

مطالعه آزمایشگاهی رفتار تناوبی پی‌های واقع بر خاک مسلح شده با ژئوسل و خرده لاستیک

سیدمجدالدین میرمحمدحسینی

استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
mirh53@yahoo.com

محمودرضا محمدی

دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
mohammadi_civil@yahoo.com

محسن کارگر

دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
mohsenkargar@yahoo.com

کلید واژه‌ها: ژئوسل، خرده لاستیک، بار تناوبی، ظرفیت باربری پی‌نواری، نشست‌های پلاستیک و الاستیک خاک

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از ژئوسینتتیک‌ها به‌عنوان مسلح‌کننده‌ی خاک شالوده‌ها به‌خصوص در بسترهای سست بسیار رواج یافته است. یکی از انواع مسلح‌کننده‌های سه‌بعدی ژئوسل می‌باشد که با توجه به ساختار سلولی شکل خود و تأمین محصورشدگی لازم برای خاک داخل سلول‌ها، عملکرد بسیار مناسبی از لحاظ افزایش ظرفیت باربری در مقایسه با مسلح‌کننده‌های مسطح، مانند ژئوتکستایل و ژئوگرید دارد؛ از سوی دیگر، رشد روزافزون تولید لاستیک و متعاقباً از دید تایلرهای فرسوده در طبیعت، مشکلات متنوع و خسارات فراوان زیست‌محیطی را موجب شده است؛ این موضوع، در کنار کارایی مناسب خرده‌لاستیک‌های در بهبود خواص مهندسی خاک، موجب رشد رویکرد و انگیزه‌ی بازیافت و استفاده‌ی مجدد از این ضایعات در مخلوط با خاک و سایر مصالح در پروژه‌های تحقیقاتی و عملی شده است، هرچند همچنان جایگاه اصلی خود را نیافته است.

در این پژوهش به منظور مطالعه رفتار تناوبی و فراتناوبی پی‌های واقع بر خاک ماسه‌ای مسلح شده با ژئوسل، از مدل فیزیکی پی‌نواری واقع بر خاک مسلح با مقیاس کاهش یافته استفاده شده است که در آن ژئوسل‌ها با ابعاد هندسی یکسان و در موقعیت مشخصی از نمونه‌های ماسه-ای قرار می‌گیرند. جهت بررسی اثر ذرات لاستیکی مخلوط شده با ماسه به‌عنوان پرکننده‌ی ژئوسل، سلول‌ها با استفاده از ماسه‌ی تنها، خرده-لاستیک تنها و درصدی از خرده‌های لاستیک یا پودرلاستیک با شرایط تراکمی کنترل شده پر شده‌اند، سپس بر روی مدل پی واقع بر سطح خاک، در مرحله‌ی اول بارگذاری استاتیکی با نرخ ثابت و تا میزان بار مشخص و بعد از آن تا ۱۰۰۰ سیکل، بارگذاری تناوبی با فرکانس ۰/۵ هرتز و دامنه‌ی ثابت بارگذاری، بر نمونه اعمال گردیده است و در نهایت به‌منظور بررسی رفتار فراتناوبی، مجدداً بارگذاری استاتیکی، با نرخ ثابت تا لحظه گسیختگی صورت گرفته است. ضمن تأکید نقش کلیدی افزایش تراکم و کاهش شکل‌پذیری مصالح پرکننده‌ی ژئوسل، در عملکرد مقتدرانه‌ی خاک مسلح، نتایج حاکی از این است که در شرایط تراکمی یکسان با جایگزین نمودن بخشی از خاک‌دانه‌ای با خرده‌های لاستیک بزرگتر از دانه‌های خاک (با درصد اختلاط خاص)، کاهش تغییر شکل‌های پلاستیک و افزایش تغییر شکل‌های الاستیک ایجاد می‌شود و در حالت اختلاط خاک با پودرلاستیک که ذرات آن کوچکتر از دانه‌های خاک مورد استفاده بوده است، افزایش نشست و کاهش ظرفیت باربری ملاحظه می‌گردد؛ لذا به نظر می‌رسد استفاده از مخلوط خاک و خرده‌لاستیک (با دانه‌بندی درشت‌تر از دانه‌های خاک) و با در نظر گرفتن شرایط هندسی سلول‌های ژئوسل در کنار درصد اختلاط بهینه، ضمن کاهش مصرف خاک و نیز استفاده از ضایعات لاستیک، به بهبود رفتار تناوبی خاک مسلح و کاهش تغییر شکل‌های ماندگار خاک کمک می‌نماید.



در سال‌های اخیر استفاده از ژئوسینتتیک‌ها به‌عنوان مسلح‌کننده‌ی خاک به‌خصوص در بسترهای سست بسیار رواج یافته است. یکی از مؤثرترین انواع مسلح‌کننده‌ها جهت بهبود بخشی از رفتارهای مکانیکی خاک (بالاخص خاک‌های دانه‌ای)، 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 مسلح‌کننده‌های مسطح (مانند ژئوتکستایل و ژئوگرید) دارد؛ هر چند متأسفانه استفاده از آن به‌دلیل عدم وجود استاندارد طراحی و نیز عدم شناخت رفتار بار-نشست پی واقع بر روی خاک مسلح‌شده با آن در کشور ما کمتر مورد توجه قرار گرفته است. عملکرد مطلوب ژئوسل به‌عنوان عنصر تسلیح خاک وابسته به موارد زیادی می‌باشد که از پارامترهای کلیدی آن، سختی و مقاومت کششی دیواره‌های ژئوسل و نیز جنس و تراکم مصالح پرکننده‌ی سلول‌های ژئوسل در کنار سایر پارامترهای مسلح‌کننده و بستر زیرین خاک مسلح می‌باشد. در این خصوص پژوهشگران زیادی به مطالعه رفتار خاک مسلح شده با ژئوسل و بررسی نقش پارامترهای متنوع پرداخته‌اند؛ از جمله (Sekine et al., 1994) یک مقطع راه‌آهن با $3/5$ متر طول و 7 متر عرض را جهت بررسی بستر مسلح‌شده با ژئوسل حاوی خرده‌سنگ ساختند و بارهای تناوبی به‌میزان 90 کیلو نیوتن و فرکانس 11 هرتز به ریل‌ها اعمال کردند. آن‌ها دریافتند که وجود ژئوسل در کاهش تغییرشکل‌های بستر راه (بالاخص زمانی که ظرفیت باربری خاک بستر پایین است) بسیار مؤثر است ولی باید تراکم مصالح داخل سلول‌ها کافی باشد. (Pokharel et al., 2010) با انجام مطالعات آزمایشگاهی، تأثیر پنج عامل کلیدی (شکل، نوع و عمق قرارگیری ژئوسل، ضخامت ناحیه مسلح شده و کیفیت مصالح درون ژئوسل) را در رفتار بسترهای مسلح شده با ژئوسل تک‌سلولی تحت بارهای استاتیکی و مقایسه‌ی آن با ماسه مسلح شده با ژئوسل چندسلولی، مورد بررسی قرار دادند؛ بخشی از نتایج حاکی از این بود که ژئوسل با مدول الاستیک بالاتر دارای سختی و ظرفیت باربری بالاتری در بستر مسلح شده می‌باشد. (Moghaddas Tafreshi & Dawson (2010b) با هدف مقایسه استفاده از ژئوتکستایل سه‌بعدی و ژئوتکستایل صفحه‌ای، با اعمال بار تناوبی بر یک مدل شالوده نواری واقع بر خاک دانه‌ای، آزمایشاتی را انجام دادند که نشان دادند حداکثر نشست شالوده تحت بار تناوبی معادل با 20 بار استاتیکی، در صورت استفاده از مسلح‌کننده صفحه‌ای و سه‌بعدی به ترتیب حدود 45 و 60 کاهش می‌یابد. در نتیجه در صورت استفاده از ژئوتکستایل سه‌بعدی در مقایسه با ژئوتکستایل صفحه‌ای با همان ویژگی‌ها و همان وزن، اثر تسلیح ماسه به‌ویژه در کاهش نشست شالوده و بالاآمدگی سطح خاک بستر شالوده، به مراتب بیشتر است و نیز حالت پایدار پلاستیک^۱، سریع‌تر (با تعداد سیکل‌های بار کمتری) اتفاق می‌افتد.

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 نموده است. در این خصوص، از میان سهم بخش‌های مختلف چرخه حیات تایرها از آثار منفی زیست‌محیطی آن‌ها، چیزی حدود 65% به آثار زیان‌بار تایرهای باقی‌مانده در طبیعت اختصاص دارد (Mousavi et al., 2011). این درحالی‌است که در حیطه‌ی مهندسی ژئوتکنیک با اختلاط مناسب فرآورده‌های حاصل از ضایعات لاستیک با خاک و استفاده به‌همراه ژئوسینتتیک‌ها، می‌توان به نقاط قوت بسیاری برای مخلوط حاصل دست‌یافت که از جمله‌ی آن‌ها ظرفیت بالای جذب انرژی (Tsang et al., 2007)، کاهش تنش انتقال یافته در عمق توده (Yoon et al., 2004)، افزایش مقاومت برشی (Gotteland et al., 2005)، افزایش تغییرشکل-های برگشت‌پذیر و کاهش تغییرشکل‌های پلاستیک (Rahimi et al., 2006) است.

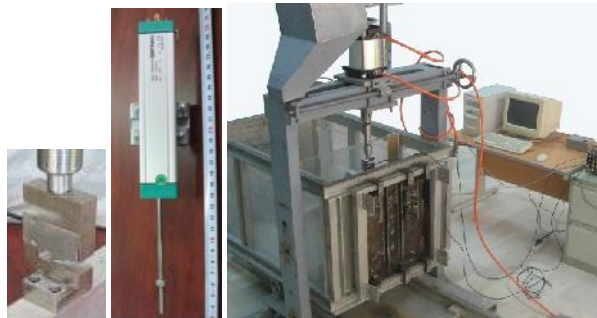
علیرغم تحقیقات صورت گرفته در خصوص رفتار خاک مسلح‌شده با ژئوسل و نیز خاک مخلوط شده با خرده‌لاستیک، کمتر به بررسی ترکیب موارد مذکور جهت تسلیح خاک پرداخته شده‌است؛ لذا در پژوهش حاضر به بررسی اثر اندازه‌ی ذرات لاستیک مخلوط‌شده با ماسه به‌عنوان پرکننده‌ی ژئوسل، بر رفتار تناوبی و فراتناوبی خاک مسلح‌شده با ژئوسل، با استفاده از یک مدل فیزیکی با مقیاس کاهش‌یافته، شامل یک پی صلب واقع بر خاک مسلح در آزمایشگاه دینامیک خاک دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پرداخته شده‌است. در تمام آزمایشات این تحقیق از ژئوسل‌های مشابه (تولید شده توسط خود پژوهشگران این تحقیق) و با شرایط هندسی و مکانیکی یکسان استفاده شده‌است که در موقعیت مشخصی از نمونه‌های ماسه‌ای (آماده شده با روش بارش) قرار می‌گیرند. در آزمایشات مختلف سلول‌های ژئوسل با ماسه‌ی تنها، خرده‌لاستیک تنها و مخلوط خاک حاوی درصدی از خرده‌های لاستیک یا پودرلاستیک با شرایط تراکمی کنترل شده پر می‌شوند و در انتها یک لایه ماسه با ضخامت اندک بر سطح فوقانی ژئوسل پرشده بارش می‌شود. پروسه‌ی بارگذاری بر مدل پی‌نواری واقع بر خاک مسلح بدین صورت است که در مرحله‌ی اول بارگذاری استاتیکی با نرخ ثابت و تا میزان بار تعریف شده، انجام می‌شود و بعد از آن تا 1000 سیکل، بارگذاری تناوبی با فرکانس $0/46$ هرتز بر نمونه اعمال شده و در نهایت به‌منظور بررسی رفتار فراتناوبی، مجدداً بارگذاری استاتیکی با نرخ ثابت تا لحظه گسیختگی صورت می‌پذیرد. در طول پروسه‌ی بارگذاری میزان نشست پی و مقادیر بار اعمالی توسط سیستم ابزار دقیق تعبیه شده با سرعتی حدود 50 داده در ثانیه، قرائت و ثبت می‌گردد.

۲- دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش از اجزای کلی، شامل: مدل پی‌نواری، محفظه خاک، قاب بارگذاری و ملحقات آن، دستگاه بارش، سیستم بارگذاری و سیستم قرائت و ثبت اطلاعات تشکیل شده‌است. در جدول (۱) خلاصه مشخصات و در شکل (۱) تصویر دستگاه آمده‌است.

جدول ۱: خلاصه مشخصات اجزای اصلی دستگاه آزمایش

توضیحات	ابعاد (میلیمتر)				جنس (نوع)	عملکرد	عنوان
	ارتفاع	عرض	طول	توضیح			
کف پی دارای سمباده زبر می باشد	۷۵	۵۰	۳۴۰	مکعب مستطیل	آلومینیوم	پی نواری صلب	مدل پی نواری
شرایط مطلوب صلبیت کافی و اصطکاک کم را داراست	۵۶۰	۳۴۲	۸۰۰	مکعب مستطیل	فولاد	نگهداری خاک	محفظه خاک
تعیین تراکم ماسه با نرخ‌های متنوع بارش و به کمک درپچه‌های مشبک صورت می‌گیرد	۳۰۰	۳۰۰	۴۵۰	حجم فوقانی	فولاد	نمونه‌های همگن با تراکم مطلوب	دستگاه بارش
	۱۰۰	۱۰۰	-	درپچه تحتانی			
دارای سختی بالا نسبت به نیروی اعمالی است تا تغییرشکل آن روی نتایج تأثیر نگذارد	UNP 160 & 140			قاب	فولاد	نگهداری سیلندر بارگذاری	قاب بارگذاری
از سیستم هوای فشرده استفاده شده است و قابلیت بارگذاری استاتیکی و تناوبی را داراست					پنوماتیکی	اعمال بار قائم	سیستم بارگذاری
کورس LVDT، ۱۰۰ میلیمتر و دقت آن ۰/۰۵ میلیمتر است و ظرفیت لودسل ۲/۵ تن می‌باشد							
					Loadcell & LVDT	اندازه‌گیری بار و تغییر مکان	ابزار دقیق



شکل ۱: تصویری از دستگاه آزمایش (سمت راست) به همراه ابزارهای دقیق (سمت چپ)

۳- مصالح مورد استفاده

مصالح مورد استفاده در این پژوهش، خاک ماسه‌ای، ژئوسل تهیه شده از ژئوتکستایل تار-پودی، خرده لاستیک و پودر لاستیک می‌باشند که در ادامه توضیحات لازم در این خصوص آورده شده است.

۳-۱- گرانول لاستیک، پودر لاستیک و ماسه

در این پژوهش، ضایعات لاستیک به دو صورت پودر و گرانول کوچک مقیاس مورد استفاده قرار گرفته است. پودر لاستیک مصرفی به روش صنعتی و گرانول به صورت دستی (به شکل شبه استوانه‌ای با مقطع دایره‌ای) 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 تحت عنوان ضریب اندازه‌ی نسبی مطابق رابطه (۱) استفاده می‌شود.

$$R_{S-Rubber\ granular} = \frac{D_{50-Rubber\ granular}}{D_{50-Sand}} = \frac{4.45}{1.54} = 2.88 \quad \& \quad R_{S-Rubber\ powder} = \frac{D_{50-Rubber\ powder}}{D_{50-Sand}} = \frac{0.38}{1.54} = 0.24 \quad (1)$$

در این تحقیق، 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 است و وزن مخصوص نمونه‌های مخلوط ماسه-ذرات لاستیک، $\gamma = 1.47 \text{ t/m}^3$ می‌باشد. شکل (۲) تصاویر دانه‌های لاستیک، ماسه و پودر لاستیک مورد استفاده را نشان می‌دهد.

ماسه‌ی مورد استفاده از نوع سیلیسی تیز گوشه و تهیه شده از سنگ سیلیس معدن فیروزکوه می‌باشد که از محصولات شرکت تاوان سیلیس است. جهت حذف اثر چسبندگی و آب، ماسه‌ی مصرفی ابتدا شسته شده (تا ریزدانه‌ها حذف شوند) و سپس به طور کامل خشک شده است. ماسه‌ی مذکور دارای دانه‌بندی یکنواخت است تا در حین بارش، تفکیک دانه‌ها رخ ندهد و تحلیل نتایج نیز آسان‌تر شود. چکیده‌ی مشخصات ماسه‌ی مصرفی در جدول (۲) و منحنی دانه‌بندی ماسه، خرده لاستیک و پودر لاستیک در شکل (۳) آمده است.

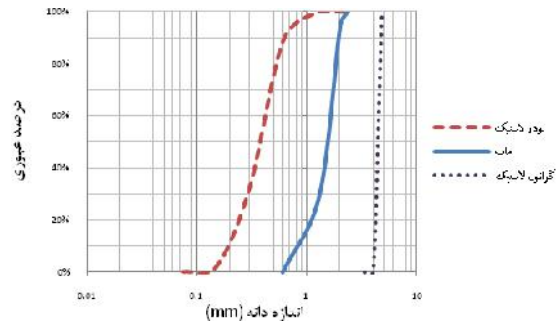




شکل ۲: از راست به چپ به ترتیب: گرانول لاستیک، ماسه و پودر لاستیک

جدول ۲: مشخصات ماسه مصرفی

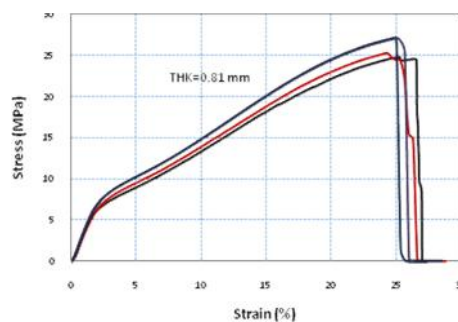
مقدار	واحد	علائم اختصاری	پارامترها
۲/۱۸	-	C_u	ضریب یکنواختی
۱/۳۸	-	C_c	ضریب انحنای منحنی دانه‌بندی
۱/۵۴	mm	D_{50}	اندازه متوسط دانه‌ها
۰/۸۷۸	-	e_{max}	تخلخل حداکثر
۰/۵۷۵	-	e_{min}	تخلخل حداقل
۲/۶۷	-	G_s	توده ویژه
۱/۴۲	kN/m^3	χ_{dmin}	وزن مخصوص خشک حداقل
۱/۷۱	kN/m^3	χ_{dmax}	وزن مخصوص خشک حداکثر



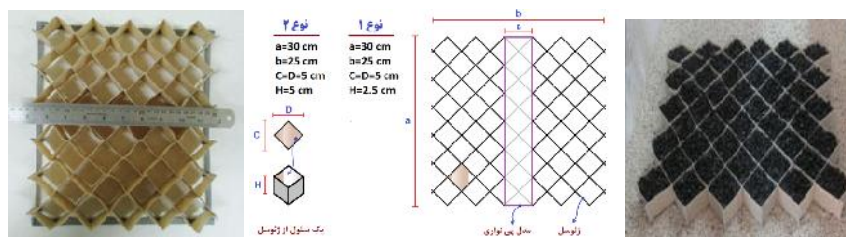
شکل ۳: منحنی دانه‌بندی ماسه، گرانول و پودر لاستیک

۳-۲- ژئوسل مورد استفاده

یکی از دغدغه‌هایی که در این پژوهش آزمایشگاهی در مقایسه با تحقیقات مشابه وجود داشت، عدم دسترسی به نمونه‌ی کوچک‌مقیاس ژئوسل با مقاومت مطلوب اتصالات آن بود. لذا با توجه به اهمیت موضوع، نوع خاصی از ژئوسل جهت انجام این پروژه ابداع و تولید شد که دارای اتصالات دوختی و مقاوم بوده و در نتیجه به دلیل عدم آسیب‌دیدگی از اتصالات، این اطمینان حاصل گردید که حداکثر مقاومت کششی ژئوتکستایل و در نتیجه حداکثر مقاومت $passive$ در داخل سلول‌ها، در پروسه‌ی باربری بسیج شده‌است و آسیب‌دیدگی ژئوسل در حین باربری به هیچ وجه از سستی اتصالات نبوده است. در تولید ژئوسل‌ها از ژئوتکستایل تار-پودی استفاده شده است که نتایج تست کشش آن در شکل (۴) مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که جهت انجام آزمایشات از یک نوع ژئوسل استفاده گردیده است که ابعاد کلی آن $۲۵\text{cm} \times ۳۰\text{cm}$ و دارای چشمه‌های مکعبی شکل با قطر ۵cm و ارتفاع $۲/۵\text{cm}$ می‌باشد.



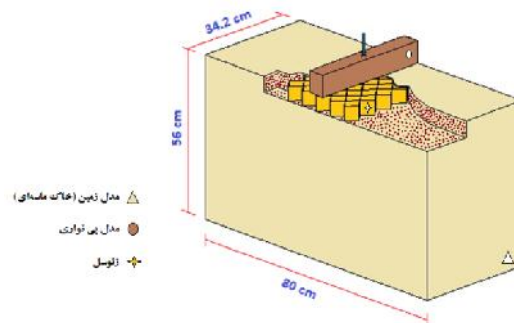
شکل ۴: منحنی تنش-کرنش کششی، برای ژئوتکستایل مورد استفاده



شکل ۵: از راست به چپ: ژئوسل پر شده با دانه‌های لاستیک، پلان موقعیت قرارگیری ژئوسل نسبت به پی نواری و ژئوسل تنها

۴- آماده‌سازی نمونه‌ها و برنامه‌ی انجام آزمایش‌ها

برای انجام هر یک از آزمایش‌ها ابتدا نمونه‌ی خاک ماسه‌ای توسط سیستم بارش، در مخزن دستگاه تا جایی بارش شد که ارتفاع خاکریز به موقعیت کف قرارگیری ژئوسل برسد. در این خصوص تعداد لایه‌های بارش و ارتفاع بارش برای هر لایه به گونه‌ای تنظیم گردید که به نمونه‌ی ماسه‌ای تقریباً همگن و با وزن مخصوص $\gamma = 1.63 \text{ gr/cm}^3$ دست یافتیم. سپس با قرار دادن ژئوسل بر روی خاک، داخل سلول‌های ژئوسل مطابق جدول (۳) پر شدند و سپس ادامه‌ی بارش انجام گردید و برای بخش خاکریز روی تراز فوقانی ژئوسل نیز از مقدار بهینه‌ی $w/B=0.1$ استفاده شد و در نهایت، مدل پی نواری بر روی نمونه‌ی خاک ماسه‌ای مسلح شده با ژئوسل قرار گرفت، به نحوی که حد فاصل کف پی و سطح فوقانی ژئوسل را لایه‌ی ماسه به ارتفاع ۵ میلی‌متر پوشش داده باشد، تصویر شماتیک سه‌بعدی از نمونه‌ی آزمایش در شکل (۶) آمده‌است.



شکل ۶: ابعاد کلی نمونه خاک و موقعیت قرارگیری ژئوسل

۵- ارائه نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آن‌ها

نتایج آزمایش‌ها در دو گروه ارائه شده‌است؛ بخش ۵-۱ به "بررسی تغییرات نشست‌های پلاستیک و الاستیک خاک مسلح در پروسه‌ی بارگذاری-باربرداری تناوبی" اختصاص دارد و بخش ۵-۲ به "بررسی رفتار فراتناوبی خاک مسلح" در حالتی که از مخلوط خاک-ذرات لاستیکی به-عنوان پرکننده‌ی چشمه‌های ژئوسل استفاده شده‌است می‌پردازد.

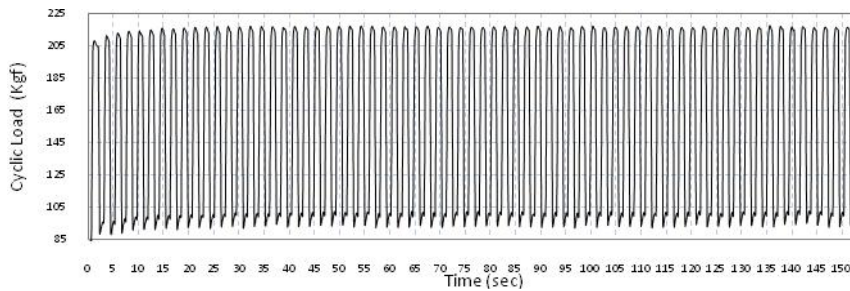
جدول ۳: خلاصه برنامه‌ی آزمایش‌ها

بارگذاری			دانسیتته مصالح بستر (gr/cm^3)	دانسیتته مصالح پرکننده (gr/cm^3)	مصالح پرکننده سلول‌ها	ابعاد ژئوسل (cm)				نام آزمایش	
استاتیکی فراتناوبی ۱ kPa/s	تناوبی ۱۲۳ kgf ۰/۴۶ Hz	استاتیکی اولیه ۱ kPa/s				a	b	C	H		
✓ گسیختگی	✓	✓	۱/۶۳	-	-	۰	۰	۰	۰	UNR-001	۱
✓ گسیختگی	✓	✓	۱/۶۳	۱/۶۳	ماسه متراکم	۳۰	۲۵	۵	۲/۵	R-G1-001	۲
✓ گسیختگی	✓	✓	۱/۶۳	۰/۶	گرانول لاستیک	۳۰	۲۵	۵	۲/۵	R-G1-002	۳
✓ گسیختگی	✓	✓	۱/۶۳	۱/۴۷	۹۰٪ ماسه + ۱۰٪ پودر لاستیک	۳۰	۲۵	۵	۲/۵	R-G1-003	۴
✓ گسیختگی	✓	✓	۱/۶۳	۱/۴۷	۹۰٪ ماسه + ۱۰٪ گرانول لاستیک	۳۰	۲۵	۵	۲/۵	R-G1-004	۵
✓ گسیختگی	✓	✓	۱/۶۳	۱/۴۷	ماسه بسیار سست	۳۰	۲۵	۵	۲/۵	R-G1-005	۶

۵-۱- بررسی اثر افزودن ذرات لاستیکی به خاک بر نشست‌های پلاستیک و الاستیک خاک مسلح

برای بررسی اثر ذرات لاستیکی مخلوط شده با خاک به‌عنوان پرکننده‌ی ژئوسل، سلول‌ها با استفاده از ماسه‌ی تنها، خرده‌لاستیک تنها و درصدی از خرده‌های لاستیک یا پودر لاستیک با شرایط تراکمی مشخص پر شدند (چکیده‌ی برنامه‌ی آزمایش‌های این بخش، در ردیف‌های ۱ الی ۶ جدول (۳) قابل مشاهده‌است). در مرحله‌ی اول، بارگذاری استاتیکی اولیه با نرخ ثابت و تا میزان بار مشخص انجام شد و در مرحله‌ی دوم ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری-باربرداری تناوبی با فرکانس ۰/۴۶ هرتز و دامنه ۱۲۳ kgf بر نمونه اعمال گردید. شکل (۷) بخشی از نمودار بارگذاری-باربرداری تناوبی را بر حسب زمان نشان می‌دهد.

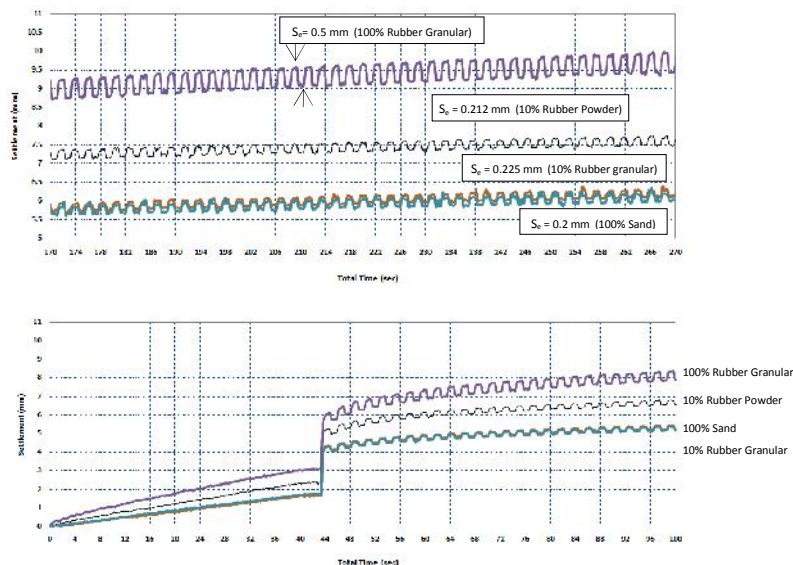




شکل ۷: نمونه ای از الگوی بارهای تناوبی (دامنه بار بر حسب زمان)

به دلیل حجم زیاد داده‌های ذخیره شده و جهت گویایی بیشتر نمودار نشست-زمان در فرایند بارگذاری-باربرداری تناوبی، بخش‌هایی از نمودار نشست-زمان تناوبی به صورت درشت‌نمایی شده در شکل (۸) آمده‌است.

با توجه به اینکه در حالت پرکردن سلول‌های ژئوسل صرفاً با استفاده از گرانول لاستیک، تراکم محتویات سلول‌ها به دلیل دانسیته‌ی کم دانه‌های لاستیک ($x_{Rubber\ granular} = 0.6\ gr/cm^3$) به شدت کاهش می‌یابد، لذا کاهش دانسیته‌ی محتویات سلول‌ها، یکی از عوامل کاهش دانه‌های لاستیک و سختی خاک‌مسلح در کنار شکل‌پذیری زیاد ذرات لاستیکی خواهد بود، لذا همانطوریکه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، استفاده از ۱۰٪ گرانول لاستیک به‌عنوان مصالح پرکننده‌ی ژئوسل موجب افزایش نشست‌های کلی در پروسه‌ی بارگذاری-باربرداری تناوبی (و نیز بارگذاری استاتیکی) و همچنین افزایش نشست‌های پلاستیک شده‌است؛ این در حالی است که با توجه به رفتار ارتجاعی دانه‌های لاستیک، انتظار می‌رود افزودن ذرات لاستیک به ماسه موجب ارتجاعی‌تر شدن رفتار مخلوط گردد که این موضوع کاملاً در بخش فوقانی شکل (۸) مشهود است. همچنین شکل فوق بیانگر این موضوع است که در حالت پر کردن سلول‌های ژئوسل با استفاده از گرانول لاستیک تنها، نشست‌های الاستیک نسبت به استفاده از ۱۰٪ ذرات لاستیکی (پودر و گرانول) در کنار ۹۰٪ ماسه، حدود ۲ برابر افزایش، و نیز در مقایسه با استفاده از ماسه‌ی تنها (به‌عنوان پرکننده)، حدود ۲/۵ برابر افزایش داشته است. در خصوص مقایسه‌ی مخلوط ماسه و ذرات لاستیکی نیز باید گفت با جایگزین نمودن ۱۰٪ درصد وزن ماسه با استفاده از ذرات لاستیکی و تبدیل ماسه به مخلوط ماسه-ذرات لاستیک، نشست‌های الاستیک تقریباً ۱/۱ شده‌است. جهت تفسیر و مقایسه‌ی بهتر نشست‌های پلاستیک و الاستیک بر حسب سیکل‌های بارگذاری-باربرداری تناوبی در اثر افزودن ذرات لاستیک به خاک پرکننده‌ی سلول‌های ژئوسل، از شکل (۹) استفاده شده‌است. لازم به یادآوری است مطابق جدول (۳)، دانسیته‌ی توده‌ی متشکل از گرانول لاستیک برابر $x = 0.6\ gr/cm^3$ و دانسیته‌های ماسه‌ی خیلی سست، ماسه‌ی حاوی ۱۰٪ گرانول و ماسه‌ی حاوی ۱۰٪ پودر لاستیک، $x = 1.47\ gr/cm^3$ می‌باشد.



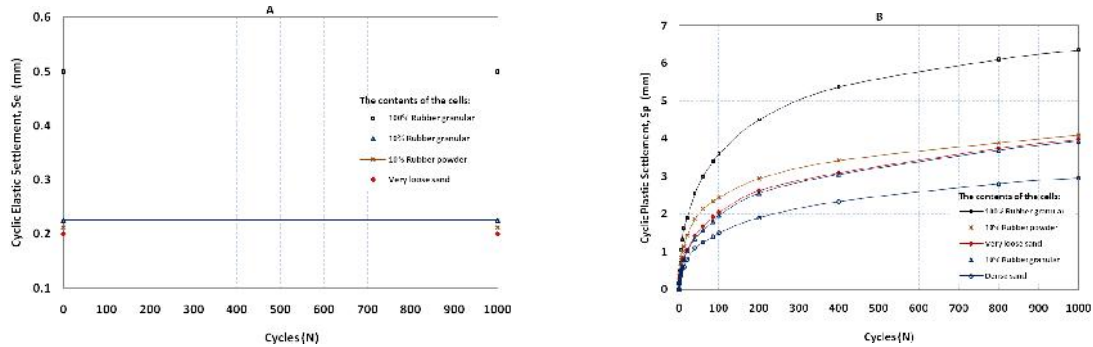
شکل ۸: درشت‌نمایی بخش‌هایی از نمودار نشست-زمان در فرایند بارگذاری-باربرداری تناوبی

همانطوریکه در شکل (۹) مشاهده می‌شود استفاده از ۱۰٪ گرانول لاستیک به‌عنوان پرکننده‌ی سلول‌های ژئوسل منجر به افزایش چشمگیر نشست‌های پلاستیک و الاستیک خواهد شد ولی استفاده از ۱۰٪ گرانول لاستیک با ذرات درشت‌تر از دانه‌های ماسه (مطابق رابطه‌ی (۱)): $\frac{2}{188}$ "ضریب اندازه‌ی نسبی گرانول لاستیک" منجر به کاهش ناچیز در نشست‌های پلاستیک و نیز افزایش تقریباً ۱۰ درصدی در نشست‌های

الاستیک خاک مسلح با ژئوسل شده است. این درحالی است که استفاده از ۱۰٪ پودر لاستیک با ذرات کوچکتر از دانه‌های ماسه (مطابق رابطه‌ی (۱): $0.24 = \text{"ضریب اندازه‌ی نسبی پودر لاستیک"}$) منجر به افزایش تغییر شکل‌های پلاستیک شده است. جهت مقایسه‌ی دقیق‌تر نرخ کاهش نشست‌های پلاستیک و الاستیک، در این پژوهش از پارامترهایی تحت عنوان نسبت نشست پلاستیک^۱، نسبت نشست الاستیک^۲ و نسبت نشست کل^۳ در هر سیکل بارگذاری-باربرداری استفاده شده است که مطابق رابطه‌ی (۲) تعریف می‌شود:

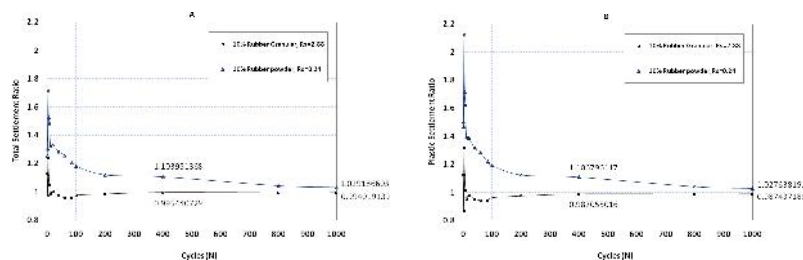
$$PSR_{cycle,N} = \frac{\text{Plastic settlement in cycle } N_{\text{rubber-soil mixture}}}{\text{Plastic settlement in cycle } N_{\text{soil}}} \quad \& \quad ESR_{cycle,N} = \frac{\text{Elastic settlement in cycle } N_{\text{rubber-soil mixture}}}{\text{Elastic settlement in cycle } N_{\text{soil}}}$$

$$\& \quad TSR_{cycle,N} = \frac{\text{Total settlement in cycle } N_{\text{rubber-soil mixture}}}{\text{Total settlement in cycle } N_{\text{soil}}} = \frac{(S_e + S_p)_{\text{rubber-soil mixture}}}{(S_e + S_p)_{\text{soil}}} \quad (2)$$



شکل ۹: (A) نمودار نشست الاستیک بر حسب تعداد سیکل برای خاک مسلح (ژئوسل حاوی پرکننده‌های مختلف) (B) نمودار نشست پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای خاک مسلح (ژئوسل حاوی پرکننده‌های مختلف)

بر این اساس، نسبت نشست پلاستیک و نسبت نشست کل بر حسب تعداد سیکل‌های بارگذاری-باربرداری، برای مخلوط ماسه‌ی حاوی ۱۰٪ ذرات لاستیک در شکل (۱۰) آمده است.

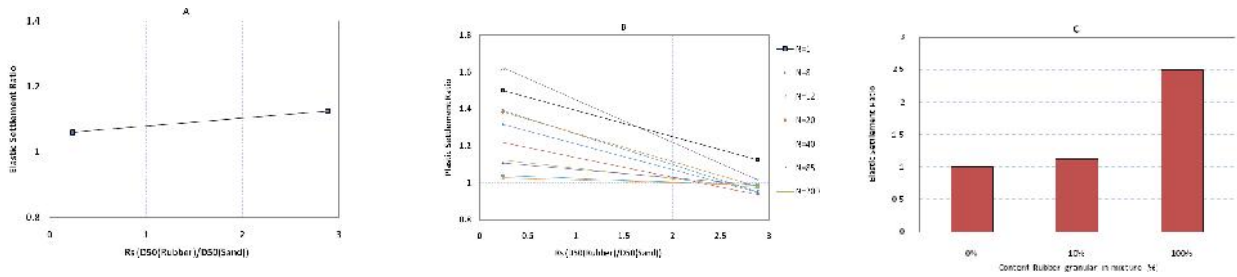


شکل ۱۰: (A) نمودار نسبت نشست الاستیک بر حسب تعداد سیکل برای خاک مسلح (ژئوسل حاوی پرکننده‌های مختلف) (B) نمودار نسبت نشست پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای خاک مسلح (ژئوسل حاوی پرکننده‌های مختلف)

شکل (۱۰) نشان می‌دهد در سیکل‌های اولیه ($N < 20$)، افزودن گرانول لاستیک به ماسه ($R_s = 2.88 > 1$)، نشست‌های کل و پلاستیک را افزایش داده است ولی در سیکل‌های بالاتر ($N > 20$) منجر به کاهش نشست‌های الاستیک و پلاستیک شده است، به نظر می‌رسد این بی‌نظمی اولیه در نمودار به دلیل توزیع تصادفی دانه‌های لاستیک در مخلوط ماسه-لاستیک بوده است که پس از طی تعداد سیکل‌های خاص به رفتار منطقی (صعود یا نزول در مقدار نسبت نشست) و باثبات‌تر رسیده است. در خصوص افزودن پودر لاستیک به خاک نیز ($R_s = 0.24 < 1$) باید گفت که هر دو مورد نشست‌های کل و پلاستیک در تمام سیکل‌ها افزایش یافته‌اند (البته نسبت افزایش نشست در سیکل‌های اولیه بیشتر بوده است و این به دلیل ماهیت رفتارهای تناوبی خاک‌های سست است که در سیکل‌های اولیه نشست بیشتری را تجربه خواهند کرد تا رفته‌رفته تراکم آن‌ها افزایش یابد) همچنین شکل فوق 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 (۱۰)) رسیده است، این موضوع می‌تواند به دلیل همگنی بیشتر مخلوط ماسه-پودر لاستیک در قیاس با ماسه-گرانول لاستیک باشد. شکل (۱۱) به مقایسه‌ی شفاف‌تر نسبت نشست پلاستیک و نسبت نشست الاستیک بر حسب ضریب اندازه‌ی نسبی دانه‌ها و درصد دانه‌های لاستیک، پرداخته است.

- 1- Plastic Settlement Ratio, PSR
- 2 - Elastic Settlement Ratio, ESR
- 3 - Total Settlement Ratio, TSR



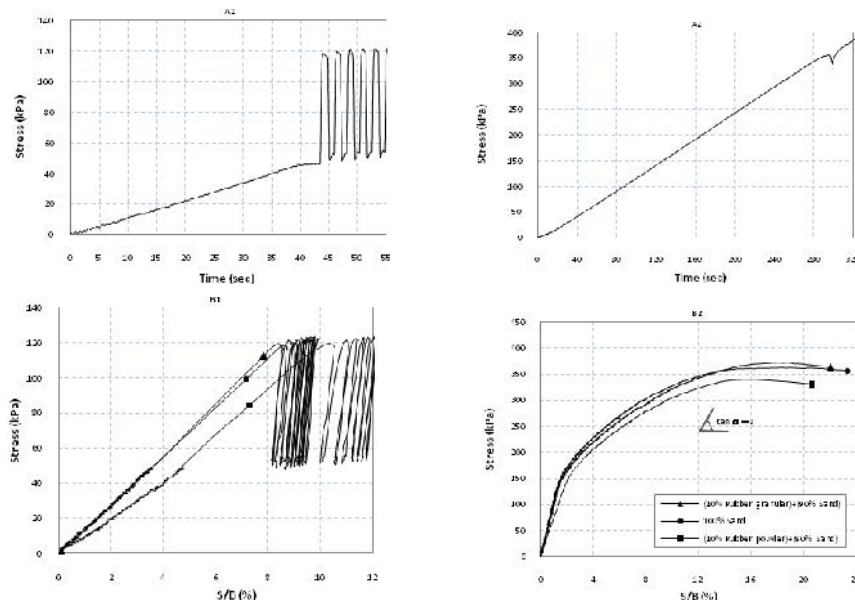


شکل 1: (A) نمودار 'نسبت نشست الاستیک' بر حسب ضریب اندازه نسبی دانه‌های لاستیک به ماسه
 (B) نمودار 'نسبت نشست پلاستیک' بر حسب ضریب اندازه نسبی دانه‌های لاستیک به ماسه در سیکل‌های مختلف
 (C) نمودار مقایسه‌ی تغییرات 'نسبت نشست الاستیک' بر حسب درصد گرانول لاستیک در سلول‌های ژئوسل

همانطوریکه قبلاً نیز بیان شد حضور ذرات لاستیکی در ماسه، رفتار تناوبی مخلوط حاصل را ارتجاعی‌تر خواهد نمود (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 پلاستیک (ماندگار) نیز در سیکل‌های بالاتر کاهش یافته‌اند که قضاوت در این خصوص، انجام آزمایشات بیشتر و با ضرایب اندازه نسبی متنوع‌تری را می‌طلبد. ولی موضوعی که با قاطعیت می‌توان بیان کرد این است که حضور ذرات لاستیکی در توده‌ی خاک رفتار را ارتجاعی‌تر خواهند نمود ولی اثر آن‌ها در کاهش یا افزایش نشست‌های کل و پلاستیک توده‌ی خاک، نیازمند در نظر گرفتن پارامترهای متعددی از جمله ابعاد دانه‌ها، تراکم مخلوط، حالت قرارگیری در مخلوط و... در کنار ملاحظات اجرایی و اقتصادی است.

۵-۲- بررسی اثر افزودن ذرات لاستیک به خاک بر رفتار فراتناوبی آن

به منظور بررسی رفتار فراتناوبی^۲ خاک مخلوط‌شده با ذرات لاستیک، از نتایج آزمایشات ردیف‌های ۴ الی ۶ جدول (۳) استفاده گردید. نحوه‌ی بارگذاری بدین صورت بود که پس از پایان پروسه‌ی بارگذاری-باربرداری تناوبی تا ۱۰۰۰ سیکل (که در بخش قبل به آن پرداخته شد)، بارگذاری استاتیکی با نرخ ثابت و تا گسیختگی کامل نمونه انجام شد و منحنی‌های بار-نشست برای نمونه‌های مختلف ثبت گردید. نمودارهای تنش اعمالی بر حسب S/B ، برای سه مصالح پرکننده‌ی سلول‌های ژئوسل در کنار نمودار تنش-زمان برای بارگذاری استاتیکی اولیه و بارگذاری استاتیکی ثانویه (فراپنایمیکی) در شکل (۱۲) آمده است.

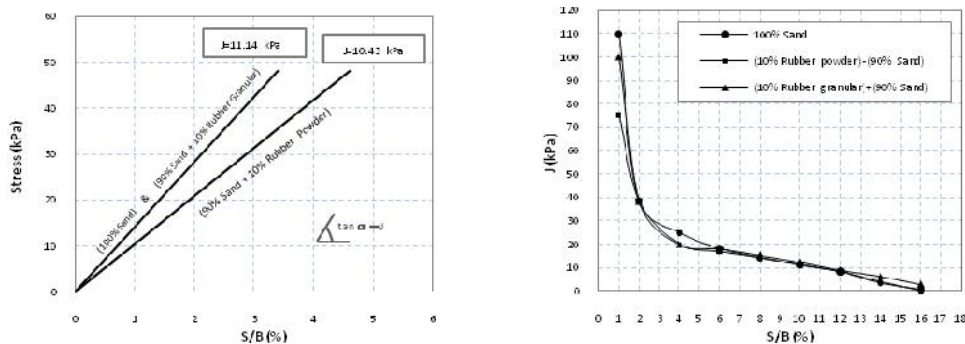


شکل ۱۲: (A1 و B1) نمودارهای تنش-زمان و تنش بر حسب S/B در بارگذاری استاتیکی اولیه و اوایل بارگذاری تناوبی
 (A2 و B2) نمودارهای تنش-زمان و تنش بر حسب S/B در بارگذاری استاتیکی ثانویه (برای سه نوع مصالح پرکننده)

1- Residual
 2- Post-Cyclic



همانطوریکه در شکل (۱۲) نیز نشان داده شده است، شیب نمودار "تنش-S/B" بیانگر سختی خاک مسلح می‌باشد که در این مقاله با نماد J معرفی شده است. نمودارهای فوق نشان می‌دهند که پروسه‌ی 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 B1 و B2 در شکل فوق نشان می‌دهند در بخش بارگذاری استاتیکی اولیه، درحالت‌هایی که سلول‌های ژئوسل با "ماسه‌ی تنها" 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 در حالت بارگذاری استاتیکی ثانویه (فرا تناوبی) نیز مشاهده می‌شود. جهت روشن‌تر شدن مطلب، مقادیر شیب مماس‌های رسم شده بر نمودار B2 شکل (۱۲)، در جدول (۴) و منحنی سختی-S/B آن در شکل (۱۳) آمده است. بخش استاتیکی نمودار B1 شکل (۱۲) نیز با دو خط و با دقت نسبتاً زیاد جایگزین شده است که نتیجه‌ی آن در نمودار سختی بر حسب S/B در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود.



شکل ۱۳: (A) نمودار خطی تنش بر حسب S/B در بخش بارگذاری استاتیکی اولیه (برای سه نوع مصالح پرکننده‌ی چشمه‌های ژئوسل) (B) نمودار سختی بر حسب S/B در بارگذاری استاتیکی ثانویه (برای سه نوع مصالح پرکننده‌ی چشمه‌های ژئوسل)

جدول ۴: مقادیر سختی (J) در درصد‌های مختلف S/B برای بارگذاری استاتیکی فراتناوبی

S/B (%)	سختی (کیلو پاسکال)		
	۱۰۰٪ ماسه*	۹۰٪ ماسه + ۱۰٪ پودر لاستیک*	۹۰٪ ماسه + ۱۰٪ گرانول لاستیک*
۱	۱۱۰	۷۵	۱۰۰
۲	۳۸/۴۶	۳۸/۴۶	۳۸/۴۶
۴	۲۵	۲۰	۲۰
۶	۱۸/۱۸۱	۱۶/۶۶۶	۱۸/۱۸۱
۸	۱۴/۲۸	۱۴/۲۸۵	۱۴/۳۸۴
۱۰	۱۱/۱۱۱	۱۱/۱۱۱	۱۲/۵
۱۲	۸/۳۳۳	۸/۲۳۳	۹/۰۹
۱۴	۳/۴۴۸	۳/۸۴۶	۶/۵
۱۶	۰/۶۶۶	۰	۲/۷۵

* مصالح پرکننده‌ی سلول‌های ژئوسل

نتایج جدول (۴) و شکل (۱۳) حاکی از این است که در اثر اعمال ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری-باربرداری با دامنه‌ی ۱۲۳ kgf بر نمونه‌ی خاک مسلح شده با ژئوسل، سختی نمونه نسبت به حالت قبل، در کرنش‌های اولیه بسیار افزایش یافته است؛ به‌عنوان مثال در کرنش ۲٪ سختی فراتناوبی خاک مسلح نسبت به حالت قبل از بارگذاری-باربرداری تناوبی بیش از ۳ برابر شده است. از طرف دیگر نمودارهای تنش-S/B حالت شبه-دوخطی پیدا کرده است. البته بررسی مفصل رفتار فراتناوبی خاک مسلح نیازمند انجام آزمایشات بیشتر و با دامنه‌های متنوعی از بار تناوبی می‌باشد.



تفسیر نتایج این پژوهش به طور مفصل در بخش (۵) بیان گردید، لذا صرفاً جهت جمع بندی موارد مذکور باید گفت نکته‌ی حائز اهمیت در عملکرد مطلوب ژئوسل در جهت افزایش سختی و باربری خاک مسلح، تراکم مصالح پرکننده‌ی ژئوسل است که این موضوع در کنار سایر پارامترها، به‌عنوان آیتمی مهم و کلیدی در راستای شکوفایی هرچه بیشتر توانایی‌های ژئوسل نقش اساسی ایفا می‌کند به طوری که در شرایط مشابه، افزایش سختی و ظرفیت باربری در حالت استفاده از مصالح مترکم می‌تواند بیش از ۲۰ درصد بیشتر از حالت استفاده از مصالح سست (به-عنوان پرکننده) شود. در این مقاله به بررسی نقش ذرات لاستیک به‌عنوان مصالح پرکننده‌ی سلول‌های ژئوسل در مخلوط با خاک پرداخته شد و نتایج نشان داد که افزودن ذرات لاستیکی به خاک پرکننده‌ی سلول‌ها، بسته به درصد ذرات لاستیکی در مخلوط و نیز اندازه‌ی نسبی آن‌ها در مقایسه با دانه‌های خاک، می‌تواند منجر به کاهش یا افزایش نشست‌های پلاستیک شود. علاوه بر این می‌توان گفت که وجود ذرات لاستیکی در لابه‌لای دانه‌های خاک، رفتار مخلوط خاک-خرده‌لاستیک را ارتجعی‌تر خواهد کرد و به عبارت دیگر، افزایش نشست‌های الاستیک را موجب خواهد شد لذا در صورت استفاده‌ی بهینه از خرده‌لاستیک در مخلوط با خاک، می‌توان ضمن افزایش سهم تغییر شکل‌های الاستیک، نشست‌های کل را نیز کنترل کرده و کاهش داد که نتیجه‌ی این موضوع منجر به کاهش یافتن سهم تغییر شکل‌های ماندگار خاک خواهد شد. در خصوص بررسی رفتار استاتیکی ثانویه (فراثوابی) خاک نیز باید گفت پروسه‌ی بارگذاری-باربرداری تناوبی بسته به دامنه‌ی بار و تعداد سیکل‌های اعمالی، در صورت عدم گسیختگی نمونه، می‌تواند منجر به افزایش چشمگیر در میزان سختی خاک مسلح پس از پروسه‌ی بارگذاری-باربرداری تناوبی شود که این افزایش سختی در کرنش‌های پایین بسیار زیاد خواهد بود.

۷- مراجع

- میرمحمدحسینی سیدمجدالدین، محمدی محمودرضا و کارگر محسن (۱۳۹۳) بررسی آزمایشگاهی تأثیر ابعاد هندسی ژئوسل بر رفتار بار-نشست پی نواری واقع بر خاک ماسه‌ای مسلح‌شده با ژئوسل، مجموعه مقالات اولین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، تهران، ایران
- میرمحمدحسینی سیدمجدالدین و عارف‌پور بابک (۱۳۷۸) مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای، انتشارات پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
- میرمحمدحسینی سیدمجدالدین و کارگر محسن (۱۳۹۲) دینامیک خاک کاربردی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران
- موسوی سیدحسن، دانه‌کار افشین، اژدری دانیال (۱۳۹۰) بررسی آثار زیست‌محیطی استفاده از تیرهای فرسوده به عنوان زیستگاه‌های مصنوعی دریایی، محیط‌زیست و توسعه، سال ۲، شماره ۳، صفحات ۱۵ تا ۲۲
- Gotteland P, Lambert S and Balachowski L (2005) Strength characteristics of tyre chips-sand mixture, *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol XXVII: 1-2
- Hataf N and Rahimi MM (2006) Experimental investigation of bearing capacity of sand reinforced with randomly distributed tire shreds, *Construction and Building Materials*, 20: 910-916
- Moghaddas Tafreshi SN and Dawson AR (2010b) Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 28: 72-84
- Pokharel SK, Han J, Leshchinsky D, Parsons RL and Halahmi I (2010) Investigation of factors influencing behavior of single geocell-reinforced bases under static loading, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 28: 570-578
- Sekine E, Muramoto K and Tarumi H (1994) Study on Properties of road bed reinforced with geocells, *Quarterly report of railway technical research institute*, 35(1): 23-31, Japan
- Tsang HHo, MNeaz Sheikh and Lam N (2007) Rubber-soil cushion for earthquake protection, *Australian Earthquake Engineering Society Conference*, pp: 1-8
- Yoon YW, Cheon S and Kang D (2004) Bearing capacity and settlement of tire-reinforced sands, *Geotextiles and Geomembranes* Vol 22: 439-453