

بررسی آزمایشگاهی اثر ژئوسل بر رفتار بار- نشست ماسه لایروبی بندر شهید رجایی

سید طاها طباطبایی عقدا، علی قنبری*، غلامحسین توکلی مهرجردی
دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران

پذیرش ۹۷/۰۴/۱۷

تاریخ دریافت ۹۶/۰۵/۰۴

چکیده

در شهرهای بندری، برداشت و انباشت رسوبات حاصل از عملیات لایروبی به‌عنوان چالشی جدی به‌دلیل ایجاد مشکلات زیست‌محیطی و اقتصادی مطرح است. حجم زیاد این رسوبات ضرورت استفاده دوباره از این مصالح را روشن می‌سازد. اغلب به‌دلیل مشخصات مکانیکی ضعیف، این مصالح به‌صورت مستقیم برای استفاده در پروژه‌های عمرانی مناسب نیستند و بهبود خواص مکانیکی آن‌ها ضروری است. یکی از روش‌های به‌سازی خاک، استفاده از ژئوستنتیک‌ها است. در این بین، ژئوسل به‌واسطه ساختار سه‌بعدی آن و خاصیت محصورکنندگی خاک درون سلول‌ها، موجب بهبود چشم‌گیری در ویژگی‌های مکانیکی خاک می‌شود. این موضوع در کنار سرعت و سهولت اجرا، ژئوسل را به گزینه‌ای مطلوب برای تسلیح خاک‌های دانه‌ای تبدیل کرده است. به‌واسطه عملیات لایروبی سواحل شمالی خلیج فارس برای ساخت فازهای دوم و سوم توسعه بندر شهید رجایی، حجم زیادی از ماسه کربناته در مجاورت حوضچه آرامش این بندر در حال انباشت است. برای ارائه راهکار برای استفاده مجدد از این مصالح، در این پژوهش تأثیر مسلح‌سازی ماسه با ژئوسل بر رفتار بار-نشست آن، از طریق آزمون بارگذاری صفحه بررسی می‌شود. برای این منظور، از یک مدل فیزیکی شامل صفحه بارگذاری دایره‌ای شکل واقع بر مدل خاکی، تحت بارگذاری تکراری استفاده شده است. مدل‌های خاکی استفاده شده، از ماسه کربناتی مسلح با ژئوسل و غیرمسلح با دو نوع روبه از جنس شن خوب دانه‌بندی شده و ماسه لایروبی شده، تشکیل شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از ژئوسل به‌عنوان مسلح‌کننده و هم‌چنین

شن خوب دانه‌بندی شده به‌عنوان رویه در لایه سطحی مدل خاکی، می‌تواند موجب بهبود چشم‌گیر در رفتار بار-نشست ماسه لایروبی شود.

واژه‌های کلیدی: ژئوسل، آزمون بارگذاری صفحه، ماسه لایروبی کرناته، رفتار بار-نشست.

مقدمه

امروزه مدیریت رسوبات حاصل از عملیات لایروبی^۱، به معضلی زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی حاصل از انباشت یا رهاسازی این مصالح در بنادر تبدیل شده‌است. به‌طوری‌که هر سال در بندرهای سراسر دنیا حدود ۱۵ تا ۲۰ بیلیون تن خاک لایروبی تولید می‌شود [۱]. لایروبی عبارت است از استخراج یا جابه‌جایی خاک از بستر دریا که با انواع شناورهای لایروبی و عمدتاً به دو صورت انجام می‌گیرد؛ نوع اول لایروبی احداثی است که برای ایجاد عمق آب‌خور مناسب در هنگام ساخت بندرها و مسیرهای دریایی انجام می‌شود و نوع دوم لایروبی نگه‌داری است که به‌صورت دوره‌ای برای برداشت رسوبات ته‌نشین‌شده حین عملیات بهره‌برداری انجام می‌شود.

با توجه به این‌که مواد حاصل از عملیات لایروبی عمدتاً جزو خاک‌های مسئله‌دار و سست^۲ به‌شمار می‌روند، استفاده مهندسی از این مصالح، مستلزم بهبود ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها است. برای به‌سازی خاک‌های مسئله‌دار بسته به موارد متعدد از جمله نوع خاک، شرایط اجرایی و کاربردها، روش‌های مختلفی مطرح است که رایج‌ترین آن‌ها تثبیت^۳ و تسلیح^۴ هستند. عملیات تثبیت شامل اختلاط خاک با مقداری بهینه از مصالح تثبیت‌کننده نظیر سیمان، آهک، امولسیون، پوزولان‌ها و غیره است که به‌وسیله پژوهش‌گران زیادی در خصوص به‌سازی خاک‌های لایروبی استفاده شده است [۲]، [۳]، [۴]، [۵]. عملیات تسلیح نیز شامل روش‌های مختلفی است که یکی از آن‌ها استفاده از محصولات ژئوسنتتیک‌ها^۵ است و

-
1. Dredging
 2. Soft soil
 3. Improvement
 4. Reinforcement
 5. Geosynthetic

می‌تواند رفتار خاک موردنظر و ویژگی‌های مکانیکی آن را برای مقابله با بارهای سنگین بهبود بخشد [۶]، [۷]، [۸]. یکی از انواع ژئوسنتتیک‌ها ژئوسل^۱ است که به‌واسطه ساختار سه‌بعدی^۲ و تأمین محصورشدگی [۹] برای خاک داخل سلول‌ها، می‌تواند عملکرد مطلوبی از لحاظ افزایش ظرفیت باربری و سختی و در نتیجه کاهش نشست توده خاک، در مقایسه با مسلح‌کننده‌های صفحه‌ای^۳ (مانند ژئوتکستایل^۴ و ژئوگرید^۵) از خود نشان دهد. عملکرد مطلوب ژئوسل به‌عنوان عنصر تسلیح خاک، وابسته به موارد متعددی از جمله مشخصات هندسی ژئوسل [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، سختی و مقاومت کششی دیواره‌های ژئوسل [۱۳] و نیز جنس و تراکم مصالح پرکننده سلول‌ها [۱۴] در کنار ویژگی‌های بستر زیرین و لایه فوقانی خاک مسلح [۱۵] است.

پوخارل^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۰ با انجام پژوهش‌های آزمایشگاهی، تأثیر پنج عامل کلیدی (شکل، نوع و عمق قرارگیری ژئوسل، ضخامت ناحیه مسلح‌شده و کیفیت مصالح درون ژئوسل) را در رفتار بسترهای مسلح‌شده با ژئوسل تک‌سلولی تحت بارهای استاتیکی و مقایسه آن با ماسه مسلح‌شده با ژئوسل چند سلولی، بررسی کردند. بخشی از نتایج تحقیقات آن‌ها حاکی از آن است که بستر مسلح‌شده با ژئوسل دارای مدول الاستیک بیش‌تر، سختی و ظرفیت باربری بیش‌تری دارد [۹]. مقدس‌تفرشی و داوسون^۷ در سال ۲۰۱۰ با هدف مقایسه استفاده از ژئوتکستایل سه‌بعدی و ژئوتکستایل صفحه‌ای، آزمون‌هایی از طریق اعمال بار تناوبی بر یک مدل شالوده نواری واقع بر خاک دانه‌ای انجام دادند. تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از ژئوسل در مقایسه با ژئوتکستایل صفحه‌ای با جرم برابر، در کاهش نشست شالوده به‌مراتب عملکرد بهتری دارد و حالت پایدار پلاستیک^۸ در تعداد سیکل‌های بارگذاری- باربرداری کم‌تری اتفاق می‌افتد [۱۶]. در حالت پایدار پلاستیک، تغییر شکل ایجاد شده در هر مرحله از بارگذاری، طی فرآیند باربرداری به‌طور کامل به حالت قبل برمی‌گردد.

-
1. Geocell
 2. Three-dimensional, 3D
 3. Plannar reinforcements
 4. Geotextile
 5. Geogrid
 6. Pokharel
 7. Dawson
 8. Plastic shakedown

برخلاف پژوهش‌های سایر پژوهش‌گران که به‌طور عمده از روش تثبیت برای مقاوم‌سازی مصالح لایروبی استفاده کرده‌اند، در پژوهش حاضر برای بررسی و اصلاح رفتار بار-نشست ماسه لایروبی از روش تسلیح استفاده شده که برای این منظور، مسلح‌کننده ژئوسل استفاده شده است. هم‌چنین با استفاده از دو نوع خاک مختلف برای لایه فوقانی مدل خاکی، تفاوت عملکرد در دو حالت مسلح و غیرمسلح بررسی شده است.

بیان مسئله

یکی از بزرگ‌ترین پروژه‌های لایروبی که در سواحل شمالی خلیج فارس در حال انجام است، لایروبی احداثی فاز ۲ و ۳ توسعه بندر شهیدرجایی است. در این پروژه در مجموع، ۱۱/۵ میلیون مترمکعب رسوبات طبیعی ساحل به‌وسیله لایروب مکنده تیغه‌دار^۱ برداشت شده و در پس‌کرانه ساحل در مجاورت بخش غربی حوضچه، لایریزی می‌شود. ارتفاع رسوبات دیو شده در برخی قسمت‌ها به ۸ متر می‌رسد. انباشت زیاد این مصالح، علاوه بر اشغال زمین‌های پرارزش اسکله، باعث بالا رفتن پتانسیل ایجاد ریزگردها در سطح منطقه شده است. با توجه به هزینه زیاد جابه‌جایی و دفن این مصالح در خارج از محوطه اسکله، انتقال و استفاده مفید^۲ از این مصالح لایروبی، بسیار ضروری است. در شکل ۱ موقعیت محل لایروبی لایروبی و لایریزی در بندر شهیدرجایی ایران، مشخص شده است.

مصالح حاصل از پروژه لایروبی توسعه بندر شهیدرجایی عمدتاً از ماسه بد دانه‌بندی شده (SP یا SP-SM) تشکیل شده است. با توجه به دانه‌بندی نامناسب و ضعف مقاومتی آن، استفاده مهندسی از این خاک‌ها مستلزم به‌سازی آن‌ها است. راهکارهای مختلفی برای استفاده مفید از مصالح لایروبی^۳ وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به استحصال زمین و احداث جزایر مصنوعی، تغذیه و بازیافت ساحل، استفاده در قطعات غیرمسلح و روسازی بتنی و تسلیح به‌وسیله انواع ژئوستتیک‌ها، تثبیت با سیمان، آهک و امولسیون برای احداث انواع خاکریزهای مهندسی اشاره کرد. به‌دلیل نیاز بندر شهیدرجایی به احداث محوطه‌های جدید و راه‌های دسترسی به اراضی پشتیبانی، به حجم زیادی از مصالح خاکی احتیاج است. با توجه

-
1. Cutter suction
 2. Beneficial use
 3. Beneficial use of dredged material

به این که مصالح لایروبی بندر، عمدتاً از نوع ماسه‌ای است، از این رو، استفاده از ژئوسل با توجه به ساختار سه‌بعدی و تأمین محصورکنندگی برای خاک [۹]، ایجاد چسبندگی ظاهری برای خاک‌های دانه‌ای [۱۷]، توزیع تنش در سطح گسترده‌تر [۱۸]، سرعت و سهولت اجرا و افزایش ظرفیت باربری خاک [۱۹]، می‌تواند راهکار مناسبی برای تسلیح خاک ماسه‌ای حاصل از لایروبی باشد.

در پژوهش حاضر به منظور بررسی رفتار بار-نشست ماسه کربناته حاصل از لایروبی مسلح‌شده به وسیله ژئوسل، از مدل فیزیکی شامل صفحه بارگذاری دایره‌ای بر ماسه مسلح و غیرمسلح استفاده شده است که تحت بارگذاری تکراری قرار گرفته است. هم‌چنین تأثیر حضور رویه از نوع خاک خوب دانه‌بندی‌شده بر لایه ماسه لایروبی، بررسی شده است.



شکل ۱. موقعیت محل لایروبی و لایریزی ماسه کربناتی در بندر شهید رجایی

مصالح استفاده شده در تحقیق

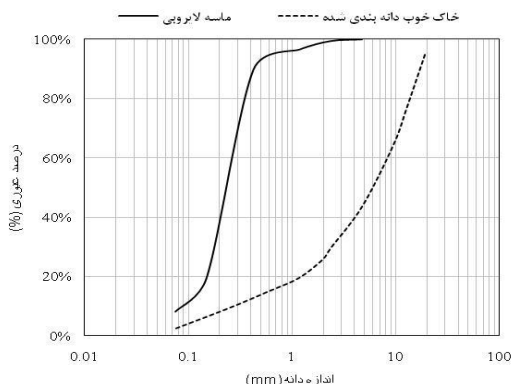
مصالح خاکی

در این پژوهش از دو نوع خاک استفاده شده است. نوع اول که بیش‌ترین حجم مصالح خاکی استفاده شده را به خود اختصاص می‌دهد، ماسه حاصل از لایروبی بندر شهید رجایی است که در لایه‌های مختلف مدل خاکی از آن استفاده شده است. به منظور انتخاب مصالح معرف، نمونه‌گیری از ۸ نقطه پهنه لایریزی برای انجام آزمایش دانه‌بندی انجام شده است که اختلاف کم در نتایج آن، بیان‌گر یک‌نواختی مصالح است. هم‌چنین با استفاده از نتایج برش

مستقیم، زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه‌ای، ۳۳ درجه و میزان چسبندگی آن 0.08 kg/cm^2 به دست آمده است و مقدار توده ویژه آن $2/7$ است. نوع دوم خاک استفاده شده، شن خوب دانه‌بندی شده است که از معادن اطراف شهر بندرعباس تهیه شده و فقط در لایه بالایی به عنوان رویه توده ماسه لایروبی شده، از آن استفاده شده است. مشخصات فنی هر دو نوع خاک استفاده شده، در جدول ۱، و نمودار دانه‌بندی آن‌ها در شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات فنی مصالح خاکی استفاده شده

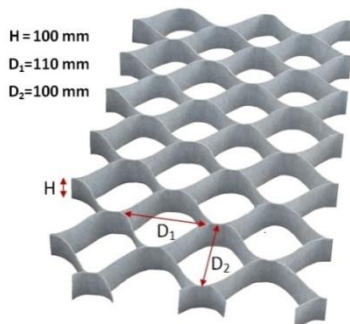
مقدار		استاندارد آزمایش	علامت اختصاری	واحد	نام مشخصه
شن خوب	ماسه لایروبی				
GW	SP-SM	ASTM D6913	USCS	-	طبقه‌بندی متحد
۲۹/۹	۳/۱	ASTM D422	C_u	-	ضریب یک‌نواختی
۲/۵۸	۱/۲		C_c	-	ضریب انحناء منحنی دانه‌بندی
۵/۸۷	۰/۲۳		D_{50}	mm	اندازه متوسط دانه‌ها
۱۸	۱۵	ASTM D4254	$\gamma_{d \min}$	kN/m^3	وزن مخصوص خشک حداقل
۲۳/۱	۱۷/۶	ASTM D4253	$\gamma_{d \max}$	kN/m^3	وزن مخصوص خشک حداکثر
N.V	N.V	ASTM D4318	LL	%	حد روانی
N.PI	N.PI		PI	%	شاخص خمیری



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی مصالح خاکی

ژئوسل

به منظور تسلیح ماسه، از ژئوسل محصول شرکت دوپونت^۱ استفاده شده است که مشابه آن در تحقیقات پژوهش‌گران مختلفی از جمله مقدس تفرشی و داوسون در سال ۲۰۱۰ و توکلی و همکاران در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ استفاده شده است [۱۶]، [۲۲]، [۲۳]، [۲۴]. در تمامی آزمون‌ها ابعاد چشمه‌های ژئوسل‌ها، $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ با ارتفاع 10 cm است. در شکل ۴ تصویر شماتیک از ژئوسل استفاده شده به همراه مشخصات هندسی آن ارائه شده است.



شکل ۴. مشخصات هندسی ژئوسل‌های استفاده شده

این ژئوسل‌ها از ژئوتکتستایل بافته نشده با اتصالات حرارتی^۲ از جنس پلی‌پروپیلن^۳ با مشخصات فنی ارائه شده در جدول ۳، ساخته شده‌اند و دارای چشمه‌های لانه‌زنبوری^۴ هستند.

جدول ۳. مشخصات ژئوسل استفاده شده در این تحقیق [۲۴]

مقادیر	واحد	مشخصات
نابافته ذوبی حرارتی	-	نوع ژئوتکتستایل
۲۹۰		وزن در هر مترمربع
۰/۷۵	(mm)	ضخامت تحت بار $2 \frac{kN}{m^2}$
۰/۶۲	(mm)	ضخامت تحت بار $200 \frac{kN}{m^2}$
۲/۳۰	$(\frac{kN}{m})$	مقاومت کششی
۹/۳۰	$(\frac{kN}{m})$	مقاومت در کرنش ۵٪

1. DuPont
2. Heat Bonded Nonwoven geotextile (HBNW)
3. Polypropylene
4. Honeycomb-like

مدل فیزیکی و نحوه انجام آزمایش

آماده‌سازی نمونه‌های خاکی

برای ساخت مدل خاکی، لایه ماسه لایروبی غیرمسلح (UDS^1) به تدریج با وزن و حجم مشخص در لایه‌های ۱۰ سانتی‌متری متراکم شده است. در حالت مسلح، این کار تا تراز زیر ژئوسل و در نمونه‌های غیرمسلح تا سطح زمین یا تراز زیر خاک خوب دانه‌بندی شده ادامه پیدا کرده است. لازم به ذکر است که برای متراکم کردن همه لایه‌های خاکی از کوبه دستی به ابعاد 10×10 سانتی‌متر و وزن ۸ کیلوگرم استفاده شده است. در حالت مسلح، به منظور عملکرد مناسب ژئوسل به عنوان مسلح‌کننده، لایه ماسه‌ای زیرین ژئوسل باید دارای تراکم مناسب باشد [۲۵]. از این‌رو، پس از تراز کردن سطح فوقانی لایه UDS ، برای اجرای لایه خاک مسلح (RLS^2)، ژئوسل روی بستر ماسه‌ای پهن‌شده و موقعیت آن به کمک میله‌های نگه‌دارنده تعیین و ثابت شده است. سپس سلول‌های مسلح‌کننده با شرایط تراکمی کاملاً کنترل شده (کنترل وزن و حجم خاک)، با ماسه لایروبی پر و متراکم شده است. در پایان، بسته به برنامه آزمایش، یک لایه ماسه لایروبی یا خاک خوب دانه‌بندی شده (ULS^3) با ضخامت ۵ سانتی‌متر به عنوان رویه، روی لایه خاکی مسلح‌شده با ژئوسل ریخته و متراکم می‌شود. این لایه رویه در پخش بهتر تنش اعمالی بر خاک مسلح و جلوگیری از انتقال مستقیم بار روی مسلح‌کننده و کماتش دیواره‌های آن مؤثر است [۲۶]. پژوهش‌گران زیادی به بررسی و تعیین مقدار بهینه ضخامت لایه رویه پرداخته‌اند. تالاک^۴ و همکاران در سال ۲۰۰۷ با قراردادن ژئوسل در اعماق مختلف زیر صفحه بارگذاری مشاهده کردند که ظرفیت باربری به‌طور چشم‌گیری در حالتی که ژئوسل در عمقی کم‌تر از نصف قطر صفحه دایره‌ای قرار دارد، افزایش پیدا می‌کند [۱۵]. در پژوهش حاضر، با توجه به درشت‌دانه بودن خاک لایه ULS در برخی آزمون‌ها، برای امکان‌پذیر کردن اجرای آن، ضخامت این لایه، مقدار ثابت ۵ سانتی‌متر و برابر با ۳۳٪ قطر صفحه بارگذاری انتخاب شده است. نحوه چیدمان

-
1. Unreinforced dredged soil
 2. Reinforced layer of soil
 3. Upper layer of soil
 4. Thallak

لایه‌ها با توجه به نوع آزمایش، در جدول ۴ ارائه شده است. در این جدول، نام آزمون با توجه به حالت مسلح (GR) و غیرمسلح (UR) و همچنین حضور رویه ۵ سانتی‌متری از جنس ماسه لایروبی (S) و شن خوب دانه‌بندی شده (W) انتخاب شده است.

جدول ۴. نحوه چیدمان لایه‌ها با توجه به نوع آزمایش

ردیف	نام آزمون	توصیف لایه‌های مدل خاکی
۱	UR-S5 ^o	۶۵cm ماسه لایروبی غیرمسلح
۲	GR-S5	۵۰cm ماسه لایروبی + ۱۰cm ژئوسل + ۵cm ماسه لایروبی
۳	UR-W5	۶۰cm ماسه لایروبی غیرمسلح + ۵cm شن خوب دانه‌بندی شده
۴	GR-W5	۵۰cm ماسه لایروبی + ۱۰cm ژئوسل + ۵cm شن خوب دانه‌بندی شده

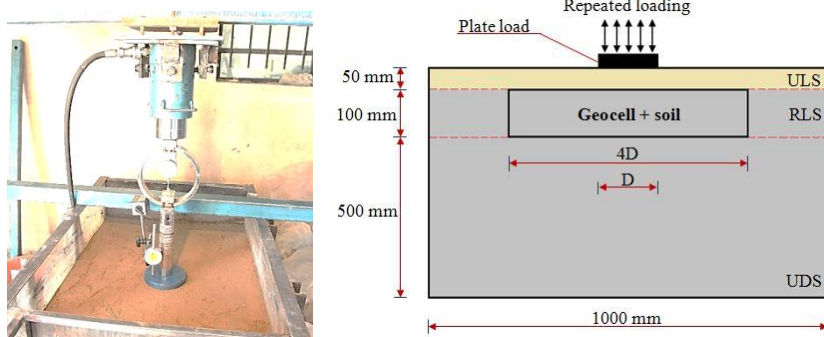
^o برای کنترل تکرارپذیری نتایج، آزمایش مذکور تکرار شده است.

ساختار و اجزای دستگاه آزمایش

اجزای کلی دستگاه آزمایش شامل جعبه آزمایشگاهی، سیستم بارگذاری هیدرولیکی دستی (شامل پمپ هیدرولیکی، سیلندر و پیستون، شیلنگ‌های رابط، قاب بارگذاری و ملحقات آن‌ها)، صفحه بارگذاری دایره‌ای و گیج‌های مکانیکی جابه‌جایی سنج و نیروسنج است [۲۷]. بارگذاری قائم به‌وسیله جک هیدرولیکی دستی با ظرفیت ۲۰ تن، متکی بر تیر عکس‌العمل انجام شده است. جعبه آزمایش با طول ۱۰۰، عرض ۷۵ و ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر ساخته شده است. تصویر شماتیک مدل آزمایشگاهی و تصویر دستگاه بارگذاری در شکل ۵ آمده است. دیواره‌های جعبه آزمایش از ورقه پلکسی ساخته شده‌اند و به‌وسیله مجموعه پروفیل‌های فولادی مهار شده‌اند تا ضمن جلوگیری از ایجاد تغییرشکل‌های جانبی (خارج از صفحه)، اثرات اصطکاک شرایط مرزی که از عوامل ایجاد خطا در نتایج است به حداقل ممکن برسد.

سیستم بارگذاری صفحه و قرائت داده‌ها

در این پژوهش، بارگذاری روی صفحه دایره‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر انجام شده تا از اثر مقیاس مدل سطح تماس چرخ با سطح زمین تا حد ممکن کاسته شود. در این راستا، پژوهش‌گران مختلفی از صفحه دایره‌ای شکل برای مدل‌سازی بارگذاری ترافیکی استفاده کرده‌اند

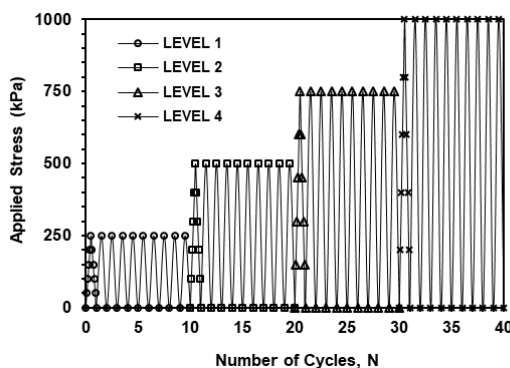


شکل ۵. ابعاد کلی مدل آزمایشگاهی، موقعیت قرارگیری لایه‌های خاکریزی و صفحه بارگذاری

داس و عمر^۱ در سال ۱۹۹۴ اعلام کردند که ظرفیت باربری بستر مسلح و غیرمسلح برای صفحه‌های بارگذاری با قطر بیش از ۱۵۰ میلی‌متر تغییرات چندانی ندارد و انتخاب صفحه دایره‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر کفایت می‌کند [۲۸]. هم‌چنین هسی و مائو^۲ در سال ۲۰۰۵ با بارگذاری روی خاک با دو صفحه دایره‌ای به قطرهای ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر و دانه‌بندی مختلف دریافتند که صفحه بارگذاری با اندازه بزرگ‌تر از ۱۵ برابر اندازه D_{50} خاک تأثیر چندانی بر نشست صفحه ندارد [۲۹]. در این پژوهش D_{50} برابر با 0.219 میلی‌متر است. آرنولد در سال ۲۰۰۴ به‌منظور بررسی شیار افتادگی چرخ کامیون سنگین از بار ۱۰۰۰ کیلو پاسکال استفاده کرده است [۳۰]. توکلی و همکاران نیز در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۵ برای شبیه‌سازی اثر چرخ خودرو با تنش حداکثر ۸۰۰ کیلوپاسکال از صفحه بارگذاری دایره‌ای شکل به قطر ۱۵۰ میلی‌متر برای این منظور استفاده کردند [۲۳]، [۳۱]. خلیج و همکاران در سال ۲۰۱۵ به‌منظور مدل کردن بار کامیون سنگین در حالت پر از بار و کامیون بدون بار، به‌ترتیب نیروی ۸۰۰ و ۴۰۰ کیلو پاسکال را انتخاب کرده‌اند [۳۲]. در پژوهش حاضر به‌منظور مدل‌سازی بار وسایل نقلیه سبک نظیر وانت، نیروی ۲۵۰ کیلو پاسکال در سطح اول بارگذاری، نیروی ۵۰۰ برای کامیون نیمه‌پر، نیروی ۷۵۰ برای کامیون پر از بار و نیروی ۱۰۰۰ کیلو پاسکال برای تعیین حداکثر بار قابل تحمل انتخاب شده است.

1. Das and Omar
2. Hsieh and Mao

بحرانی‌ترین حالت بارگذاری ناشی از چرخ وسایل نقلیه زمانی رخ می‌دهد که ابتدا بار در چندمرحله به شکل ایستایی اعمال و سپس بار حداکثر به صورت تکراری (بارگذاری، باربرداری) وارد شود [۲۴]. از این‌رو در پژوهش حاضر برای جلوگیری از اعمال شوک به سیستم خاک و رخدادهای گسیختگی ناگهانی، در سیکل اول بارگذاری، ابتدا بار ایستایی در پنج مرحله به صورت افزایشی وارد شده و در پنج مرحله باربرداری می‌شود و پس از آن آزمایش با بارگذاری تکراری ادامه می‌یابد. فرآیند بارگذاری تکراری در شکل ۶ ارائه شده است. بارگذاری موردنظر شامل چهار سطح بارگذاری است که هر سطح بارگذاری شامل ۱۰ سیکل و هر سیکل در زمان ۶ دقیقه تداوم دارد (بارگذاری ۳ دقیقه و باربرداری ۳ دقیقه). مطابق با یافته‌های مقدس‌تفرشی و داوسون، بخش زیادی از نشست خاک (۳۵ تا ۶۰ درصد) تحت این‌گونه بارگذاری‌ها در ۱۰ سیکل اول صورت می‌گیرد [۳۳]. در مراحل مختلف، نشست صفحه بارگذاری و مقادیر بار اعمالی از طریق گنج‌های مکانیکی جابه‌جایی سنج و نیروسنج، خوانده می‌شود. هر آزمایش زمانی تمام می‌شود که سطح بارگذاری به ۱۰۰۰ کیلوپاسکال (سطح چهارم) رسیده یا خاک گسیخته شود.

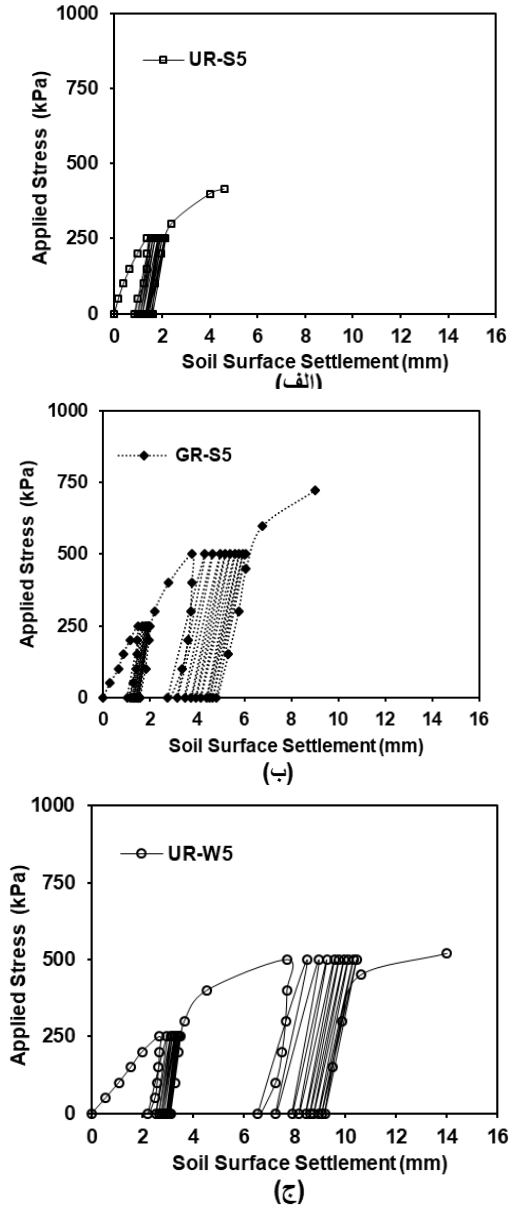


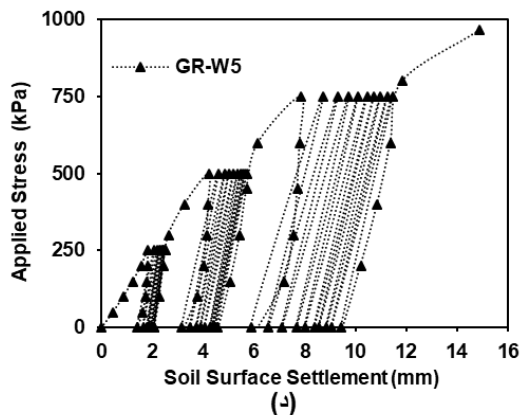
شکل ۶. روند بارگذاری تکراری استفاده شده

نتایج آزمون‌ها و تفسیر آن‌ها

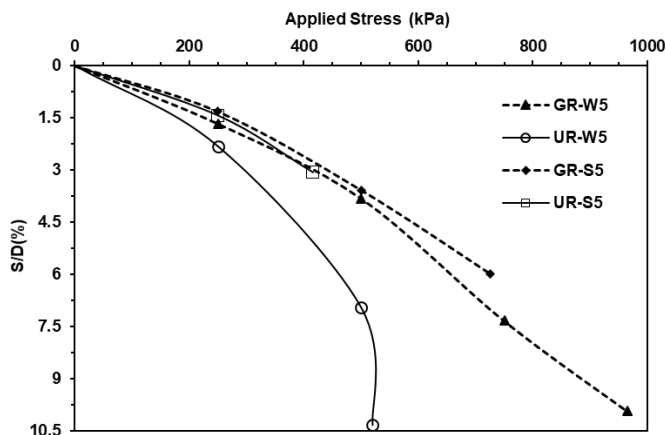
به منظور مقایسه و تحلیل رفتار بار-نشست خاک غیرمسلح و خاک مسلح شده با ژئوسل و همچنین تأثیر رویه شنی تحت بارگذاری تکراری، ابتدا نتایج در شکل‌های ۷ تا ۱۰ ارائه و سپس در سه بخش اثر ژئوسل، اثر رویه و اثر هم‌زمان رویه و ژئوسل بررسی شده است.

در شکل ۷ نمودارهای بار-نشست در چهار حالت غیرمسلح و مسلح شده با ژئوسل، برای دو رویه شنی و ماسه‌ای بررسی شده است.





شکل ۷. نمودار بار- نشست ماسه لایروبی، الف) خاک غیرمسلح با رویه ماسه‌ای، ب) خاک مسلح با رویه ماسه‌ای، ج) خاک غیرمسلح با رویه شنی، د) خاک مسلح با رویه شنی برای ارزیابی بهتر نتایج نمودارهای ارائه شده در شکل ۷ و مقایسه میزان باربری خاک در نشست‌های مختلف در پایان هر سطح بارگذاری، از نمودارهای شکل ۸ استفاده شده است. در شکل ۸، S/D معرف نسبت نشست کل به قطر صفحه بارگذاری است. بخشی از نتایج حاصل از شکل ۸، شامل میزان باربری خاک در نسبت‌های منتخب S/D (۱/۵، ۳، ۶ و ۹ درصد) و ظرفیت باربری و نشست متناظر با گسیختگی سیستم، در جدول ۵ ارائه شده است.



شکل ۸. میزان بار بر حسب S/D ، متناظر با سیکل آخر هر سطح بارگذاری برای ماسه لایروبی غیرمسلح و مسلح شده با ژئوسل با رویه شنی و رویه ماسه‌ای

جدول ۵. میزان باربری متناظر با نشست های مختلف خاک

GR-W5	UR-W5	UR-S5	GR-S5	نام آزمون
۲۲۵	۱۷۵	۲۵۷	۲۷۵	میزان باربری در $S/D=1/5\%$ (کیلوپاسکال)
۴۲۰	۳۰۰	۴۱۰	۴۳۵	میزان باربری در $S/D=3\%$ (کیلوپاسکال)
۶۵۵	۴۶۲	-	۷۲۵	میزان باربری در $S/D=6\%$ (کیلوپاسکال)
۸۸۰	۵۲۵	-	-	میزان باربری در $S/D=9\%$ (کیلوپاسکال)
۹۶۵	۵۲۰	۴۱۶	۷۲۵	میزان باربری متناظر با گسیختگی (کیلوپاسکال)
۱۴/۹۰	۱۵/۵۰	۴/۶	۹	نشست کل متناظر با گسیختگی (میلی متر)
۱۲	۱۲/۵	۳/۵	۷	نشست پلاستیک تقریبی متناظر با گسیختگی (میلی متر)

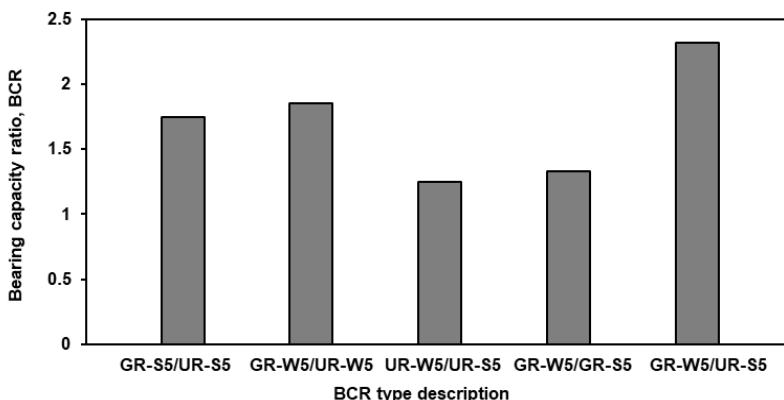
برای مقایسه دقیق تر عملکرد نوع خاک لایه رویه و ژئوسل، از نسبت ظرفیت باربری^۱ (BCR) [۳۴] استفاده شده است. BCR در این پژوهش عبارت است از نسبت ظرفیت باربری نهایی در حالت های مختلف خاک مسلح یا به سازی شده با رویه شنی به خاک غیرمسلح یا به سازی نشده که در رابطه ۱ معرفی شده است. برای تعیین ظرفیت باربری نهایی خاک، به دلیل این که میزان نشست های رخ داده کم تر از یک چهارم قطر صفحه بارگذاری است، بار نهایی صفحه به عنوان ظرفیت باربری نهایی در نظر گرفته شده است [۳۵]. با توجه به این که از یک سو میزان باربری برای S/D های بزرگ تر از ۳ درصد برای تمامی حالت ها وجود ندارد و از سوی دیگر در سطوح کرنش اندک، نقش ژئوسل در بهبود ظرفیت باربری کم تر است، از این رو، صرفاً BCR های متناظر با لحظه گسیختگی که عملکرد ژئوسل در آن مشخص تر است، در شکل ۹ ارائه شده است.

$$BCR = \frac{(Bearing Capacity)_{improved}}{(Bearing Capacity)_{unimproved}} \quad (1)$$

برای بررسی نشست های پلاستیک متناظر با سیکل های بارگذاری، نمودار شکل ۱۰ متناظر با چهار سطح بارگذاری^۲ (مراجعه شود به شکل ۶) ارائه شده است. در این نمودار،

1. Bearing Capacity Ratio
2. loading level

نشست پلاستیک بر حسب ۱۰ سیکل بارگذاری (سیکل ۱ تا ۱۰) برای حالت‌های غیرمسلح و مسلح شده با ژئوسل، برای دو رویه شنی و ماسه‌ای ارائه شده است.



شکل ۹. نسبت ظرفیت باربری در حالت‌های مختلف

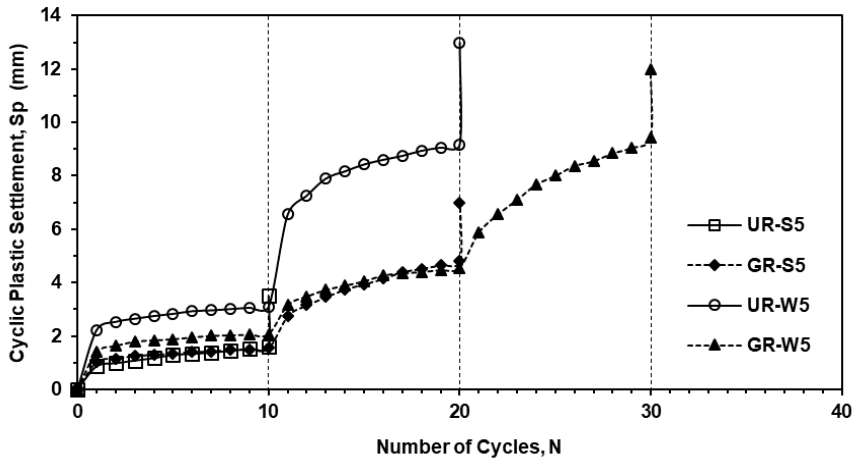
اثر تسلیح

با بررسی نمودارهای ۷ و ۸ و همچنین شکل ۹ مشاهده می‌شود که خاک مسلح در مقایسه با خاک غیرمسلح در سطوح تنش بالاتر و تعداد سیکل‌های بیش‌تری گسیخته شده است. بر اساس این نتایج، ظرفیت باربری سیستم ماسه لایروبی مسلح با ژئوسل در هر دو حالت رویه شنی و ماسه‌ای افزایش یافته است. در حالتی که از رویه ماسه‌ای استفاده شده، ظرفیت باربری با حدود ۷۰ درصد افزایش، از مقدار ۴۱۶ کیلوپاسکال (مابین سطوح اول و دوم بارگذاری) به ۷۲۵ کیلوپاسکال (مابین سطوح دوم و سوم بارگذاری) ارتقا یافته است. در حالتی که از رویه شنی استفاده شده، ظرفیت باربری با حدود ۸۰ درصد افزایش، از مقدار ۵۲۰ به ۹۶۰ کیلوپاسکال رسیده و نشان‌دهنده آن است که نقش ژئوسل در تسلیح، در حالت رویه شنی در مقایسه با رویه ماسه‌ای اندکی بیش‌تر است.

مطابق با نمودار ارائه شده در شکل ۱۰ در سطح اول بارگذاری برای رویه شنی، مقدار نشست پلاستیک خاک مسلح در مقایسه با خاک غیرمسلح حدود ۳۰ درصد و در سطح دوم بارگذاری این نشست ۵۰ درصد کاهش یافته است. این میزان از کاهش نشست، بیان‌گر افزایش سختی خاک مسلح در مقایسه با خاک غیرمسلح است. همچنین رفتار خوب ژئوسل

در کاهش نشست‌های پلاستیک تحت فرآیند بارگذاری- باربرداری مشهود است. افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری و باربرداری در سطوح تنش مربوطه، موجب متراکم شدن خاک و افزایش سختی آن شده است. نتایج تحقیقات پژوهش‌گران مختلف نیز مؤید عملکرد مطلوب ژئوسل در بهبود رفتار بار-نشست خاک است [۳۶]، [۳۷].

LEVEL 1 (0-250 kPa) LEVEL 2 (0-500 kPa) LEVEL 3 (0-750 kPa) LEVEL 4 (0-1000 kPa)



شکل ۱۰. مقایسه نشست پلاستیک خاک غیرمسلح و خاک مسلح شده با ژئوسل با رویه‌های شنی و ماسه‌ای

اثر رویه

مطابق شکل ۸ و جدول ۵ در حالت غیرمسلح، استفاده از شن خوب دانه‌بندی شده به‌جای ماسه لایروبی در لایه رویه، سبب ۲۵ درصد افزایش (۴۱۶ به ۵۲۰ کیلوپاسکال) در ظرفیت باربری شده است. هم‌چنین در حالت مسلح، استفاده از شن خوب دانه‌بندی شده در لایه رویه به‌جای ماسه لایروبی، موجب افزایش نقش ژئوسل در بالارفتن ظرفیت باربری و کاهش نشست خاک، در همه سطوح بارگذاری شده است. میزان افزایش ظرفیت باربری در این حالت حدود ۳۰ درصد (۷۲۵ به ۹۶۰ کیلوپاسکال) و کاهش نشست‌های پلاستیک، ۳۰ تا ۵۰ درصد در سطوح بارگذاری اول و دوم است.

مقایسه نمودارهای مربوط به خاک غیرمسلح در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که به‌کارگیری شن خوب دانه‌بندی‌شده در رویه، باعث شده تا تعداد سیکل‌های بارگذاری نسبت به حالت غیرمسلح با رویه ماسه کربناتی حدود ۱۰ سیکل (یک سطح بارگذاری) افزایش پیدا کند. محدود بودن گستره تنش انتقال‌یافته به ژئوسل در حالت خاک مسلح با رویه ماسه‌ای، موجب شده تا مسلح‌کننده در سطح اول بارگذاری، نقش کم‌تری در تسلیح و کاهش نشست‌ها داشته باشد. در سطح دوم بارگذاری، با افزایش تغییرشکل سیستم، ژئوسل نقش تسلیح خود را بارز کرده، به‌طوری‌که نسبت به حالت غیرمسلح، ظرفیت باربری سیستم را بهبود بخشیده است. این موضوع می‌تواند به دلیل نشست ماسه لایه رویه باشد. در آزمون‌هایی که رویه از جنس ماسه لایروبی است، برش سوراخ‌کننده در اطراف محل اثر صفحه بارگذاری مشاهده می‌شود. در این زمینه میشل^۱ و همکاران در سال ۱۹۷۹ نیز با بررسی اثر نوع پوشش روی ژئوسل به این نتیجه رسیدند که استفاده از پوشش ماسه‌ای، باعث افزایش نشست از طریق فشرده شدن ماسه و نفوذ لایه پوشش در لایه‌های زیرین می‌شود [۲۶]. این مطلب اهمیت نوع خاک به‌کاررفته در لایه رویه را در بازده ژئوسل برای بهبود رفتار خاک مسلح، روشن می‌سازد.

اثر هم‌زمان رویه و تسلیح

مطابق شکل‌های ۸ و ۱۰ و جدول ۵، تسلیح هم‌زمان ماسه لایروبی با ژئوسل و رویه شنی، موجب افزایش حدود ۲/۳ برابری میزان باربری خاک شده است. میزان ظرفیت باربری از ۴۱۶ (مابین سطوح اول و دوم بارگذاری) به ۹۶۰ کیلوپاسکال (مابین سطوح سوم و چهارم بارگذاری) و تعداد سیکل‌های بارگذاری از ۱۰ به ۳۰ سیکل افزایش یافته است. مقایسه نمودار ماسه لایروبی مسلح با رویه ماسه‌ای (GR-S5)، با نمودار ماسه لایروبی غیرمسلح با رویه شنی (UR-W5)، نشان می‌دهد که استفاده از خاک خوب دانه‌بندی‌شده به‌عنوان لایه خاکریز فوقانی، به اندازه تسلیح با ژئوسل به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر، در کاهش نشست‌های پلاستیک ماسه لایروبی مؤثر نیست. هرچند عملکرد دو حالت مذکور در کنترل تعداد

1. Mitchell

سیکل‌های موردنیاز برای گسیختگی خاک، تقریباً مشابه است ولی ظرفیت باربری نمونه مسلح حدود ۴۰ درصد بیش‌تر است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی اثر تسلیح ماسه لایروبی کربناته بندر شهید رجایی با ژئوسل و بررسی نوع خاک استفاده شده در لایه رویه پرداخته شد و نتایج نشان داد که:

۱. برای استفاده از ماسه لایروبی در لایه‌های زیرین خاکریز محوطه‌ها و جاده‌های دسترسی بندر شهید رجایی می‌توان از ژئوسل برای تسلیح آن به‌همراه شن خوب دانه‌بندی‌شده در لایه فوقانی خاک مسلح استفاده کرد. استفاده هم‌زمان از خاک خوب دانه‌بندی‌شده در لایه رویه (به‌ضخامت ۵ سانتی‌متر) در کنار مسلح‌سازی ماسه لایروبی با ژئوسل (به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر) منجر به افزایش تقریباً $\frac{2}{3}$ برابری ظرفیت باربری شده است. در این حالت ظرفیت باربری خاک برای صفحه بارگذاری به قطر ۱۵ سانتی‌متر از ۴۱۶ به ۹۶۰ کیلوپاسکال افزایش یافته است.
۲. استفاده از ژئوسل برای تسلیح ماسه لایروبی منجر به بهبود رفتار بار-نشست آن می‌شود. مسلح‌سازی ماسه لایروبی با ژئوسل به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر، ظرفیت باربری را بسته به‌نوع رویه، حدود $\frac{1}{7}$ تا $\frac{1}{8}$ برابر نسبت به حالت غیرمسلح کرده است. میزان این افزایش در حالت استفاده از رویه شنی، حدود ۱۰ درصد در مقایسه با رویه ماسه‌ای، بیش‌تر است.
۳. در حالت غیرمسلح، استفاده از ۵ سانتی‌متر شن خوب دانه‌بندی‌شده در لایه رویه، از یک‌سو باعث افزایش نشست پلاستیک نسبت به رویه ماسه‌ای در سطح اول بارگذاری شده است (حدود ۲ برابر) و از سوی دیگر ظرفیت باربری ماسه لایروبی غیرمسلح را در لحظه گسیختگی تقریباً ۲۵ درصد افزایش داده است.
۴. در حالت مسلح، استفاده از ۵ سانتی‌متر شن خوب دانه‌بندی‌شده در لایه رویه، باعث افزایش میزان بارزده ژئوسل شده است و نشست‌های پلاستیک خاک مسلح را نسبت به خاک غیرمسلح در سطوح بارگذاری اول و دوم ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش داده و منجر به گسیختگی خاک در تعداد سیکل‌های بارگذاری بیش‌تر شده است.

۵. به‌کارگیری شن خوب دانه‌بندی‌شده در رویه در دو حالت مسلح و غیرمسلح، باعث شده تا تعداد سیکل‌های بارگذاری نسبت به شرایط مشابه با رویه ماسه کربناتی حدود ۱۰ سیکل (یک سطح بارگذاری) افزایش پیدا کند.
۶. در حالتی که لایه رویه از جنس ماسه لایروبی است، در سطح اول بارگذاری (۲۵۰ کیلوپاسکال)، نشست پلاستیک در دو حالت مسلح و غیرمسلح تفاوت چشم‌گیری ندارد و نقش ژئوسل مشهود نیست، اما با افزایش میزان بارگذاری فراتر از ۲۵۰ کیلوپاسکال تفاوت رفتار خاک در دو حالت مسلح و غیرمسلح مشخص می‌شود.
۷. یکی از نکات حائز اهمیت در عملکرد مطلوب ژئوسل، نوع خاک استفاده شده در لایه فوقانی ژئوسل است که نقش پیش‌توزیع بارها و جلوگیری از لهیدگی دیواره‌های ژئوسل را بر عهده دارد.

منابع

1. Maher A., Douglas W. S., Jafari F., Pecchioli J., "The processing and beneficial use of fine-grained dredged material, a manual for engineers", Centre for Advance Infrastructure and Transportation (2013).
2. Siham K., Fabrice B., Edine A. N., Patrick D., "Marine dredged sediments as new materials resource for road construction", Waste Manag, 28 (5) (2008) 919-28.
3. Dubois V., Abriak N. E., Zentar R., Ballivy G., "The use of marine sediments as a pavement base material", Waste Manag. (2009) 29 (2) 774-82.
4. Huang Y., Zhu W., Qian X., Zhang N., Zhou X., "Change of mechanical behavior between solidified and remolded solidified dredged materials", Eng Geol. 119 (3) (2011) 112-9.
5. Wang D., Abriak N. E., Zentar R., "Strength and deformation properties of Dunkirk marine sediments solidified with cement, lime and fly ash",

- Vol. 166, Engineering Geology (2013).
6. Tavakoli Mehrjardi G., Ghanbari A., Mehdizadeh H., "Experimental study on the behaviour of geogrid-reinforced slopes with respect to aggregate size", *Geotext Geomembranes*, 44 (6) (2016) 862-71.
 7. Kondo J. R., Roodi G. H., Zornberg J. G., "Evaluation of the Interaction between dredged materials and geosynthetic reinforcements", In: 3rd Pan-American Conference on Geosynthetics, Miami, Florida (2016) 1187-202.
 8. Cantré S., Saathoff F., "Investigation of dredged materials in combination with geosynthetics used in dike construction". *Procedia Eng.*, 57 (2013) 213-21.
 9. Pokharel S. K., Han J., Leshchinsky D., Parsons R. L., Halahmi I., "Investigation of factors influencing behavior of single geocell-reinforced bases under static loading", *Geotext Geomembranes*, 28 (6) (2010) 570-8.
 10. De Garidel R., Morel G., "New soil strengthening techniques by textile elements for low volume roads", In: Proc of 3rd International Conference on Geotextiles (1986) 1027-32.
 11. Dash S. K., Krishnaswamy N. R., Rajagopal K., "Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand", *Geotext Geomembranes*, 19 (4) (2001) 235-56.
 12. Rea C., Mitchell J. K., "Sand Reinforcement using Paper Grid Cells". In: Symposium on Earth Reinforcement. ASCE (2006) 644-63.
 13. Bathurst R. J., Jarret P. M., "Large-scale model tests of geocomposite mattresses over peat subgrades", *Transp Res Rec.*, (1188) (1988) 28-36.
 14. Mir Mohammad Hosseini S. M., Mohammadi M., Kargar M.,

- "Experimental study on the cyclic behavior of footings on sand reinforced with geocell and tire shreds". In: 7th International Conference on Seismology & Earthquake Engineering. Tehran (2015).
15. Thallak S. G., Saride S., Dash S. K., "Performance of surface footing on geocell-reinforced soft clay beds". *Geotech Geol Eng.*, 25 (5) (2007 Aug) 509-24.
 16. Moghaddas Tafreshi S. N., Dawson A. R., "Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement". *Geotext Geomembranes*, 28 (1) (2010) 72-84.
 17. Pincus H., Bathurst R., Karpurapu R., "Large-Scale triaxial compression testing of geocell-reinforced granular soils", *Geotech Test J.*, 16 (3) (1993) 296.
 18. Ling Zhang, Minghua Zhao, Caijun Shi H. Z., "Bearing capacity of geocell reinforcement in embankment engineering". *Geotext Geomembranes*, 28 (5) (2010) 475-82.
 19. Dash S. K., Sireesh S., Sitharam T. G., "Model studies on circular footing supported on geocell reinforced sand underlain by soft clay". *Geotext Geomembranes*, 21 (4) (2003) 197-219.
 20. Datta M., Gulhati S. K., Rao G. V., "Crushing of calcareous sands during shear". In: *Offshore Technology Conference* (1979).
 21. Shahnazari H., Tutunchian M. A., Rezvani R., Valizadeh F., "Evolutionary-based approaches for determining the deviatoric stress of calcareous sands". *Comput Geosci*, 50 (2013) 84-94.
 22. Moghaddas Tafreshi S. N., Dawson A. R., "Behaviour of footings on reinforced sand subjected to repeated loading-Comparing use of 3D and planar geotextile". *Geotext Geomembranes*, 28 (5) (2010) 434-47.

23. Tavakoli Mehrjardi G., Moghaddas Tafreshi S. N., Dawson A. R., "Pipe response in a geocell-reinforced trench and compaction considerations". *Geosynth Int.*, 20 (2) (2013 Apr) 105-18.
24. Tavakoli Mehrjardi G., Moghaddas Tafreshi S. N., Dawson A. R., "Combined use of geocell reinforcement and rubber-soil mixtures to improve performance of buried pipes", *Geotext Geomembranes*, 34 (2012)116-30.
25. Tavakoli Mehrjardi G., Tafreshi S. N. M., Dawson A. R., "Pipe response in a geocell-reinforced trench and compaction considerations", *Geosynth Int.* (2) (2013).
26. Mitchell J. K., Kao T-C., Kavazanjian E., J., "Analysis of grid cell reinforced pavement bases" (1979).
27. Attarzadeh A., Ghanbari A., Hamidi A., "A study of searing capacity of shallow foundations next to sand slope with experimental models", *J. Eng. Geol.*, 9 (1) (2015) 2695-710.
28. Das B., Omar M., "The effects of foundation width on model tests for the bearing capacity of sand with geogrid reinforcement", *Geotech Geol Eng.*, 12 (2) (1994)133-41.
29. Hsieh C., Mao H-L., "A bench-scale performance test for evaluation the geosynthetic reinforcement effects on granular base courses", In: *Geo-Frontiers Congress* (2005).
30. Arnold G. K., "Rutting of granular pavements", PHD thesis, University of Nottingham (2004).
31. Tavakoli Mehrjardi G., Moghaddas Tafreshi S. N., Dawson A. R., "Numerical analysis on Buried pipes protected by combination of geocell reinforcement and rubber-soil mixture", *Int J Civ Eng.*, 13 (2)

- (2015) 90-104.
32. Khalaj O., Moghaddas Tafreshi S. N., Masek B., Dawson A. R., "Improvement of pavement foundation response with multi-layers of geocell reinforcement: Cyclic plate load test", *Geomech Eng.*, 9 (3) (2015) 373-95.
33. Moghaddas Tafreshi S. N., Dawson A. R., "A comparison of static and cyclic loading responses of foundations on geocell-reinforced sand", *Geotext Geomembranes*, 32 (2012) 55-68.
34. Yadu L., Tripathi R. K., "Effect of the Length of Geogrid Layers in the Bearing Capacity Ratio of Geogrid Reinforced Granular Fill-soft Subgrade Soil System", *Procedia-Soc Behav Sci.*, 104 (2013 Dec) 225-34.
35. Terzaghi K., Peck R. B., "Soil mechanics in engineering practice" (1967).
36. Tavakoli Mehrjardi G., "Influence of Geocell Reinforcement on Damping Properties of Trench with Pipe", *15th World Conf Earthq Eng.* (2012).
37. Moghaddas Tafreshi S. N., Dawson A. R., "Behaviour of footings on reinforced sand subjected to repeated loading-Comparing use of 3D and planar geotextile". *Geotext Geomembranes*, 28 (5) (2010) 434-47.