛

شکل ۱۴. تغییرات تنش با زمان و بانسبت نشست در بارگذاری‌های استاتیکی و سیکلی برای مصالح مختلف.



ب) نمودارهای تنش بر حسب S/B متناظر با قسمت الف) برای سه نوع مصالح پرکننده ی چشمه های ژئوسل).

است که در نوشتار حاضر با نماد J معرفی شده است. نمودارهای ارائه شده در شکل ۱۴ نشان می‌دهند که فرایند بارگذاری - باربرداری تناوبی منجر به افزایش چشم‌گیر سختی خاک مسلح (در هر سه حالت استفاده از مصالح پرکننده) نسبت به قبل از پروسه بارگذاری - باربرداری تناوبی (یعنی بخش استاتیکی اولیه) شده است. از سوی دیگر، نمودار ۱ ب - در شکل ۱۴ نشان می‌دهد در بخش بارگذاری استاتیکی اولیه، در حالت‌هایی که سلول‌های ژئوسل با «فقط ماسه» یا «مخلوط ماسه‌ی حاوی ۱۰٪ گرانول - لاستیک» پر شده‌اند، نمودارهای «تنش - S/B » در کرنش‌های پایین بر هم منطبق بوده است، بر این اساس می‌توان گفت خاک مسلح در هر دو حالت مذکور سختی یکسانی از خود نشان داده است که این موضوع براساس نمودار ۲ ب - در حالت بارگذاری استاتیکی ثانویه (فراسیکلی) نیز مشاهده می‌شود. جهت روشن‌تر شدن مطلب، مقادیر شیب مماس‌های رسم شده بر نمودار ۲ ب از شکل ۱۴، در جدول ۳ و منحنی «سختی - S/B » آن در شکل ۱۵ ارائه شده است. بخش استاتیکی نمودار ۱ ب شکل ۱۴ نیز با دو خط و با دقت نسبتاً زیاد جایگزین شده است که نتیجه‌ی آن در نمودار سختی بر حسب S/B در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود.

در شکل ۱۵، منظور از ۱۰۰٪ ماسه (به عنوان پرکننده‌ی چشمه‌های ژئوسل)، ماسه‌ی سست متناظر با ردیف ۷ از جدول ۲ است. یکسان بودن چگالی سه گروه مصالح پرکننده‌ی چشمه‌های ژئوسل، مقایسه و تفسیر نتایج آزمایش‌ها را آسان‌تر خواهد کرد. نتایج جدول ۳ و شکل ۱۵ حاکی از آن است که در اثر اعمال ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری - باربرداری با دامنه‌ی ۷۵ kPa (متناظر با بار اعمالی ۱۲۳ kgf) بر نمونه‌ی خاک مسلح شده با ژئوسل، سختی نمونه نسبت به حالت قبل، در کرنش‌های اولیه بسیار افزایش یافته است؛ به عنوان مثال در کرنش ۲٪ سختی فراسیکلی خاک مسلح نسبت به حالت قبل از بارگذاری - باربرداری سیکلی بیش از ۳ برابر شده است. از طرف دیگر نمودارهای «تنش - S/B » حالت شیب - دوخطی پیدا کرده

حاصل را ارتجاعی‌تر خواهد کرد (یعنی $ESR < 1$)؛ نکته‌ی حائز اهمیت این است که نتایج نشان می‌دهند در حالت $1 < R_{s-rubber} < X$ (به رابطه‌ی ۱ مراجعه شود)، ضمن ارتجاعی‌تر شدن رفتار، نشست‌های خمیری (ماندگار^{۱۶}) نیز در سیکل‌های بالاتر کاهش یافته‌اند که قضاوت در این خصوص، انجام آزمایش‌های بیشتر و ضرایب اندازه‌ی نسبی متنوع‌تری را می‌طلبد. ولی موضوعی که با قاطعیت می‌توان بیان کرد این است که حضور ذرات لاستیکی در توده‌ی خاک، رفتار آن را ارتجاعی‌تر خواهند کرد، ولی اثر آن‌ها در کاهش یا افزایش نشست‌های کل و خمیری توده‌ی خاک، نیازمند در نظر گرفتن پارامترهای متعددی از جمله: ابعاد دانه‌ها، تراکم مخلوط، نحوه‌ی قرارگیری ذرات لاستیکی و ... در کنار ملاحظات اجرایی و اقتصادی است.

۳.۵. بررسی اثر افزودن ذرات لاستیکی به خاک در رفتار فراسیکلی آن

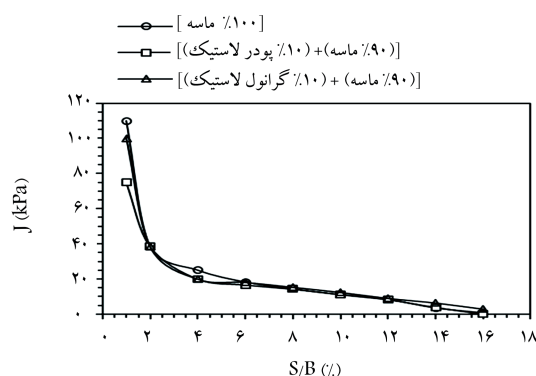
به منظور بررسی رفتار فراسیکلی^{۱۷} خاک مخلوط شده با ذرات لاستیک، از نتایج آزمایش‌های ردیف‌های ۵ الی ۷ در جدول ۲ استفاده شده است. نحوه‌ی بارگذاری بدین صورت بوده است که پس از پایان فرایند بارگذاری - باربرداری سیکلی تا ۱۰۰۰ سیکل (که در بخش قبل به آن پرداخته شده است)، بارگذاری استاتیکی با نرخ ثابت و تا گسیختگی کامل نمونه انجام و منحنی‌های بار - نشست برای نمونه‌های مختلف ثبت شده است. نمودارهای تنش اعمالی بر حسب S/B ، برای ۳ نوع مصالح پرکننده‌ی سلول‌های ژئوسل در کنار نمودار تنش - زمان برای بارگذارهای استاتیکی اولیه و ثانویه (فراسیکلی) در شکل ۱۴ ارائه شده است.

مطابق شکل ۱۴، شیب نمودار «تنش - S/B » بیانگر سختی خاک مسلح

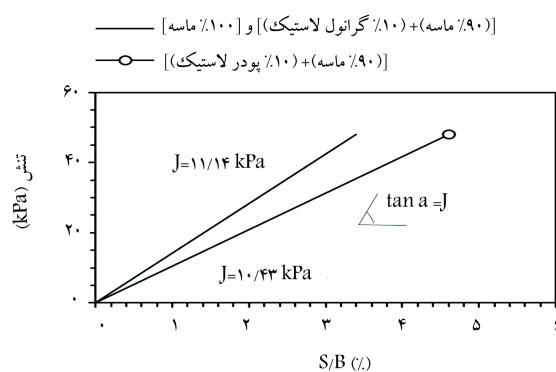
جدول ۳. مقادیر سختی (J) در درصدهای مختلف S/B برای بارگذاری استاتیکی فراسیکلی.

$S/B(\%)$	سختی (کیلو پاسکال)		
	۹۰٪ ماسه + ۱۰٪	۹۰٪ ماسه + ۱۰٪	۹۰٪ ماسه + ۱۰٪
	گرانول لاستیک *	پودر لاستیک *	۱۰۰٪ ماسه *
۱	۱۰۰	۷۵	۱۱۰
۲	۳۸٫۴۶	۳۸٫۴۶	۳۸٫۴۶
۴	۲۰	۲۰	۲۵
۶	۱۸٫۱۸	۱۶٫۶۶	۱۸٫۱۸
۸	۱۴٫۳۸	۱۴٫۲۸	۱۴٫۲۸
۱۰	۱۲٫۵۰	۱۱٫۱۱	۱۱٫۱۱
۱۲	۹٫۰۹	۸٫۲۳	۸٫۳۳
۱۴	۶٫۵۰	۳٫۸۴	۳٫۴۴
۱۶	۲٫۷۵	۰	۰٫۶۶

* مصالح پرکننده ی سلول های ژئوسل



ب) نمودار سختی تنش بر حسب S/B در بارگذاری استاتیکی ثانویه (برای سه نوع مصالح پرکننده ی چشمه های ژئوسل).



الف) نمودار خطی تنش بر حسب S/B در بخش بارگذاری استاتیکی اولیه (برای سه نوع مصالح پرکننده ی چشمه های ژئوسل)؛

شکل ۱۵. تغییرات تنش و سختی نمونه بامقادیر نشست نسبی برای مصالح مختلف در بارگذاری استاتیکی اولیه.

شده و نتایج نشان داده است که افزودن ذرات لاستیک به خاک پرکننده ی سلول ها، بسته به درصد ذرات لاستیک در مخلوط و نیز اندازه ی نسبی آن ها در مقایسه با دانه های خاک، می تواند منجر به کاهش یا افزایش نشست های خمیری شود. علاوه بر این می توان گفت که وجود ذرات لاستیک در لایه های دانه های خاک، رفتار مخلوط خاک - خرده لاستیک را ارتجاعی تر خواهد کرد و به عبارت دیگر، افزایش نشست های کشسان را موجب خواهد شد. لذا در صورت استفاده ی بهینه از خرده لاستیک در مخلوط با خاک، می توان ضمن افزایش سهم تغییر شکل های کشسان، نشست های کل را نیز کنترل کرد و کاهش داد که نتیجه ی آن منجر به کاهش یافتن سهم تغییر شکل های ماندگار خاک خواهد شد. درخصوص بررسی رفتار استاتیکی ثانویه (فراسیکلی) خاک نیز باید گفت فرایند بارگذاری - باربرداری سیکلی بسته به دامنه ی بار و تعداد سیکل های اعمالی، در صورت عدم گسیختگی نمونه می تواند منجر به افزایش چشمگیر در میزان سختی خاک مسلح پس از انجام بارگذاری - باربرداری سیکلی شود که این افزایش سختی در کرنش های پایین بسیار بیشتر خواهد بود.

است. البته بررسی مفصل رفتار فراسیکلی خاک مسلح نیازمند انجام آزمایش های بیشتر با دامنه های متنوعی از بار سیکلی است.

۶. نتیجه گیری

با توجه به نتایج آزمایش های صورت گرفته می توان دریافت که نکته ی حائز اهمیت در عملکرد مطلوب ژئوسل در جهت افزایش سختی و باربری خاک مسلح، تراکم مصالح پرکننده ی ژئوسل است که این موضوع در کنار سایر پارامترها، به عنوان عاملی مهم و کلیدی در راستای بروز هر چه بیشتر اثرات ژئوسل نقش اساسی ایفا می کند؛ به طوری که در حالت استفاده از مصالح متراکم نسبت به مصالح سست (به عنوان پرکننده های چشمه های ژئوسل)، افزایش سختی و ظرفیت باربری خاک مسلح می تواند متجاوز از ۲۰٪ بیشتر باشد. در نوشتار حاضر، به بررسی نقش ذرات لاستیک به عنوان مصالح پرکننده ی سلول های ژئوسل در مخلوط با خاک پرداخته

پانویسها

1. plastic shakedown
2. small scale
3. U.S environmental protection agency (EPA)
4. reclaim rubber
5. rubber granular
6. rubber powder
7. geocell
8. passive
9. woven geotextile
10. pneumatic
11. loadcell
12. prototype
13. plastic settlement ratio (PSR)
14. elastic settlement ratio (ESR)
15. total settlement ratio (TSR)
16. residual
17. post-cyclic

منابع (References)

1. Mir Mohammad Hosseini, S.M., Mohammadi, M.R. and Kargar, M. "Experimental investigation of the influence of geocell geometrical dimensions on load-settlement behavior of strip footing on geocell reinforced sand", *The 1st National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tehran, Iran (2014).
2. Kargar, M., Mir Mohammad Hosseini, S.M. and Mohammadi, M.R. "Behavior of geocell reinforced sand foundation systems under cyclic loading", *7th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran, Iran (2015).
3. Sekine, E., Muramoto, K. and Tarumi, H. "Study on properties of road bed reinforced with geocells", *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, Japan*, **35**(1), pp. 23-31 (1994).
4. Pokharel, S.K., Han, J., Leshchinsky, D., Parsons, R.L. and Halahmi, I. "Investigation of factors influencing behavior of single geocell-reinforced bases under static loading", *Geotextiles and Geomembranes*, **28**(6), pp. 570-578 (2010).
5. 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*, **28**(1), pp. 72-84 (2010b).
6. Yang, X., Han, J., Pokharel, S.K., Manandhar, C., Parsons, R.L., Leshchinsky, D. and Halahmi, I. "Accelerated pavement testing of unpaved roads with geocell-reinforced sand base", *Geotextiles and Geomembranes*, **32**, pp. 95-103 (2012).
7. Tanyu, B.F. "Geocell-reinforced gravel subbase over poor subgrades", *Geosynthetics International*, **20**(2), pp. 47-61 (2013).
8. Mousavi, S.H., Daneshkar, A. and Ajdari, D. "Evaluation of environmental impact of recycling used tires as an artificial marine habitat", *Development and Environment*, **2**(3), pp. 15-22 (2011).
9. Tsang, H.H., Sheikh, M.N. and Lam, N. "Rubber-soil cushion for earthquake protection", *Australian Earthquake Engineering Society Conference*, pp. 1-8 (2007).
10. Feng, Z.Y. and Sutter, K.G. "Dynamic properties of granulated rubber/sand mixture", *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, **23**(3), pp. 338-344 (2000).
11. Yoon, Y.W., Cheon, S. and Kang, D. "Bearing capacity and settlement of tire-reinforced sands", *Geotextiles and Geomembranes*, **22**(5), pp. 439-453 (2004).
12. Gotteland, P., Lambert, S. and Balachowski, L. "Strength characteristics of tyre chips-sand mixture", *Studia Geotechnica et Mechanica*, **27**(1-2), pp. 1-2 (2005).
13. Foote, J., Benson, H. and Bosscher, V. "Sand reinforced with shredded waste tires", *Journal of Geotechnical Engineering*, **122**(9), pp. 760-867 (1996).
14. Hataf, N. and Rahimi, M.M. "Experimental investigation of bearing capacity of sand reinforced with randomly distributed tire shreds", *Construction and Building Materials*, **20**(10), pp. 910-916 (2006).
15. Moghaddas Tafreshi, S.N. and Norouzi, A.H. "Bearing capacity of a square model footing on sand reinforced with shredded tire-An experimental investigation", *Construction and Building Materials*, **35**, pp. 547-556 (2012).
16. USEPA, U.S Environmental Protection Agency (www.epa.gov.) (1991).
17. Samadian, F. "The report of recyclic tire", The Ministry of Mines & Industries, The Deputy of Product Affairs, The Office of Non-Metal Industries (2006).
18. Ghaderi, S., Moharramnejad, N. and Jalili, M. "The management of used tires in the country", *The 1st Seminar on Purification Technologies in Environment*, Sharif University of Technology, Tehran, Iran (2011).
19. Dash, S.K., Krishnaswamy, N.R. and Rajagopal, K. "Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand", *Geotextiles and Geomembranes*, **4**(19), pp. 235-256 (2001).
20. Fakher, A. and Jones, C. "Discussion on bearing capacity of rectangular footings on geogrid-reinforced sand, by Yetimoglu, T., Wu, J.T.H. and Saglam, A. (1994)", *Journal of Geotechnical Engineering*, **122**(4), pp. 326-327 (1996).
21. Adams, M.T. and Collin, J.G. "Large model spread footing load tests on geosynthetic reinforced soil foundations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **123**(1), pp. 66-72 (1997).