

مدلسازی فیزیکی بهبود ظرفیت باربری ماسه سست با ژئوسل ساخته شده از بطری‌های

PET

مانشت ملکی واثق^۱، وحید رستمی^{۲*}، حمیدرضا ربیعی فر^۳

۱- گروه مهندسی عمران، واحد بین‌الملل کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، کیش، ایران

Mral eki vasegh@ au.ac.i r

۲- گروه مهندسی عمران، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

Rost ami .vahi d@ au.ac.i r

۳- گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

rabiefar52@ iau.ac.ir

چکیده

بحران زباله‌های پلاستیکی، به‌ویژه بطری‌های پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)، از چالش‌های جدی زیست‌محیطی محسوب می‌شود که پیامدهای مخربی برای اکوسیستم‌ها دارد. در همین راستا، این پژوهش با هدف ارائه راهکاری نوآورانه و پایدار، استفاده مجدد از بطری‌های PET در قالب ژئوسل برای بهسازی بسترهای خاکی را مورد بررسی قرار می‌دهد. بدین منظور، مدلی فیزیکی در مقیاس آزمایشگاهی طراحی شد و آزمایش‌های بارگذاری صفحه روی پی سطحی در ماسه سست، در دو حالت بدون تسلیح و مسلح‌شده با ژئوسل‌های ساخته شده از بطری‌های PET، انجام گرفت. پارامترهای هندسی ژئوسل شامل ارتفاع، عمق قرارگیری و عرض لایه بررسی شدند تا تأثیر آن‌ها بر ظرفیت باربری، سختی اولیه و رفتار بار-تنشست تحلیل شود. نتایج نشان داد استفاده از ژئوسل‌های PET به‌طور چشمگیری موجب افزایش ظرفیت باربری و سختی اولیه پی و بهبود توزیع تنش زیر فونداسیون می‌شود. در حالت بهینه، ظرفیت باربری نهایی تا حدود هشت برابر نسبت به بستر بدون تسلیح افزایش یافت. افزایش ارتفاع ژئوسل توزیع بار و مقاومت فشاری بستر را بهبود داد، در حالی که کاهش عمق قرارگیری، انتقال مؤثر بار از پی به ژئوسل و خاک را تقویت کرد. همچنین افزایش عرض ژئوسل باعث تشدید اثر غشایی و کاهش تمرکز تنش شد. در مجموع، استفاده از بطری‌های PET در ساخت ژئوسل روشی اقتصادی و دوستدار محیط‌زیست برای بهبود عملکرد ژئوتکنیکی پی‌های سطحی است.

کلمات کلیدی

بطری PET، ظرفیت باربری پی، ژئوسل بطری پلاستیکی، ارتفاع ژئوسل، عمق قرارگیری ژئوسل.

یکی از چالش‌های اساسی جوامع امروزی، افزایش مداوم تولید زباله، به‌ویژه زباله‌های پلاستیکی است. بطری‌ها و سایر محصولات پلاستیکی به دلیل دوام بالا و نرخ بسیار پایین تجزیه‌پذیری (با زمان تجزیه‌ای در حدود ۷۰ تا ۴۵۰ سال)، به یکی از معضلات جدی زیست‌محیطی تبدیل شده‌اند [۱]. مدیریت ناکارآمد این زباله‌ها منجر به آلودگی گسترده محیط‌زیست و تجمع میلیون‌ها تن پسماند پلاستیکی در اکوسیستم‌های دریایی و خشکی شده است. در این میان، پلیمرهای مبتنی بر پلی‌اتیلن حدود ۳۰ درصد از کل زباله‌های پلاستیکی را به خود اختصاص می‌دهند [۲]. یکی از مهم‌ترین این پلیمرها، پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) است که به دلیل نسبت بالای استحکام به وزن، انعطاف‌پذیری مناسب، پایداری شیمیایی و مقاومت در برابر بسیاری از مواد شیمیایی، به‌طور گسترده در صنایع مختلف، به‌ویژه در بسته‌بندی مواد غذایی و نوشیدنی‌ها و همچنین صنعت نساجی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳، ۴]. با این حال، نرخ پایین بازیافت و تجزیه‌ناپذیری بلندمدت این ماده موجب انباشت قابل توجه آن در محیط‌زیست شده است؛ به‌نحوی که برآورد می‌شود در هر ثانیه، بیش از ۱۵۰۰ بطری پلاستیکی PET در سراسر جهان مصرف و دور ریخته می‌شود [۵].

استراتژی‌های کنونی مدیریت زباله‌های PET عمدتاً شامل چهار رویکرد است: دفن، سوزاندن، استفاده مجدد و بازیافت. هرچند دفن زباله روشی رایج به شمار می‌رود، اما نیازمند زمین‌های وسیع بوده و از منظر زیست‌محیطی قابل قبول نیست [۶]. سوزاندن نیز ضمن کاهش حجم زباله، منجر به تولید گازهای سمی و تشدید آلودگی هوا می‌شود [۷]. استفاده مجدد از بطری‌های PET، به‌ویژه در کاربردهای مرتبط با مواد غذایی، به دلیل احتمال آلودگی ثانویه، از ایمنی کافی برخوردار نیست [۸]. در نهایت، بازیافت نیز با محدودیت‌های اقتصادی و افت کیفیت محصول در هر چرخه همراه است و در نتیجه سهم اندکی در مدیریت زباله‌های پلاستیکی ایفا می‌کند [۹].

در دو دهه اخیر، تلاش‌های متعددی برای بهره‌گیری از پلاستیک‌های دورریخته‌شده در پروژه‌های زیرساختی صورت گرفته است. در این میان، زباله‌های PET در حوزه‌های بتن، آسفالت و مهندسی ژئوتکنیک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در بتن، جایگزینی بخشی از اجزای ریزدانه با ذرات پلاستیکی موجب بهبود کارایی بتن و کاهش جذب آب آن شده است [۱۰]. صدیق و همکاران (۲۰۰۸) [۱۱] گزارش کردند که افزودن الیاف پلاستیکی به بتن، مقاومت کششی را افزایش داده، وزن و نفوذپذیری را کاهش داده و دوام بتن را در برابر شرایط محیطی سخت بهبود می‌بخشد. همچنین ملات‌های حاوی ورق‌های PET در دماهای بالا مقاومت فشاری بیشتری از خود نشان داده‌اند [۱۲].

افزودن گرانول‌های PET به مخلوط‌های آسفالتی نیز منجر به افزایش دوام و مقاومت در برابر تغییرشکل می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که ترکیب PET با خرده‌پلاستیک، مدول الاستیسیته و مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌های آسفالت با ماتریس سنگی (SMA) را بهبود داده و عمر خستگی آن‌ها را افزایش می‌دهد [۱۳]. حضور ۴ تا ۶ درصد PET در مخلوط‌های SMA موجب بهینه شدن مدول الاستیسیته، مقاومت در برابر رطوبت و دوام این مخلوط‌ها گزارش شده است [۱۴].

در مهندسی ژئوتکنیک، ضایعات PET به عنوان مصالح تقویتی مؤثر برای بهبود خواص مکانیکی خاک معرفی شده‌اند. واکنش‌پذیری پایین این مواد با محیط خاک، از بروز اثرات منفی فنی و زیست‌محیطی جلوگیری کرده و امکان استفاده ایمن از PET به عنوان عامل تقویت‌کننده خاک را فراهم می‌کند. اشکال مختلف زباله‌های PET، از جمله ورق، نوار، گرانول، الیاف و پودر، برای افزایش ظرفیت باربری و کاهش تراکم‌پذیری خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۵-۲۴]. نتایج مطالعات متعدد نشان می‌دهد که افزودن درصد‌های اندکی از پلاستیک خردشده می‌تواند مقاومت برشی و کششی خاک را به طور چشمگیری افزایش دهد [۲۵].

با وجود این مزایا، استفاده از ضایعات پلاستیکی در قالب‌های خردشده (الیاف، گرانول یا ورق) با چالش‌هایی همراه است؛ از جمله آلودگی فیزیکی خاک و دشواری جداسازی مجدد این مواد در آینده. در مقابل، استفاده از بطری‌های PET در شکل اصلی آن‌ها و در قالب تشک‌های ژئوسل مهندسی‌شده، رویکردی نوآورانه است که ضمن رفع این مشکلات، هزینه‌های مربوط به فرآیند خردکردن بطری‌ها را

نیز حذف می‌کند. پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه نتایج امیدوارکننده‌ای ارائه کرده‌اند. به عنوان نمونه، دوتا و مندال (۲۰۱۵) [۲۶] یک تشک ژئوسل متشکل از بطری‌های PET پرشده با خاکستر بادی را پیشنهاد کردند که هنگام قرارگیری بر روی لایه‌های ژئوتکستایل یا ژئوگرید، عملکرد بهتری نشان داد. الحداد و همکاران (۲۰۲۲) [۲۷] گزارش کردند که استفاده از بطری‌های PET پرشده با ماسه در بالای خطوط لوله مدفون، منجر به افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست سطحی می‌شود. مقدس‌تفرشی و همکاران (۲۰۲۱) [۲۸] نشان دادند که استفاده از بطری‌های پلاستیکی PET پرشده با خاک به عنوان تقویت‌کننده خاک، ظرفیت باربری را افزایش داده و نشست خاک تحت بارگذاری سیکنی را کاهش می‌دهد؛ در حالی که ترکیب آن با کمر بند پلی‌پروپیلن یا لایه ژئوگرید اضافی، عملکرد بهتری نسبت به حالت‌های بدون تقویت ارائه می‌کند. همچنین، مقدس‌تفرشی و همکاران (۲۰۲۲) [۲۹] نشان دادند که استفاده از بطری‌های PET پرشده با ماسه در آزمایش بارگذاری صفحه، موجب افزایش حدود سه‌برابری ظرفیت باربری و کاهش تا ۸۰ درصدی نشست خاک نسبت به حالت بدون تقویت می‌شود. شاه و همکاران (۲۰۲۲) [۳۰] با انجام آزمایش‌های نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) برای مقایسه ژئوسل‌های مبتنی بر بطری پلاستیکی با ژئوسل‌های تجاری HDPE، گزارش کردند که عملکرد ژئوسل‌های بطری پلاستیکی با ژئوسل‌های HDPE قابل مقایسه است. همچنین شاهباز داندین و همکاران (۲۰۲۴) [۳۱] با ارائه جایگزینی نوآورانه برای ژئوسل‌های سنتی نشان دادند که استفاده از بطری‌های PET در قالب سلول‌های مهندسی‌شده می‌تواند ظرفیت باربری خاکستر بادی متراکم را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد.

در اغلب تحقیقات مربوط به استفاده از ضایعات بطری‌های پلاستیکی برای بهبود خواص خاک، این ضایعات معمولاً در قالب‌های پودری، گرانول، چیپسی یا ورقه‌ای به کار رفته‌اند و فرمت بطری کامل کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در حالی که استفاده از بطری کامل، علاوه بر حذف نیاز به خرد کردن، امکان جداسازی این مصالح از خاک بهسازی‌شده را در صورت لزوم فراهم می‌کند؛ در مقابل، خاک بهسازی‌شده با پودر، چیپس یا ورق پلاستیکی عملاً به توده‌ای از خاک آلوده تبدیل می‌شود. در معدود پژوهش‌هایی که از بطری کامل استفاده شده، عمدتاً شبکه‌ای از بطری‌های با سر و ته بسته (بطری سالم) به کار رفته است. این فرمت به دلیل اصطکاک اندک سطوح سر و ته بطری‌ها با خاک اطراف، مقاومت بیرون‌کشیدگی پایینی داشته و در نتیجه تنها افزایش محدودی در ظرفیت باربری ایجاد می‌کند. این در حالی است که بریدن سر و ته بطری‌ها و تشکیل شبکه‌ای از آن‌ها مشابه ژئوسل‌های صنعتی می‌تواند افزایش قابل توجهی در ظرفیت باربری بسترهای سست ایجاد نماید.

بر این اساس، در تحقیق حاضر از شبکه بطری‌های پلاستیکی ضایعاتی PET در قالب ژئوسل‌های صنعتی به عنوان مسلح‌کننده برای تقویت بستر استفاده شده است. این رویکرد علاوه بر کمک به مدیریت پسماندهای پلاستیکی، یک جایگزین پایدار و مقرون‌به‌صرفه برای ژئوسل‌های صنعتی فراهم می‌آورد. به‌کارگیری این مواد بازیافتی موجب کاهش هزینه‌های ساخت و ارتقای پایداری زیست‌محیطی می‌شود. در این پژوهش، به‌طور خاص بر ابعاد هندسی و ویژگی‌های شبکه‌های بطری‌ها تأکید شده و اثرات آن‌ها بر عملکرد بستر مورد بررسی قرار گرفته است.

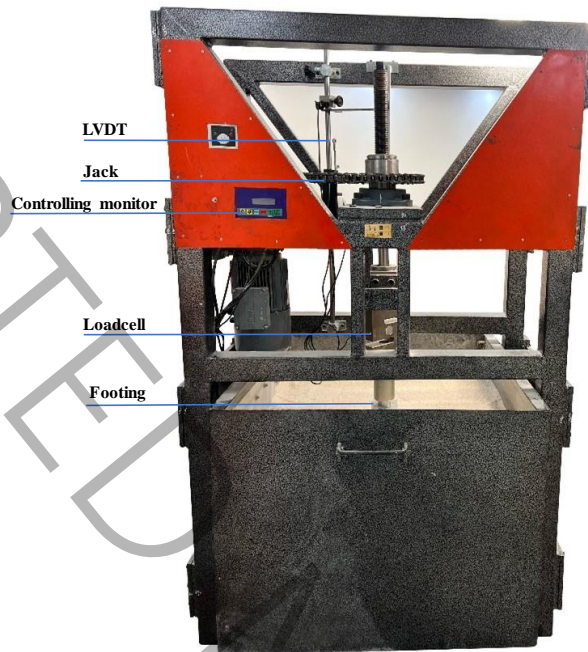
۲ - شرح مدل فیزیکی و برنامه آزمایش‌ها

در این مطالعه، ظرفیت باربری یک پی مربعی صلب بر روی ماسه خشک، با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس بررسی شده است. مدل فیزیکی شامل مخزن ماسه، پی، ژئوسل ساخته شده از بطری‌های پلاستیکی، سیستم بارگذاری و ابزارهای اندازه‌گیری و ثبت داده‌ها بوده که در شکل ۱ نشان داده شده است. مشخصات هر یک از اجزای مدل در ادامه به تفصیل شرح داده شده است.

۲-۱ - محفظه خاک و فونداسیون

به منظور مدل‌سازی بستر خاک، از یک محفظه با دیواره‌های فولادی صلب استفاده شده است. ابعاد محفظه باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا اثرات مرزی در ناحیه خاک مورد مطالعه به حداقل برسد و اطمینان حاصل شود که دیوارها حداقل تأثیر را بر توزیع تنش و تغییر شکل‌ها در داخل محیط خاک بارگذاری شده دارند. علاوه بر این، ارتفاع محفظه بر اساس عمق تأثیر تنش‌های ناشی از بارگذاری پی

تعیین می‌شود. بر این اساس، ابعاد داخلی محفظه ۱۱۰ سانتی‌متر در ۱۰۰ سانتی‌متر با ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر تنظیم شده است. یک صفحه فولادی مربعی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر برای شبیه‌سازی پی استفاده شده است. این صفحه از طریق یک شفت به یک جک بارگذاری متصل شده (شکل ۲) و بار اعمال شده از جک را به سطح خاک منتقل می‌کند. ضخامت صفحه بارگذاری ۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شده تا اطمینان حاصل شود که به عنوان یک پی صلب عمل می‌کند و تحت شرایط بارگذاری مختلف دچار تغییر شکل نمی‌شود.



شکل ۱: مدل فیزیکی جهت انجام آزمایشات ظرفیت باربری پی

Figure 1: Physical model setup for footing bearing capacity experiments



شکل ۲: پی و اتصال آن به لودسل و شفت بارگذاری

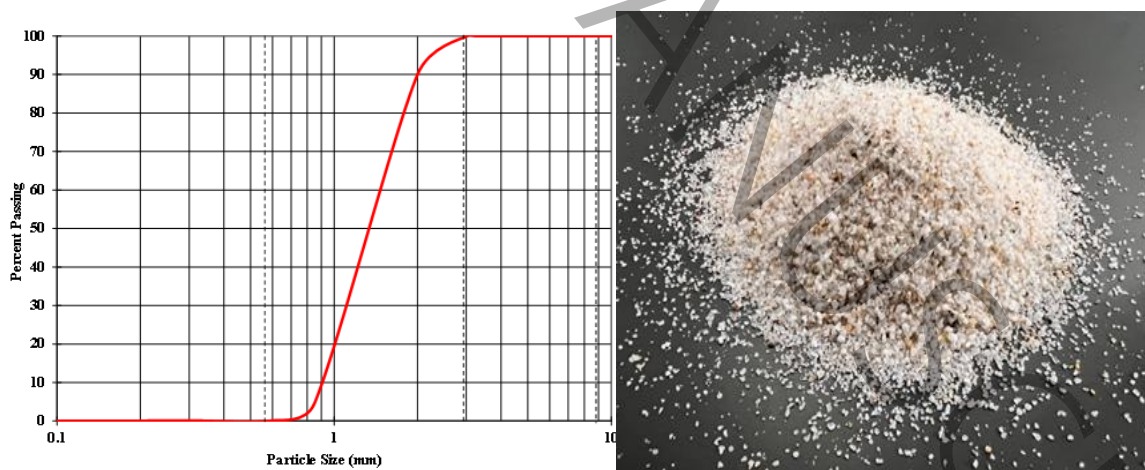
Figure 2: Footing with its connection to the load cell and loading shaft

۲-۲- ویژگی‌های خاک و آماده‌سازی بستر

در این مطالعه، از ماسه سیلیسی خشک با دانه‌بندی ضعیف استفاده شده است. برای جلوگیری از تولید گرد و غبار و جدایش ذرات در طول فرآیند بارش، ماسه فاقد ذرات ریز می‌باشد. اندازه متوسط ذرات (D_{50}) برابر با ۱/۴۵ میلی‌متر بوده و خاک بر اساس سیستم طبقه‌بندی USCS در گروه ماسه بدانه‌بندی (SP) قرار می‌گیرد. حداقل و حداکثر وزن مخصوص خشک این ماسه به ترتیب برابر با ۱۶,۴ و ۱۲,۸ کیلو نیوتن بر متر مکعب است. منحنی توزیع اندازه ذرات و نمای نزدیک از ماسه در شکل ۳ و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

برای آماده‌سازی بستر، از روش بارش ماسه استفاده شد که یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای ایجاد لایه‌های همگن با چگالی کنترل شده در مدل‌های آزمایشگاهی است. در این روش، چگالی نهایی خاک تابعی از ارتفاع سقوط ذرات و نرخ بارش می‌باشد. در این پژوهش، برای دستیابی به دانسیته نسبی ۳۵٪، ارتفاع بارش ۲۰ سانتی‌متر انتخاب گردید که در این حالت وزن مخصوص خشک حاصل برابر ۱۳/۸ کیلو نیوتن بر متر مکعب و زاویه اصطکاک مؤثر خاک ۳۲ درجه به دست آمد.

سیستم بارش شامل یک سینی تغذیه و صفحه مشبک فولادی بود. صفحه مشبک دارای سوراخ‌هایی به قطر ۴ میلی‌متر با فاصله مرکز به مرکز ۱۵ میلی‌متر بود تا جریان یکنواخت ماسه تضمین شود. دانه‌ها پس از عبور از صفحه، به صورت بارش آزاد در داخل جعبه مدل ریخته و لایه‌به‌لایه بستر خاک را تشکیل می‌دادند. برای اطمینان از دستیابی به چگالی هدف، پیش از اجرای آزمایش‌های اصلی، چندین تست کالیبراسیون انجام شد. تراکم لایه‌ها به ارتفاع سقوط و نرخ بارش وابسته می‌باشد. کالیبراسیون این سیستم با قراردادن ظروف با حجم مشخص در چند نقطه مخزن و سپس انجام بارش تا پر شدن ظروف و سپس وزن کردن آن‌ها انجام می‌شود. با داشتن وزن و حجم ظروف، دانسیته خاک محاسبه می‌شود. این کار برای حداقل ۳ نقطه از مخزن در ۳ آزمایش مختلف باید انجام گیرد تا یکنواختی و تکرارپذیری روش بارش تایید گردد.



شکل ۳: نمودار دانه بندی و نمای نزدیک از ماسه استفاده شده

Figure 3: Grain size distribution curve and close-up view of the used sand

پس از دستیابی به عمق موردنظر، فرآیند بارش ماسه متوقف شد و تشک ژئوسل ساخته‌شده از بطری‌های بازیافتی PET که از پیش باز شده و در شکل نهایی خود تثبیت شده بود، در محل تعیین شده قرار داده شد. به منظور جلوگیری از هرگونه اختلال در ساختار خاک اطراف و حفظ یکنواختی بستر، از یک قاب موقت از جنس پلکسی‌گلاس به عنوان راهنمای نصب استفاده گردید تا ژئوسل با حداقل

جابجایی در محل خود قرار گیرد. پس از استقرار ژئوسل، سلول‌های آن با روش بارش با ماسه پر شدند تا اندرکنش مناسب بین خاک و دیواره‌های سلول ایجاد شود. در ادامه، لایه‌های بعدی ماسه (در صورت مدفون بودن تشک ژئوسل) مجدداً با همان روش بارش خشک تا رسیدن به تراز نهایی ریخته شدند. در شکل ۴ نحوه آماده سازی نمونه برای بارگذاری نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات ماسه استفاده شده

Table 1: Properties of the used sand

value	واحد	مشخصات
۰/۹۱	میلیمتر	اندازه موثر ذرات (D_{10})
۱/۴۵	میلیمتر	اندازه میانگین ذرات (D_{50})
۱/۶۵	-	ضریب یکنواختی (C_u)
۰/۹۰	-	ضریب انحنا (C_c)
۱/۴۱	-	e_{max}
۰/۸۵	-	e_{min}
۰/۰۰	%	رطوبت (w)
۲/۸۵	-	چگالی ویژه (G_s)
*۳۲	زاویه	زاویه اصطکاک داخلی

* در چگالی نسبی ۳۵ درصد



شکل ۴: نحوه قرارگیری تشک در تانک آزمایش

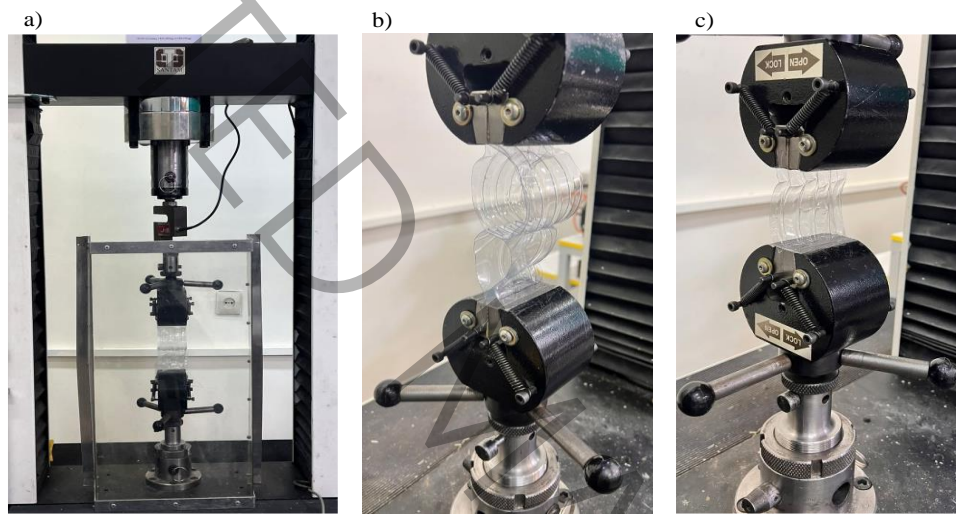
Figure 4: Positioning of the mattress inside the test tank

۲-۳- تشک ژئوسل بطری‌های پلاستیکی

در مطالعه حاضر، از بطری‌های پلاستیکی ۵۰۰ میلی‌لیتری با قطر ۵۶ میلی‌متر در فرمت ژئوسل برای مسلح سازی بستر خاکی استفاده شده است. بطری‌ها دارای ضخامت دیواره ۰/۲۵ میلی‌متر و مقاومت کششی ۲/۱۴ کیلونیوتن بر متر هستند. آزمایش کشش با استفاده از

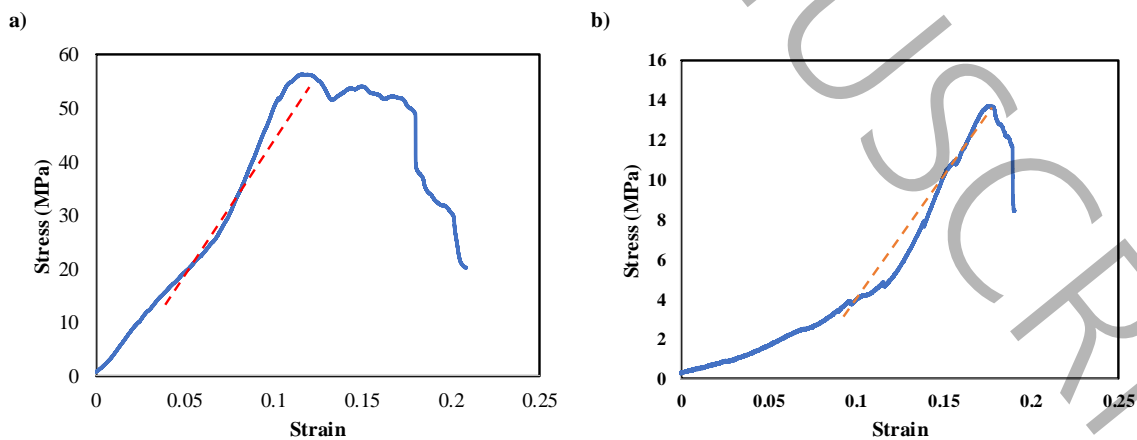
دستگاه آزمایش یونیورسال شکل ۵ به منظور تعیین مدول یانگ و مقاومت کششی بدنه بطری و اتصال میان بطری‌ها در ساختار تشک انجام شد. برای انجام آزمایش کشش بر روی بدنه بطری، نمونه‌ای از جنس بطری با عرض ۵ سانتی‌متر و طول کلی ۱۲ سانتی‌متر تهیه شد. این نمونه بین گیره‌های دستگاه آزمایش یونیورسال قرار گرفت و طول گیج (فاصله آزاد بین گیره‌ها) برابر با ۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه تنش محیطی (Hoop Stress) تنش غالب در بطری‌ها تحت فشار داخلی محسوب می‌شود، به دلیل رفتار محصورکننده آن‌ها، بارگذاری کششی در راستای شعاعی و عمود بر محور طولی بطری اعمال شد.

استاندارد مورد استفاده استاندارد ASTM D638 می‌باشد. همچنین، آزمایش کشش بر روی اتصال بین دو بطری، هر یک به ارتفاع ۵ سانتی‌متر، که به وسیله منگنه به یکدیگر متصل شده بودند، انجام گرفت. این مجموعه از دو سر توسط گیره‌های دستگاه مهار شد. در هر دو نوع آزمایش، نرخ بارگذاری با سرعت یکنواخت ۱ میلی‌متر بر دقیقه تا زمان شکست نمونه حفظ شد. نمودار تنش-کرنش بطری‌های پلاستیکی در شکل ۶ ارائه شده است و همینطور مشخصات بطری‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۵: (a) نمای کلی دستگاه تست یونیورسال، (b) آزمایش کشش اتصال بین بطری‌ها، و (c) آزمایش کشش بدنه بطری.

Figure 5: (a) Overall view of the universal testing machine, (b) tensile test of the connection between bottles, and (c) tensile test of the bottle body



شکل ۶: نمودار تنش-کرنش بطری‌های پلاستیکی (a) بدنه بطری، (b) اتصال بین بطری‌ها.

Figure 6: Stress-strain diagram of plastic bottles: (a) bottle body, (b) connection between bottles.

فرآیند ساخت تشک ژئوسل شامل بریدن سر و ته بطری‌ها به یک ارتفاع مشخص و قرار دادن و اتصال آن‌ها در کنار هم برای ایجاد ساختاری شبیه به ژئوسل‌های صنعتی است. برای بهبود اتصال و توزیع بهتر بار بین بطری‌ها، یک نوار پلاستیکی نازک بین هر جفت بطری قرار داده شده و به هم منگنه می‌شود. نمونه ای از تشک ژئوسل استفاده شده در آزمایش‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: تشک ژئوسل ساخته شده از بطری‌های پلاستیکی

Figure 7: Geocell mattress made of plastic bottles

۲-۴ - سیستم بارگذاری و ابزار دقیق

برای تعیین ظرفیت باربری پی در آزمایش‌ها، از یک سیستم بارگذاری استفاده شده است. این سیستم شامل یک جک الکترومکانیکی برای اعمال بارهای عمودی به پی با قابلیت تنظیم و کنترل سرعت، یک سلول بار S شکل با ظرفیت ۵۰ کیلونیوتن و دقت ۰/۰۱ کیلونیوتن برای اندازه‌گیری بار اعمال شده به پی توسط جک و یک LVDT با کورس ۱۰۰ میلی‌متر و دقت ۰/۰۱ میلی‌متر برای اندازه‌گیری نشست پی است. پس از قرار دادن پی بر روی بستر، بارگذاری توسط جک با سرعت ثابت ۱ میلی‌متر در دقیقه اعمال می‌شود. بارگذاری بصورت جابجایی-کنترل انتخاب شده تا اطمینان حاصل شود که پیک‌های احتمالی در منحنی‌های بار-نشست پی ثبت می‌شود. این در حالی است که در سیستم‌های نیرو-کنترل، افت بار پس از رسیدن به نقطه ظرفیت باربری حداکثر، ثبت نمی‌شود. در طول فرآیند بارگذاری، مقادیر نیرو و نشست به طور مداوم توسط سنسورهای سلول بار و LVDT ثبت شده و بر روی مانیتور دستگاه نمایش داده می‌شود. علاوه بر این، داده‌ها به طور همزمان از طریق اتصال کابلی به یک کامپیوتر منتقل و ذخیره می‌شوند.

جدول ۲: مشخصات بطری PET استفاده شده

Table 2: Properties of the used PET bottles

مقدار	واحد	مشخصات
۰/۲۵	میلی‌متر	ضخامت
۵۶/۰	میلی‌متر	قطر
۲/۱۴	کیلونیوتن بر متر	مقاومت کششی نهایی بدنه بطری

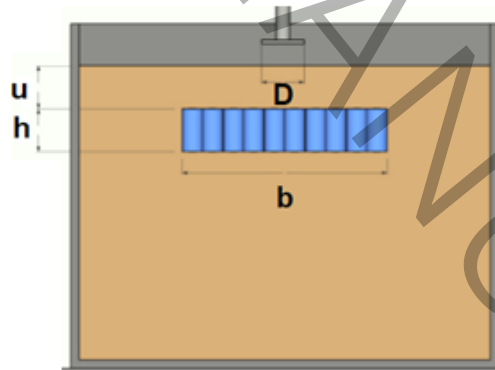
۳۳/۲۰	کیلو نیوتن بر متر	مدول یانگ بدنه بطری
۰/۷۱	کیلو نیوتن بر متر	مقاومت کششی نهایی اتصال
۷/۱۴	کیلو نیوتن بر متر	مدول یانگ اتصال
۱۳/۳۴	کیلو نیوتن بر متر مکعب	وزن مخصوص

۲-۵ - روند اجرای آزمایش

با توجه به برنامه آزمایش، ابتدا بستر خاک با چگالی ۳۵ درصد به روش بارش ایجاد می‌شود (با بارش تقریباً ۱۰۰۰ کیلوگرم خاک از ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر). سپس ژئوسل بطری‌های PET با مشخصات تعیین شده طبق برنامه آزمایش (شامل ابعاد و عمق قرارگیری ژئوسل) در موقعیت خود قرار داده شده و داخل و بیرون بطری‌ها پر می‌گردند. در مرحله بعد، سطح خاک تسطیح شده و پی مربعی که از قبل به جک بارگذاری متصل شده، به صورت دقیق در محل خود قرار داده می‌شود تا بار از جک به پی اعمال شود. بارگذاری پی با اعمال جابجایی عمودی با نرخ ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده و مقادیر بار و نشست به طور همزمان اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد.

۲-۶ - برنامه آزمایش‌ها

هدف اصلی این پژوهش بررسی پارامترهای موثر ژئوسل بطری‌های PET در بهبود ظرفیت باربری فونداسیون مستقر بر بستر ماسه ای سست است. پارامترهای تاثیرگذار ژئوسل عبارتند از عمق قرارگیری (u)، عرض (b) و ارتفاع (h) تشک ژئوسل. این پارامترها در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.



شکل ۸: تعریف پارامترهای مدل

Figure 8: Definition of model parameters

هر سه پارامتر مذکور با تقسیم بر بعد پی (D) بصورت بدون بعد بیان می‌شوند با توجه به مطالعات پیشین [۳۱, ۳۲] (یعنی u/D , h/D , b/D). لازم به ذکر است که شکل هندسی تشک‌ها در همه آزمایش‌ها مربعی می‌باشد. آزمایش‌ها در قالب سه سری صورت گرفته‌اند که در هر سری، دو پارامتر ثابت و یک پارامتر متغیر می‌باشد (جدول ۳). در هر سری، آزمایشی به عنوان شاهد بر روی خاک بدون مسلح کننده وجود دارد تا نتایج با حالت‌های تقویت‌شده مقایسه شود. این آزمایش در هر سه سری، مشابه می‌باشد.

آزمایش های سری اول: تأثیر نسبت ارتفاع تشک (h/D) بررسی شده است. در این سری، نسبت عرض تشک (b/D) برابر $4/5$ و نسبت عمق قرارگیری (u/D) صفر در نظر گرفته شد. مقادیر h/D برابر $0/25$ ، $0/5$ ، 1 و $1/5$ بودند.

آزمایش های سری دوم: تأثیر عمق قرارگیری تشک (u/D) مطالعه شده است. در این سری، نسبت عرض تشک $4/5$ و نسبت ارتفاع برابر 1 می باشد. مقدار u/D در سه حالت 0 ، $0/25$ و $0/5$ تغییر داده شد.

آزمایش های سری سوم: تأثیر عرض تشک (b/D) مورد بررسی قرار گرفته است. در این سری، نسبت ارتفاع تشک 1 و عمق آن صفر نگه داشته شد. مقادیر b/D شامل $1/1$ ، $2/2$ ، $3/4$ ، $4/5$ و $5/6$ بودند.

جدول ۳: برنامه آزمایش ها

Table 3: Testing program

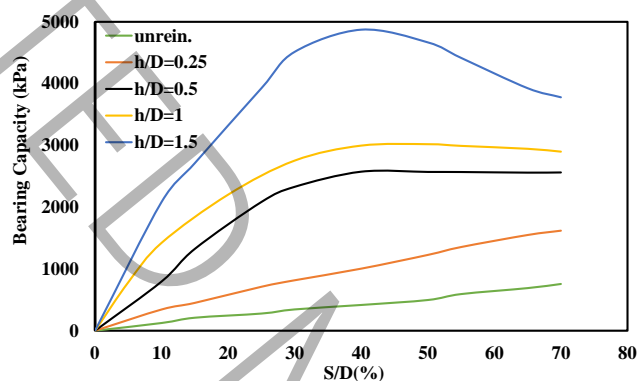
h/D	b/D	u/D	شماره آزمایش	سری آزمایشات
-	-	-	۰۰	S 1
۰/۲۵	۴/۵	۰۰	۰۱	
۰/۵۰	۴/۵	۰۰	۰۲	
۱/۰	۴/۵	۰۰	۰۳	
۱/۵	۴/۵	۰۰	۰۴	
-	-	-	۰۰	S 2
۱/۰	۴/۵	۰۰	۰۵	
۱/۰	۴/۵	۰/۲۵	۰۶	
۱/۰	۴/۵	۰/۵۰	۰۷	
-	-	-	۰۰	S 3
۱/۰	۱/۱	۰۰	۰۸	
۱/۰	۲/۲	۰۰	۰۹	
۱/۰	۳/۴	۰۰	۱۰	
۱/۰	۴/۵	۰۰	۱۱	
۱/۰	۵/۶	۰۰	۱۲	

۳ - تحلیل نتایج آزمایش‌ها

در این بخش به بررسی تاثیر استفاده از تشک ژئوسل بطری های پلاستیکی در بهسازی و تقویت باربری بستر پرداخته شده است. نتایج برای هر متغیر (ارتفاع، عمق قرارگیری و عرض تشک ژئوسل) به تفکیک و با مقایسه نمودارهای بار - نشست و سختی ابتدایی آن بررسی شده است.

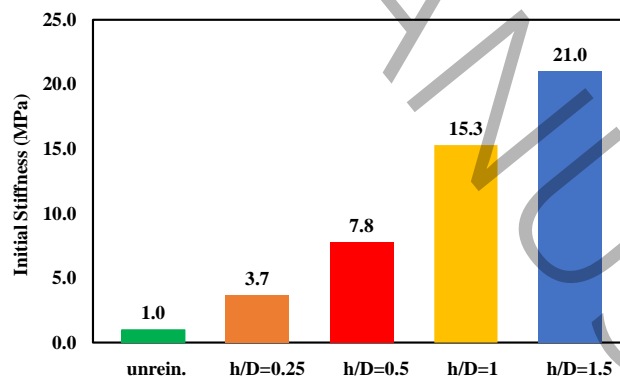
۳-۱ - اثر ارتفاع ژئوسل بطری پلاستیکی

به منظور بررسی اثر ارتفاع ژئوسل بر رفتار فونداسیون، آزمایش های سری ۱ انجام شده که در آن، دو پارامتر ثابت لحاظ شده است: عمق قرارگیری ($u/D=0$) و عرض تشک ($b/D=4/5$). نسبت ارتفاع تشک (h/D) به عنوان متغیر و برابر با $0/25$ ، $0/5$ ، 1 و $1/5$ لحاظ شده است. شکل ۹، شکل ۱۰ و شکل ۱۲ ظرفیت باربری، سختی اولیه و نسبت ظرفیت باربری را برای مقادیر مختلف ارتفاع تشک نشان می‌دهند.



شکل ۹: نمودار بار - نشست برای مقادیر مختلف ارتفاع ژئوسل بطری پلاستیکی برای $u/D=0$ و $b/D=4/5$

Figure 9: Load-settlement curves for different heights of plastic bottle geocells with $u/D=0$, $b/D=4.5$



شکل ۱۰: سختی ابتدایی نمودار ظرفیت باربری برای مقادیر مختلف ارتفاع ژئوسل بطری پلاستیکی برای $u/D=0$ و $b/D=4/5$

Figure 10: Initial stiffness of the bearing capacity curves for different heights of plastic bottle geocells with $u/D=0$, $b/D=4.5$

در آزمایش مربوط به خاک غیرمسلح، با افزایش نشست فونداسیون، ظرفیت باربری به صورت تدریجی افزایش می‌یابد. این رفتار ناشی از افزایش عمق مؤثر پی در حین بارگذاری است؛ به طوری که با پیشروی نشست، فونداسیون عملاً در تراز عمیق‌تری از توده خاک قرار می‌گیرد و در نتیجه تنش سربار مؤثر افزایش می‌یابد. در چارچوب روابط کلاسیک ظرفیت باربری، این پدیده با افزایش سهم مؤلفه (q^*N_q) قابل تبیین است که موجب افزایش مقاومت برشی بسیج‌شده در زیر پی و در نهایت افزایش ظرفیت باربری با ادامه نشست می‌شود.

استفاده از تشک ژئوسل به‌طور کلی موجب بهبود قابل توجه عملکرد سیستم پی-خاک شده و با افزایش ظرفیت باربری و سختی اولیه همراه است. در آزمایش با نسبت $h/D=0.25$ ، ظرفیت باربری در تمامی مقادیر نشست بیش از دو برابر حالت بدون تقویت بوده و سختی اولیه منحنی بار-نشست نیز به‌طور محسوسه افزایش یافته است. با این حال، شکل کلی منحنی بار-نشست در این حالت شباهت زیادی به رفتار خاک غیرمسلح دارد، که نشان می‌دهد در این ارتفاع نسبتاً کم، ژئوسل عمدتاً از طریق ایجاد محصورشدگی جانبی محدود در خاک پرکننده عمل کرده و توسعه کامل مکانیزم‌های تقویتی ژئوسل هنوز رخ نداده است.

با افزایش ارتفاع ژئوسل در آزمایش‌های با نسبت‌های $h/D=0.5$ و $h/D=1.0$ ، افزایش قابل توجهی در ظرفیت باربری و سختی اولیه سیستم مشاهده می‌شود. این بهبود عملکرد را می‌توان به توسعه همزمان مکانیزم‌های محصورشدگی جانبی خاک در داخل سلول‌ها، افزایش مقاومت در برابر گسترش جانبی توده خاک، و فعال شدن اثر غشایی در لایه ژئوسل نسبت داد [۳۲]. در این دو آزمایش، ظرفیت باربری تا نسبت نشست تقریبی $D/S=0.4$ روند افزایشی داشته و در این نقطه سیستم پی-خاک به حداکثر ظرفیت خود می‌رسد.

در آزمایش با نسبت با $h/D=1.5$ ، اگرچه روند افزایش سختی اولیه و ظرفیت باربری تا حدود $D/S=0.4$ مشابه سایر آزمایش‌ها است، اما پس از این مقدار کاهش محسوسه در ظرفیت باربری مشاهده می‌شود. این رفتار نشان‌دهنده تغییر در مکانیزم گسیختگی سیستم است؛ به‌طوری که با افزایش قابل توجه ارتفاع تشک و در نتیجه افزایش نیروهای کششی بسیج‌شده در دیواره‌ها و اتصالات ژئوسل، تنش‌های کششی در ناحیه زیر فونداسیون به حد گسیختگی رسیده و پارگی موضعی اتصالات ژئوسل رخ می‌دهد. وقوع این نوع گسیختگی سازه‌ای در لایه تقویت‌کننده منجر به افت ناگهانی ظرفیت باربری در بخش پس‌اوج منحنی بار-نشست می‌شود.

برای تبیین این رفتار، ابتدا لازم است مکانیزم‌های حاکم بر عملکرد خاک مسلح‌شده با ژئوسل بررسی شوند. شکل ۱۱ سه مکانیزم اصلی مؤثر در بهبود ظرفیت باربری خاک مسلح‌شده با ژئوسل را نشان می‌دهد که عبارت‌اند از:

اثر محصورشدگی (Confinement Effect):

ژئوسل‌ها به دلیل ساختار سه‌بعدی خود از حرکت جانبی مصالح پرکننده داخل سلول‌ها جلوگیری می‌کنند. به عبارت دیگر، دیواره‌های سلول‌ها مانع گسترش جانبی توده خاک داخل آن‌ها می‌شوند (شکل ۱۱-a). این محصورشدگی باعث افزایش مقاومت برشی توده خاک و تشکیل لایه‌ای با سختی و ظرفیت باربری بالاتر می‌شود.

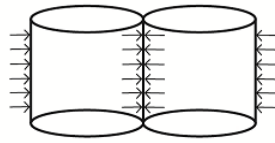
اثر توزیع بار (Load Distribution Effect):

لایه ژئوسل همانند یک تشک نسبتاً صلب عمل کرده و بار پی را در سطح وسیع‌تری توزیع می‌کند (شکل ۱۱-b). در نتیجه تنش منتقل‌شده به خاک زیر لایه ژئوسل به‌طور قابل توجهی کمتر از تنش وارد بر سطح بالایی این لایه خواهد بود.

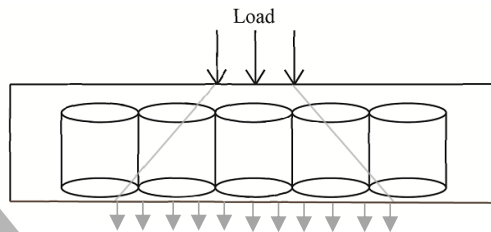
اثر غشایی (Membrane Effect):

اعمال بار موجب تغییر شکل تشک ژئوسل شده و نیروی کششی اضافی در آن ایجاد می‌کند (شکل ۱۱-c). مؤلفه قائم این نیروی کششی بخشی از تنش قائم منتقل‌شده به خاک زیر ژئوسل را کاهش می‌دهد و در نتیجه میزان تغییر شکل بستر خاک در ناحیه بارگذاری کاهش می‌یابد.

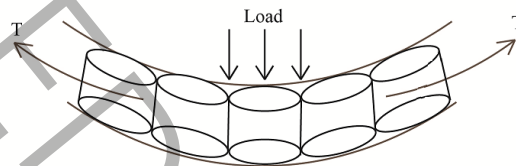
a)



b)



c)



شکل ۱۱: سه مکانیزم مختلف عملکرد ژئوسل [۳۲]

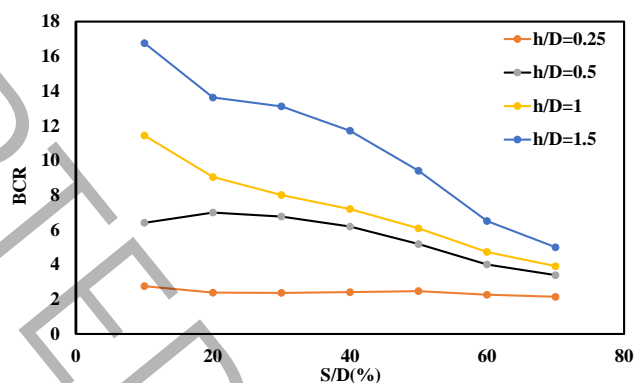
Figure 11: Three different mechanisms of geocell performance [32]

افزایش ارتفاع بطری‌ها موجب افزایش سختی کلی لایه ژئوسل شده و در نتیجه توزیع بار فونداسیون در سطح گسترده‌تری در زیر لایه تقویتی صورت می‌گیرد. با افزایش ارتفاع سلول‌ها، لایه ژئوسل رفتار صلب‌تری از خود نشان داده و بار اعمالی از سوی فونداسیون را به نواحی عمیق‌تر خاک منتقل می‌کند؛ نواحی‌ای که به دلیل تنش محصورکننده بیشتر، از سختی و ظرفیت باربری بالاتری نسبت به لایه‌های سطحی برخوردار هستند. این رفتار با مکانیزم توزیع تنش یا اثر دال گسترده قابل تبیین است که یکی از مکانیزم‌های اصلی عملکرد ژئوسل محسوب می‌شود.

علاوه بر این، افزایش ارتفاع بطری‌ها موجب افزایش حجم و وزن توده خاک محصورشده در داخل سلول‌ها شده و در نتیجه مقاومت در برابر گسترش جانبی خاک افزایش می‌یابد. این پدیده باعث افزایش محصورشدگی جانبی و قفل‌شدگی ذرات خاک در داخل سلول‌ها شده و مقاومت برشی در سطح زیرین تشک را افزایش می‌دهد. در ادامه بارگذاری، با افزایش تغییرشکل قائم، نیروهای کششی در دیواره‌های ژئوسل بسیج شده و اثر غشایی در لایه تقویتی فعال می‌شود. برهم‌کنش همزمان این سه مکانیزم شامل محصورشدگی جانبی، توزیع تنش و اثر غشایی، منجر به افزایش قابل توجه ظرفیت باربری و سختی منحنی‌های بار-نشست با افزایش ارتفاع ژئوسل می‌شود؛ موضوعی که در شکل‌های ۹ و ۱۰ نیز به خوبی مشاهده می‌شود.

در آزمایش‌های با نسبت‌های $h/D = 0.5$ و $h/D = 1.0$ ، لایه ژئوسل به ترتیب در حدود تنش‌های ۲۴۵۰ و ۳۰۰۰ کیلوپاسکال به حداکثر مقاومت کششی بسیج‌شده خود می‌رسد. در این مرحله، مکانیزم گسیختگی غالب به صورت لغزش یا بیرون‌کشیدگی لایه تقویتی بروز می‌کند. در این حالت، بدون وقوع پارگی در اتصالات ژئوسل، ظرفیت باربری به صورت تدریجی به حالت پایدار نزدیک شده و بنابراین منحنی‌های بار-نشست رفتار نرم‌تری داشته و پیک مشخصی را نشان نمی‌دهند.

در مقابل، در آزمایش با نسبت $h/D=1/5$ ، به دلیل افزایش قابل توجه ارتفاع ژئوسل و در نتیجه افزایش مقاومت بیرون کشیدگی و نیروهای کششی بسیج شده در لایه، ظرفیت باربری فونداسیون تا حدود ۴۸۰۰ کیلوپاسکال افزایش می‌یابد. در این سطح بارگذاری، تنش‌های کششی متمرکز در ناحیه زیر فونداسیون از ظرفیت اتصالات ژئوسل فراتر رفته و پارگی موضعی در برخی از اتصالات رخ می‌دهد. این نوع گسیختگی سازه‌ای در لایه تقویتی موجب افت ناگهانی ظرفیت باربری در بخش پس‌اوج منحنی بار-نشست می‌شود. بنابراین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع ژئوسل، علاوه بر افزایش کارایی مکانیزم‌های تقویتی، نوع مکانیزم گسیختگی نیز از لغزش تدریجی لایه تقویتی به گسیختگی موضعی در اتصالات ژئوسل تغییر می‌کند.



شکل ۱۲: نمودار نسبت ظرفیت باربری برای مقادیر مختلف ارتفاع ژئوسل بطری پلاستیکی برای $u/D=0$ و $b/D=4.5$

Figure 12: Bearing capacity ratio (BCR) curves for different heights of plastic bottle geocells with $u/D=0$, $b/D=4.5$

شکل ۱۲ تغییرات نسبت بهبود ظرفیت باربری (BCR) را بر حسب نشست نسبی پی (S/D) برای ارتفاع‌های مختلف تشک بطری‌های پلاستیکی (h/D) نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که افزایش ارتفاع تشک منجر به بهبود قابل توجه ظرفیت باربری سیستم پی-خاک می‌شود. به‌طور مشخص، در نشست اولیه حدود $S/D \approx 10\%$ ، مقدار BCR از حدود ۲/۵ در حالت $h/D=0.25$ به بیش از ۱۷ در حالت $h/D=1/5$ افزایش یافته است. این افزایش قابل توجه نشان‌دهنده نقش مؤثر افزایش ارتفاع لایه تقویتی در گسترش ناحیه تأثیر تنش در زیر پی است. با افزایش ضخامت تشک، حجم بزرگ‌تری از خاک در داخل سلول‌ها محصور شده و مقاومت آن در برابر گسترش جانبی افزایش می‌یابد. این پدیده موجب بهبود محصورشدگی جانبی خاک و انتقال مؤثرتر تنش‌ها به لایه‌های عمیق‌تر با تنش محصورکننده بیشتر می‌شود که در نهایت به افزایش ظرفیت باربری و کاهش تغییرشکل‌های موضعی در زیر پی منجر می‌گردد.

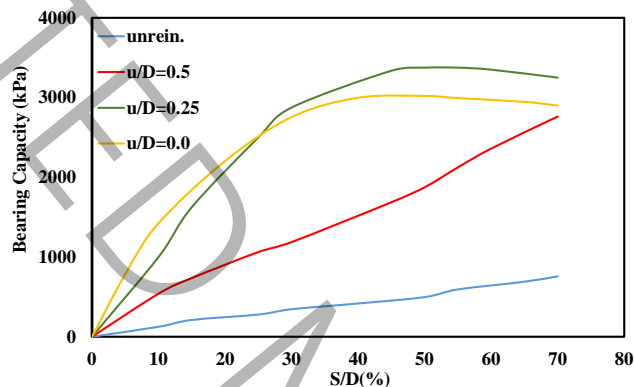
همچنین مشاهده می‌شود که برای تمامی نسبت‌های h/D ، مقدار BCR در نشست‌های کوچک بیشترین مقدار را داشته و با افزایش نشست به تدریج کاهش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که در محدوده $S/D < 40\%$ ، تأثیر افزایش ارتفاع تشک بر نسبت بهبود ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. این رفتار را می‌توان به تغییر تدریجی مکانیزم حاکم بر عملکرد سیستم نسبت داد. در نشست‌های کوچک، عملکرد لایه تقویتی عمدتاً تحت تأثیر محصورشدگی جانبی خاک و توزیع تنش قرار دارد که منجر به افزایش قابل توجه سختی اولیه سیستم می‌شود. با افزایش نشست و گسترش ناحیه تغییرشکل، نقش اثر غشایی در لایه تقویتی برجسته‌تر شده و در نهایت با توسعه مکانیزم گسیختگی در توده تقویت‌شده، میزان بهبود نسبی ظرفیت باربری کاهش می‌یابد.

بیشترین مقدار BCR در حالت $h/D=1/5$ مشاهده شده است که حدود ۱.۵ برابر بیشتر از حالت $h/D=1/10$ است. با این حال، با در نظر گرفتن ملاحظات اجرایی، مصرف مصالح و کارایی اقتصادی، افزایش ارتفاع لایه تقویتی بیش از حدود $h \approx D/5$ لزوماً منجر به افزایش متناسب در کارایی سیستم نمی‌شود. بنابراین از دیدگاه مهندسی، نسبت $h \approx D/5$ تا ۱ را می‌توان به‌عنوان محدوده‌ای مناسب برای دستیابی به بهبود قابل توجه ظرفیت باربری همراه با کارایی اجرایی مطلوب در نظر گرفت. این روند با نتایج مطالعات پیشین در

زمینه استفاده از ژئوسل ها و سامانه های محصورکننده پلاستیکی نیز همخوانی دارد، به طوری که گزارش شده است افزایش ارتفاع لایه تقویتی تا حدود ۱ تا ۱/۵ برابر عرض پی می تواند منجر به افزایش محسوس ظرفیت باربری و کاهش نشست شود [۳۳، ۳۴].

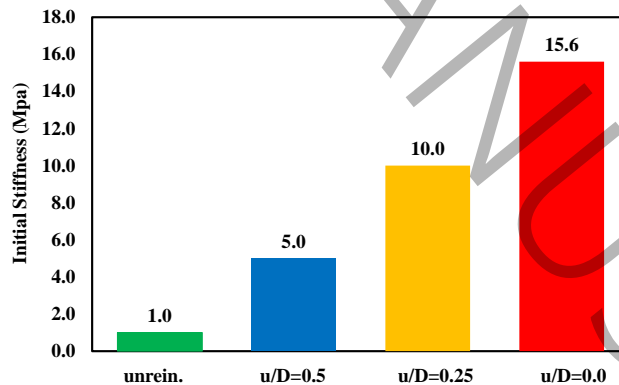
۳-۲- اثر عمق قرارگیری ژئوسل بطری پلاستیکی

به منظور بررسی اثر عمق قرارگیری ژئوسل بطری پلاستیکی بر عملکرد سیستم فونداسیون، آزمایش های سری ۲ انجام شده است. در این آزمایشات، عرض و ارتفاع تشک (h/D و b/D) ثابت و به ترتیب برابر با ۴/۵ و ۱/۰ لحاظ شده است. نسبت عمق قرارگیری (u/D) متغیر بوده و برابر با ۰، ۰/۵ و ۱/۰ لحاظ شده است. مقادیر ظرفیت باربری، سختی اولیه و نسبت ظرفیت باربری برای عمق های قرارگیری مختلف ژئوسل در شکل ۱۳، شکل ۱۴ و شکل ۱۵ ارائه شده است.



شکل ۱۳: نمودار بار - نشست برای مقادیر مختلف عمق قرارگیری ژئوسل بطری پلاستیکی برای $h/D=1$ و $b/D=4.5$

Figure 13: Load-settlement curves for different embedment depths of plastic bottle geocells with $h/D=1$, $b/D=4.5$



شکل ۱۴: سختی ابتدایی نمودار ظرفیت باربری برای مقادیر مختلف عمق قرارگیری ژئوسل بطری پلاستیکی برای $h/D=1$ و $b/D=4.5$

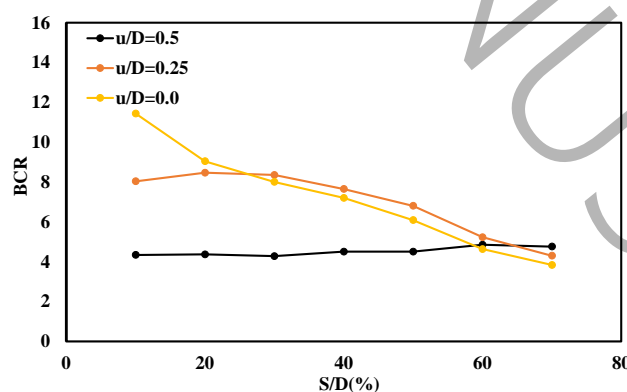
Figure 14: Initial stiffness of the bearing capacity curves for different embedment depths of plastic bottle geocells with $h/D=1$, $b/D=4.5$

همانطور که مشاهده می شود، سختی اولیه منحنی ها با کاهش عمق قرارگیری (با نزدیک شدن ژئوسل به فونداسیون) افزایش می یابد. هنگامی که فونداسیون مستقیماً روی ژئوسل قرار می گیرد ($u/D=0$)، انتقال بار بین فونداسیون و لایه ژئوسل کارآمدتر بوده و فشار فونداسیون مستقیماً به لایه تقویت کننده منتقل می شود. با توجه به اثر محصورسازی سلول ها و سختی نسبتاً بالای تشک ژئوسل، این لایه تغییر شکل کمی را تجربه می کند. انتقال بار فونداسیون به تراز زیر ژئوسل با سطح تنش بالاتر نسبت به لایه های سطحی، و همچنین توزیع بار در یک ناحیه بزرگتر، منجر به کاهش نشست خاک و در نتیجه، سختی بیشتر بستر می شود [32]. با افزایش فاصله بین

فونداسیون و لایه ژئوسل (افزایش u/D) در آزمایشات با u/D برابر با $0/25$ و $0/5$ توده خاک بین فونداسیون و تراز روی ژئوسل تحت اثر تنش فونداسیون دچار تغییر شکل می‌شود، که این موضوع منجر به کاهش سختی بستر در مقایسه با آزمایش با $u/D=0$ می‌شود.

مقایسه نتایج بار-نشست آزمایشات نشان می‌دهد که رفتار فونداسیون‌ها در نشست‌های کم تا متوسط (S/D کمتر از $0/3$) با رفتار در نشست‌های زیاد (S/D بیشتر از $0/3$) متفاوت است. در نشست‌های کم تا متوسط، همانطور که قبلاً در مقایسه مقادیر سختی اولیه ذکر شد، هرچه فاصله بین فونداسیون و لایه تشک کمتر باشد، انتقال بار از فونداسیون به تشک بهتر بوده و در نتیجه ظرفیت باربری بیشتر می‌شود. در آزمایش با $u/D=0/25$ ، لایه نازک خاک ($2/5$ سانتی‌متر) بین فونداسیون و ژئوسل، تغییر شکل ناچیزی را متحمل می‌شود و رفتاری مشابه $u/D=0$ را نشان می‌دهد. در آزمایش با $u/D=0/5$ ، فاصله قابل توجهی بین فونداسیون و ژئوسل وجود دارد، که منجر به تغییر شکل قابل توجه این لایه در انتقال بار از فونداسیون به تشک می‌شود، که به طور قابل توجهی بر رفتار بار-نشست تأثیر می‌گذارد. با این حال، فاصله ژئوسل از فونداسیون به گونه‌ای است که در منطقه گوه گسیختگی فونداسیون قرار دارد. لایه ژئوسل با سختی بالا به طور موثر از بسیج کامل گوه گسیختگی جلوگیری می‌کند و در نتیجه ظرفیت باربری و سختی را در مقایسه با شرایط بدون تقویت افزایش می‌دهد.

در مقادیر نشست بالاتر (S/D بیشتر از $0/3$)، رفتار بار-نشست فونداسیون‌ها با ابتدای آزمایشات متفاوت است. برخلاف انتظار، ظرفیت باربری در آزمایش $u/D=0/25$ بیشتر از آزمایش $u/D=0$ است. در آزمایش $u/D=0$ ، ظرفیت باربری در نسبت نشست $0/4$ به 2950 کیلوپاسکال می‌رسد، که در این نقطه لغزش تشک رخ می‌دهد. با این حال، در آزمایش با $u/D=0/25$ ، ظرفیت باربری تا 3430 کیلوپاسکال در نسبت نشست حدود $0/5$ ادامه می‌یابد و پس از آن کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده خرابی اتصالات ژئوسل در زیر فونداسیون است (این موضوع با بررسی لایه ژئوسل بعد از آزمایش تأیید شده است). رفتارهای متفاوتی که در این آزمایشات مشاهده شد، به عملکرد مکانیزم غشایی تشک نسبت داده می‌شود. در آزمایش $u/D=0/25$ ، به دلیل عمق قرارگیری لایه ژئوسل و تنش‌های بالاتر در سطوح بالایی و پایینی آن، مقاومت کششی لایه ژئوسل بیشتر است و به آن اجازه می‌دهد تا بار بیشتری را تحمل کند که این امر منجر به خرابی اتصال قبل از لغزش با ادامه بارگذاری می‌شود. در آزمایش $u/D=0/5$ ، عمق قرارگیری ژئوسل نیز منجر به مقاومت کششی بالاتری نسبت به سایر آزمایشات می‌شود و در نتیجه از مکانیزم لغزش جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، در طول بارگذاری و افزایش نشست فونداسیون، فاصله بین فونداسیون و لایه ژئوسل (u/D) کاهش می‌یابد و در نتیجه تأثیر لایه تقویت‌کننده ژئوسل را افزایش می‌دهد، که به افزایش سختی بستر کمک می‌کند (افزایش شیب منحنی بار-نشست در نشست زیاد).



شکل ۱۵: نمودار نسبت ظرفیت باربری برای مقادیر مختلف عمق قرارگیری ژئوسل بطری پلاستیکی برای $h/D=1$ و $b/D=4.5$
 Figure 15: Bearing capacity ratio (BCR) curves for different embedment depths of plastic bottle geocells with $h/D=1$, $b/D=4.5$

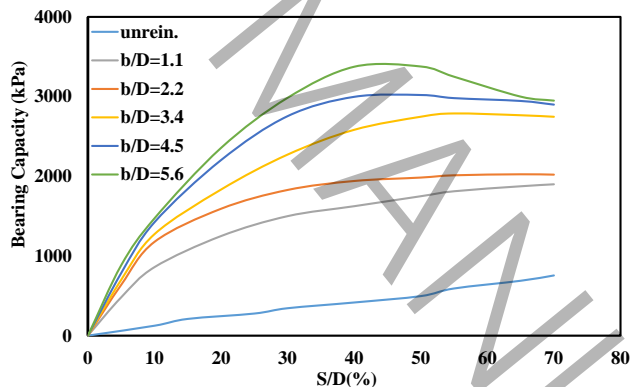
شکل ۱۵، تغییرات نسبت بهبود ظرفیت باربری (BCR) را بر حسب نشست نسبی پی (S/D) برای سه عمق مختلف قرارگیری تشک بطری‌های پلاستیکی (u/D) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش عمق استقرار تشک، عملکرد مسلح‌کننده کاهش یافته است؛

به طوری که در حالت $u/D = 0$ (قرارگیری مستقیم زیر پی) بیشترین تأثیر بر ظرفیت باربری مشاهده می‌شود. در این حالت مقدار BCR در نشست‌های اولیه حدود ۱۲ است، در حالی که با افزایش عمق به $u/D = 0.25$ و سپس $u/D = 0.5$ ، مقدار آن به ترتیب به حدود ۸ و $4/5$ کاهش یافته است. این رفتار بیانگر آن است که هرچه فاصله بین پی و لایه مسلح‌کننده افزایش یابد، ناحیه تنش مؤثر و تعامل بین پی و سیستم محصورکننده کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه کارایی سیستم به طور محسوسی افت می‌کند.

همچنین روند نمودار نشان می‌دهد که در همه حالت‌ها، مقدار BCR در نشست‌های کم ($S/D < 30\%$) بیشینه بوده و با افزایش نشست کاهش یافته است. این پدیده به دلیل انتقال تدریجی ناحیه گسیختگی به زیر لایه مسلح‌کننده و از بین رفتن اثر محصورشدگی بطری‌ها در نشست‌های بزرگ‌تر است. مقایسه منحنی‌ها نشان می‌دهد که بهینه‌ترین حالت عمق استقرار، تشک در محدوده‌ی سطحی ($u/D \approx 0.1 - 0.25$) قرار دارد، که این نتیجه با یافته‌های پژوهش‌های مشابه از جمله تفرشی و داوسون (۲۰۱۰) و کش و همکاران (۲۰۰۱) همخوانی دارد [۳۳، ۳۴]. این محققان نیز گزارش کرده‌اند که قرارگیری لایه‌ی مسلح‌کننده در نزدیکی سطح تماس پی باعث بیشترین بازده در انتقال بار و افزایش ظرفیت باربری خاک می‌شود.

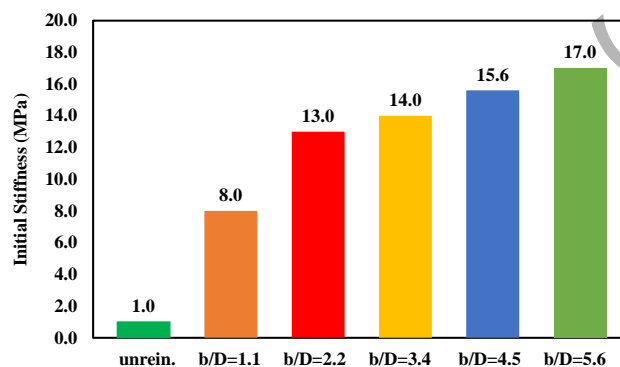
۳ - ۳ - اثر عرض ژئوسل بطری پلاستیکی

آزمایش‌های سری ۳ به منظور بررسی اثر عرض لایه ژئوسل بر رفتار بستر تقویت شده انجام شده است. در این آزمایشات، نسبت ارتفاع (h/D) و عمق قرارگیری (u/D) ثابت و به ترتیب برابر $1/0$ و 0 لحاظ شده است. نسبت عرض تشک ژئوسل بین $1/1$ تا $5/6$ متغیر می‌باشد. منحنی‌های بار-نشست، مقادیر سختی اولیه و نسبت ظرفیت باربری برای این سری آزمایشات در شکل ۱۶، شکل ۱۷ و شکل ۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۱۶: نمودار بار - نشست برای مقادیر مختلف عرض ژئوسل بطری پلاستیکی برای $h/D=1$ و $u/D=0$

Figure 16: Load-settlement curves for different widths of plastic bottle geocells with $h/D=1$, $u/D=0$



شکل ۱۷: سختی ابتدایی نمودار ظرفیت باربری برای مقادیر مختلف عرض ژئوسل بطری پلاستیکی برای $h/D=1$ و $u/D=0$

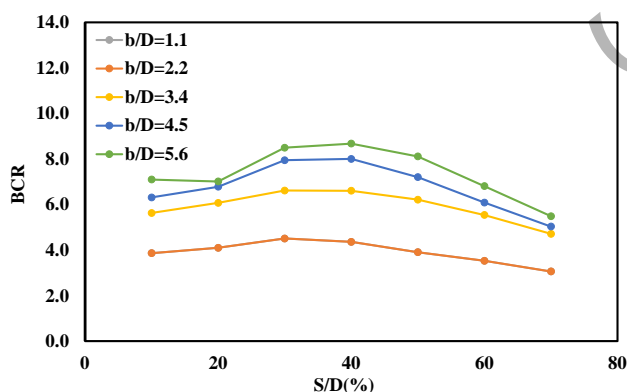
Figure 17: Initial stiffness of the bearing capacity curves for different widths of plastic bottle geocells with $h/D=1$, $u/D=0$

در آزمایش با $b/D=1/1$ ، از آنجا که عرض تشک ژئوسل تقریباً برابر با عرض فونداسیون است، مکانیزم توزیع بار و کاهش تنش توسط لایه تشک به طور کامل رخ نمی‌دهد. علاوه بر این، به دلیل عرض محدود تشک و عدم گیرداری در خاک اطراف محیط فونداسیون، مکانیزم غشایی نمی‌تواند فعال شود. با این حال، محصورسازی توده خاک در داخل سلول‌ها و ایجاد یک لایه سخت که بار را از تراز زیر فونداسیون به تراز زیر لایه ژئوسل، که سختی و تنش‌های محصورسازی بالاتری دارد، منتقل می‌کند، منجر به افزایش ظرفیت باربری فونداسیون می‌شود. این شرایط معادل حالتی است که فونداسیون در سطح زیر لایه ژئوسل قرار دارد و دارای همان عمق مدفون به اندازه ارتفاع تشک ژئوسل است.

نتایج نشان می‌دهد که رفتار بار-نشست ماسه سست بدون تسلیح که با پاسخ نسبتاً نرم و تغییرشکل‌های تدریجی مشخص می‌شود، در حضور ژئوسل PET به یک پاسخ سخت‌تر همراه با رفتار سخت‌شوندگی کرنشی و کاهش محسوس نشست نهایی تبدیل می‌گردد. این تغییر در الگوی پاسخ مکانیکی، با روندهای کیفی گزارش شده برای پی‌های تقویت‌شده با ژئوسل در مطالعات اخیر همخوانی دارد.

در آزمایش با $b/D=2/2$ ، مکانیزم توزیع بار و مکانیزم عملکرد غشایی تا حدودی به دلیل ابعاد نسبتاً بزرگتر تشک در مقایسه با فونداسیون فعال می‌شوند و منجر به افزایش ظرفیت باربری فونداسیون می‌شوند. در این آزمایش، لایه تشک به حداکثر ظرفیت کششی خود در نسبت نشست حدود $0/3$ (و بار حدود ۱۹۶۰ کیلوپاسکال) می‌رسد، که در این نقطه، لایه ژئوسل لغزش را تجربه می‌کند. با افزایش ابعاد تشک، عملکرد غشایی افزایش می‌یابد و ظرفیت بیرون کشیدگی لایه ژئوسل افزایش می‌یابد و به مقادیر ۲۶۵۰ کیلوپاسکال و ۲۸۵۰ کیلوپاسکال در آزمایشات با b/D برابر با $3/4$ و $4/5$ می‌رسد. در آزمایش با $b/D=5/6$ ، به دلیل ابعاد قابل توجه لایه ژئوسل و مقاومت بیرون کشیدگی قابل توجه آن، ظرفیت باربری تا ۳۲۴۰ کیلوپاسکال افزایش می‌یابد، و پس از آن افت قابل توجهی را تجربه می‌کند. همانطور که قبلاً ذکر شد، این افت مقاومت نشان‌دهنده پارگی ساختار لایه ژئوسل و اتصالات آن است که قبل از لغزش لایه رخ می‌دهد.

بررسی مقادیر سختی اولیه در منحنی‌ها نشان می‌دهد که در آزمایش با $b/D=1/1$ ، سختی نسبت به شرایط بدون تقویت افزایش یافته است، که به دلیل عملکرد نسبتاً صلب لایه ژئوسل و انتقال بار به سطح زیرین خاک با تنش محصورسازی و سختی بالاتر است. آزمایشات با نسبت‌های b/D بالاتر، مقادیر سختی اولیه منحنی‌ها تقریباً یکسان است. شرایط تأثیرگذار مشابه برای این رفتار شامل مشخصات بطری‌ها (قطر، ارتفاع و جنس)، عمق قرارگیری لایه ژئوسل، تراکم خاک داخل و خارج از بطری‌ها و لایه بستر، حداقل ابعاد تشک برای توزیع کامل بار فونداسیون و حداقل گیرداری لایه تشک در خاک اطراف فونداسیون است، که منجر به رفتارهای مشابه در این آزمایشات در ابتدای آزمایش‌ها و قبل از شروع لغزش لایه ژئوسل می‌شود. به عبارت دیگر، این شرایط یکنواخت در آزمایشات منجر به عملکرد همزمان هر سه مکانیزم می‌شود: محصورسازی، توزیع بار و عملکرد غشایی در ابتدای آزمایش. با ادامه بارگذاری فونداسیون، بسته به ابعاد لایه و گیرداری آن در خاک اطراف، پدیده لغزش در سطوح بارگذاری مختلف شروع می‌شود و منجر به کاهش شیب منحنی‌های بار-نشست می‌شود.



شکل ۱۸: نمودار نسبت ظرفیت باربری برای مقادیر مختلف عرض ژئوسل بطری پلاستیکی برای $h/D=1$ و $u/D=0$.

Figure 18: Bearing capacity ratio (BCR) curves for different widths of plastic bottle geocells with $h/D=1$, $u/D=0$

شکل ۱۵، تغییرات نسبت بهبود ظرفیت باربری (BCR) را بر حسب نشست نسبی پی (S/D) برای عرض‌های مختلف تشک بطری‌های پلاستیکی (b/D) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش عرض ناحیه مسلح‌شده (b/D)، ظرفیت باربری بستر به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. برای مثال، در نسبت نشست حدود $S/D = 40\%$ مقدار BCR از حدود ۴ برای $b/D = 2/2$ به بیش از $8/5 = b/D$ افزایش یافته است. این موضوع بیانگر آن است که افزایش عرض تشک، به دلیل گسترش ناحیه محصورشدگی و بهبود توزیع تنش در زیر پی، موجب افزایش بازدهی سیستم مسلح‌کننده می‌شود.

همچنین مشاهده می‌شود که در تمام عرض‌ها، مقدار BCR ابتدا با افزایش نشست نسبی تا حدود $S/D = 30\% - 40\%$ افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر نشست کاهش یافته است. این رفتار به دلیل انتقال تدریجی گسیختگی از ناحیه زیر پی به نواحی جانبی تشک و کاهش اثر محصورشدگی در نشست‌های زیاد است. در حالت بهینه، یعنی $b/D = 5/6$ ، مقدار بیشینه BCR حدود $8/7$ به دست آمده که تقریباً دو برابر حالت $b/D = 3/4$ و بیش از دو برابر $b/D = 2/2$ است. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عرض تشک تا حدود $5/5$ برابر عرض پی، بهبود قابل توجهی در ظرفیت باربری حاصل شده و پس از آن تأثیر افزایش عرض بر عملکرد سیستم کاهش می‌یابد که این روند با یافته‌های مشابه در مطالعات تفرشی و همکاران (۲۰۱۰) و پوخارل و همکاران (۲۰۱۸) نیز مطابقت دارد [۳۵، ۳۴]. کاهش نشست مشاهده‌شده و افزایش ظرفیت باربری با روند کلی گزارش‌شده در مطالعات موردی اخیر درباره بهسازی خاک برای زیرساخت‌های مهم احداث‌شده بر روی خاک‌های ضعیف یا فروریزی همخوانی دارد [۳۶، ۳۷].

۴ - نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر استفاده از ژئوسل ساخته‌شده از بطری‌های پلاستیکی بازیافتی (PET) بر بهسازی ظرفیت باربری پی‌های سطحی با استفاده از آزمایش‌های مدل فیزیکی بررسی شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که حضور لایه ژئوسل بطری‌های پلاستیکی موجب افزایش قابل توجه سختی اولیه بستر و ظرفیت باربری نهایی پی می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده، عملکرد سیستم تقویت‌شده به‌طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر پارامترهای هندسی ژئوسل شامل ارتفاع، عمق قرارگیری و عرض لایه تقویتی قرار دارد.

نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع ژئوسل، ظرفیت باربری نسبی پی (BCR) به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد. به طوری که در نشست نسبی حدود $S/D \approx 10\%$ مقدار BCR از حدود ۲٫۵ در نسبت $h/D = 0/25$ به بیش از ۱۷ در نسبت $h/D = 1/5$ افزایش یافته است که بیانگر افزایشی در حدود ۶٫۸ برابر می‌باشد. با این حال، در ارتفاع‌های بزرگ‌تر تمرکز تنش در ناحیه زیر پی افزایش یافته و در نسبت $h/D = 1/5$ افت ناگهانی در منحنی بار-نشست مشاهده شد که ناشی از پارگی اتصالات ژئوسل است. با توجه به عملکرد فنی و ملاحظات اجرایی، ارتفاع حدود $h \approx D/5$ می‌تواند به عنوان مقدار مناسب برای این سیستم تقویتی در نظر گرفته شود.

بررسی تأثیر عمق قرارگیری ژئوسل نیز نشان داد که قرارگیری لایه تقویتی در عمق‌های کمتر عملکرد بهتری در افزایش ظرفیت باربری دارد. در نشست‌های اولیه، مقدار BCR برای حالت $u/D = 0$ حدود ۱۲ به دست آمد، در حالی که این مقدار برای $u/D = 0/5$ حدود ۴٫۵ بوده است؛ بنابراین قرارگیری ژئوسل در تراز سطحی بستر می‌تواند بیش از ۲٫۵ برابر افزایش در ظرفیت باربری نسبت به حالت‌های عمیق‌تر ایجاد کند. با افزایش فاصله لایه ژئوسل از پی، سهم آن در تقویت ناحیه گوه گسیختگی کاهش یافته و در نتیجه سختی مؤثر بستر کاهش می‌یابد، هرچند حضور ژئوسل همچنان باعث بهبود عملکرد نسبت به حالت بدون تقویت می‌شود.

همچنین عرض لایه ژئوسل تأثیر قابل توجهی بر رفتار باربری پی دارد. نتایج نشان داد که با افزایش عرض ژئوسل، مکانیزم توزیع تنش و اثر غشایی تقویت‌کننده بهتر فعال شده و ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. به طوری که در نشست نسبی حدود $S/D \approx 40\%$ مقدار BCR از حدود ۴ برای نسبت $b/D = 2/2$ به حدود $8/7$ برای $b/D = 5/6$ افزایش یافته است که نشان‌دهنده بیش از دو برابر افزایش در ظرفیت

باربری می‌باشد. با این حال، در عرض‌های بزرگ‌تر مشاهده شد که ظرفیت بیرون‌کشیدگی لایه ژئوسل از ظرفیت سازه‌ای آن بیشتر شده و در نتیجه گسیختگی به صورت پارگی در اتصالات ژئوسل در زیر پی رخ می‌دهد.

به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از بطری‌های پلاستیکی بازیافتی در قالب ژئوسل می‌تواند موجب افزایش چشمگیر ظرفیت باربری پی‌ها (در برخی حالت‌ها تا بیش از ۶ برابر) و بهبود سختی اولیه بستر شود. علاوه بر مزایای ژئوتکنیکی، این روش می‌تواند به عنوان رویکردی پایدار برای مدیریت و بازیافت پسماندهای پلاستیکی مورد استفاده قرار گیرد و در عین حال راهکاری اقتصادی و کارآمد برای بهسازی بستر فونداسیون‌ها در پروژه‌های عمرانی ارائه دهد.

فهرست علائم

b	عرض مسلح کننده
D	عرض پی
h	ارتفاع مسلح کننده
u	عمق مدفون مسلح کننده
PET	Poly Ethelene terephthalate

مراجع

1. Lee, A., S.S.B.M. Sahari, and M.S. Liew, Feasibility study of a co-culture system for PET-degrading bacteria to increase biodegradation performance. *Bioremediation Journal*, 2021. 25(3): p. 197–203.
2. Geyer, R., J.R. Jambeck, and K.L. Law, Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 2017. 3(7): p. e1700782.
3. Andrady, A.L. and M.A. Neal, Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009. 364(1526): p. 1977–1984.
4. Al-Salem, S.M., P. Lettieri, and J. Baeyens, Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 2009. 29(10): p. 2625–2643.
5. Hopewell, J., R. Dvorak, and E. Kosior, Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009. 364(1526): p. 2115–2126.
6. MacArthur, E., *The new plastics economy: Rethinking the future of plastics & catalysing action*. 2017, Ellen MacArthur Foundation: Cowes, UK.
7. Ragaert, K., L. Delva, and K. Van Geem, Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 2017. 69: p. 24–58.
8. Narinder Singh, D.H., Rupinder Singh, I.P.S. Ahuja, Luciano Feo, Fernando Fraternali, Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. *Composites Part B: Engineering*, 2017. 115: p. 409–422.
9. Andrady, A.L., Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 2011. 62(8): p. 1596–1605.
10. Zhi Ge, R.S., Kun Zhang, Zhili Gao, Pengcheng Li, Physical and mechanical properties of mortar using waste Polyethylene Terephthalate bottles. *Construction and Building Materials*, 2013. 44.
11. Siddique R, K.J., Kaur I., Use of recycled plastic in concrete: a review. *Waste Management*, 2008. 28(10): p. 1835–1852.
12. Minde, P., et al., Comprehensive review on the use of plastic waste in sustainable concrete construction. *Discover Materials*, 2024. 4(1): p. 58.
13. Ameli, A., et al., Performance evaluation of binders and Stone Matrix Asphalt (SMA) mixtures modified by Ground Tire Rubber (GTR), waste Polyethylene Terephthalate (PET) and Anti Stripping Agents (ASAs). *Construction and Building Materials*, 2020. 251: p. 118932.
14. Ahmadiania, E., et al., Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt. *Construction and Building Materials*, 2012. 36: p. 984–989.

15. Babu, G.L.S. and S.K. Chouksey, Stress–strain response of plastic waste mixed soil. *Waste Management*, 2011. 31(3): p. 481–488.
16. Basha, E.A., et al., Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Construction and Building Materials*, 2005. 19(6): p. 448–453.
17. Akinwumi, I., A. Domo-Spiff, and A. Salami, Marine plastic pollution and affordable housing challenge: Shredded waste plastic stabilized soil for producing compressed earth bricks. *Case Studies in Construction Materials*, 2019. 11: p. e00241.
18. Farah, R.E. and Z. Nalbantoglu, Performance of plastic waste for soil improvement. *SN Applied Sciences*, 2019. 1(11): p. 1340.
19. Castilho, T.W., R.A. Rodrigues, and P.C. Lodi, Use of Recycled Polyethylene Terephthalate Strips in Soil Improvement. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2021. 39(8): p. 5943–5955.
20. Haque, M.S. and S. Islam, Effectiveness of waste plastic bottles as construction material in Rohingya displacement camps. *Cleaner Engineering and Technology*, 2021. 3: p. 100110.
21. Mansour, A.M.H. and S.A. Ali, Reusing waste plastic bottles as an alternative sustainable building material. *Energy for Sustainable Development*, 2015. 24: p. 79–85.
22. Sobhee-Beetul, L. and D. Kalumba, Use of recycled waste plastic bottles in a ground engineering technology. *Scientific African*, 2023. 21: p. e01845.
23. Jha, J.N., et al., Behavior of plastic waste fiber-reinforced industrial wastes in pavement applications. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2014. 8(3): p. 277–286.
24. Consoli, N., et al., Engineering Behavior of a Sand Reinforced with Plastic Waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - J GEOTECH GEOENVIRON ENG*, 2002. 128.
25. Peddaiah, S., A. Burman, and S. Sekharan, Experimental Study on Effect of Waste Plastic Bottle Strips in Soil Improvement. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2018. 36.
26. Dutta, S. and J.N. Mandal, Model Studies on Geocell-Reinforced Fly Ash Bed Overlying Soft Clay. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016. 28(2): p. 04015091.
27. Al-Haddad, S.A., Al-Ani, F. H., & Fattah, M. Y., Effect of Using Plastic Waste Bottles on Soil Response above Buried Pipes under Static Loads. *Applied Sciences*, 2021. 12(23): p. 12304.
28. Rahimi, M., et al., Experimental Investigation of the Behavior of Soil Reinforced with Used PET Bottles. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2023. 41.
29. Moghaddas Tafreshi, S.N., et al., Bearing capacity improvement using soil-filled post-consumer PET bottles. *Geosynthetics International*, 2022. 29(3): p. 205–216.
30. Shah, S., T.H. Bhoraniya, and B. Patel, Potential Applications of Waste Plastic Bottles Cells for the Improvement of the CBR of Soft Soils of Coastal Regions of Gujarat. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2022. 8.
31. Dandin, S., et al., Utilizing PET bottles for sustainable cellular reinforcement: A study on enhancing fly ash backfill bearing strength with innovative geocell alternative. *Construction and Building Materials*, 2024. 433: p. 136641.
32. Zhao, M.-h., D.-p. Liu, and L. Zhang, Calculation for pile-soil stress ratio of two-direction reinforced composite foundation. *Engineering Mechanics*, 2009. 26(2): p. 176–181.
33. Tafreshi, S.N.M. and A.R. Dawson, Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement. *Geotextiles and Geomembranes*, 2010. 28(1): p. 72–84.
34. Dash, S.K., N.R. Krishnaswamy, and K. Rajagopal, Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 2001. 19(4): p. 235–256.
35. Chen, Y., et al., Required unfactored geosynthetic strength of three-dimensional reinforced soil structures comprised of cohesive backfills. *Geotextiles and Geomembranes*, 2018. 46(6): p. 860–868.
36. Ebadi-Jamkhaneh, M., et al., Experimental Study on the Pullout Behavior of Helical Piles in Geogrid-Reinforced Dense Shahriyar Sand. *Buildings*, 2025. 15(16): p. 2963.
37. Asgari, A., et al., Assessment of Experimental Data and Analytical Method of Helical Pile Capacity Under Tension and Compressive Loading in Dense Sand. *Buildings*, 2025. 15(15): p. 2683.

ACCEPTED MANUSCRIPT

ACCEPTED MANUSCRIPT