[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

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

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

تاریخ: دریافت ۹۶/۰۵/۰۴ پذیرش ۹۷/۰۴/۱۷

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 ژئوسنتتیک‌ها است. در این بین، ژئوسل به‌واسطهٔ 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. به‌واسطهٔ عملیات لایروبی سواحل شمالی خلیج‌فارس برای ساخت فازهای دوم و سوم توسعهٔ 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 رویه 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

*نویسنده مسئول ghanbari@khu.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

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

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

مقدمه

امروزه مدیریت رسوبات حاصل از عملیات لایروبی[1]، 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[2] 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[3] و تسلیح[4] هستند. عملیات تثبیت شامل اختلاط خاک با مقداری بهینه از مصالح تثبیت‌کننده نظیر سیمان، آهک، امولسیون، پوزولان‌ها و غیره است که به‌وسیلهٔ پژوهش‌گران زیادی در خصوص به‌سازی خاک‌های لایروبی استفاده شده است [۲]، [۳]، [٤]، [٥]. عملیات تسلیح نیز شامل روش‌های مختلفی است که یکی از آن‌ها استفاده از محصولات ژئوسنتتیک‌ها[5] است و

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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

می‌تواند رفتار خاک موردنظر و ویژگی‌های مکانیکی آن را برای مقابله با بارهای سنگین بهبود بخشد [٦]، [٧]، [٨]. یکی از انواع ژئوسنتتیک‌ها ژئوسل[1] است که به‌واسطهٔ ساختار سه‌بعدی[2] و تأمین محصورشدگی [٩] برای خاک داخل سلول‌ها، می‌تواند عملکرد مطلوبی از لحاظ افزایش ظرفیت باربری و سختی و در نتیجه کاهش نشست تودهٔ خاک، در مقایسه با مسلح‌کننده‌های صفحه‌ای[3] (مانند ژئوتکستایل[4] و ژئوگرید[5]) از خود نشان دهد. عملکرد مطلوب ژئوسل به‌عنوان عنصر تسلیح خاک، وابسته به موارد متعددی از جمله مشخصات هندسی ژئوسل [١٠]، [١١]، [١٢]، سختی و مقاومت کششی دیواره‌های ژئوسل [١٣] و نیز جنس و تراکم مصالح پرکنندهٔ سلول‌ها [١٤] در کنار ویژگی‌های بستر زیرین و لایه فوقانی خاک‌مسلح [١٥] است.

پوخارل[6] و همکاران در سال ٢٠١٠ با انجام پژوهش‌های آزمایشگاهی، تأثیر پنج عامل کلیدی (شکل، نوع و عمق قرارگیری ژئوسل، ضخامت ناحیهٔ مسلح‌شده و کیفیت مصالح درون ژئوسل) را در رفتار بسترهای مسلح‌شده با ژئوسل تک‌سلولی تحت بارهای استاتیکی و مقایسهٔ 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 [٩]. مقدس‌تفرشی و داوسون[7] در سال ٢٠١٠ با هدف مقایسهٔ 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[8] در تعداد سیکل‌های بارگذاری- باربرداری کم‌تری اتفاق می‌افتد [١٦]. 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

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 استفاده‌شده 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 شده‌است.

بیان مسئله

یکی از بزرگ‌ترین پروژه‌های لایروبی که در سواحل شمالی خلیج‌فارس در حال انجام است، لایروبی احداثی فاز ۲ و ۳ توسعهٔ بندر شهیدرجایی است. در این پروژه در مجموع، ۱۱/۵ میلیون مترمکعب رسوبات طبیعی ساحل به‌وسیلهٔ لایروب مکنده تیغه‌دار[1] برداشت‌شده و در پس‌کرانه ساحل در مجاورت بخش غربی حوضچه، لایریزی می‌شود. ارتفاع رسوبات دپو 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 هزینهٔ زیاد جابه‌جایی و دفن این مصالح در خارج از محوطه اسکله، انتقال و استفاده مفید[2] از این مصالح لایروبی، بسیار ضروری است. در شکل ۱ موقعیت محل لایروبی لایروبی و لایریزی در بندر شهیدرجایی ایران، مشخص شده‌است.

مصالح حاصل از پروژه لایروبی توسعهٔ بندر شهیدرجایی عمدتاً از ماسه بد دانه‌بندی شده (SPیا 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[3] 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 به‌وسیلهٔ انواع ژئوسنتتیک‌ها، 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

به این‌که مصالح لایروبی بندر، عمدتاً از نوع ماسه‌ای است، از این‌رو، 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 به‌منظور بررسی رفتار بار-نشست ماسه کربناته حاصل از لایروبی مسلح‌شده به‌وسیلهٔ ژئوسل، از مدل فیزیکی شامل صفحه بارگذاری دایره‌ای بر ماسهٔ مسلح و غیرمسلح استفاده شده‌است که تحت بارگذاری تکراری قرار گرفته است. هم‌چنین تأثیر حضور رویه از نوع خاک خوب دانه‌بندی‌شده بر لایه ماسهٔ لایروبی، بررسی شده است.

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

مصالح استفاده شده در تحقیق

مصالح خاکی

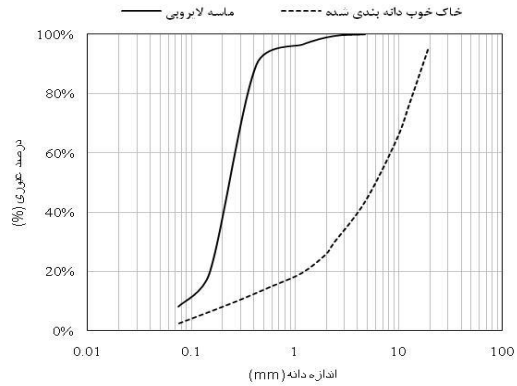
در این پژوهش از دو نوع خاک استفاده شده‌است. نوع اول که بیش‌ترین حجم مصالح خاکی استفاده شده را به‌خود اختصاص می‌دهد، ماسه حاصل از لایروبی بندر شهید رجایی است که در لایه‌های مختلف مدل خاکی از آن استفاده شده‌است. به‌منظور انتخاب مصالح معرف، نمونه‌گیری از ۸ نقطه پهنه لایریزی برای انجام آزمایش دانه‌بندی انجام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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

مستقیم، زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک ماسه‌ای، ۳۳ درجه و میزان چسبندگی آن $۰/۰۸\ kg/cm^2$ به‌دست آمده است و مقدار تودهٔ ویژه[1] آن ۲/۷ است. نوع دوم خاک استفاده شده، شن خوب دانه‌بندی شده است که از معادن اطراف شهر بندرعباس تهیه شده و فقط در لایهٔ بالایی به‌عنوان رویه تودهٔ 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

نام مشخصه	واحد	علامت اختصاری	استاندارد آزمایش	مقدار	
				ماسه لایروبی	شن خوب دانه‌بندی‌شده
طبقه‌بندی متحد	–	USCS	ASTM D6913	SP-SM	GW
ضریب یک‌نواختی	-	C_u	ASTM D422	۳/۱	۲۹/۹
ضریب انحناء منحنی دانه‌بندی	-	C_c		۱/۲	۲/۵۸
اندازهٔ متوسط دانه‌ها	mm	D_{50}		۰/۲۳	۵/۸۷
وزن مخصوص خشک حداقل	kN/m^3	$\gamma_{d\,min}$	ASTM D4254	۱۵	۱۸
وزن مخصوص خشک حداکثر	kN/m^3	$\gamma_{d\,max}$	ASTM D4253	۱۷/٦	۲۳/۱
حد روانی	%	LL	ASTM D4318	N.V	N.V
شاخص خمیری	%	PI		N.PI	N.PI

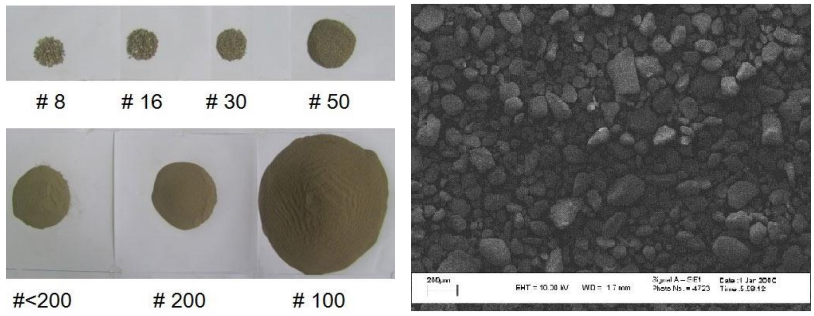


شکل ۲. نمودار دانه‌بندی مصالح خاکی

1. Gs

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

برای تعیین جنس ماسه لایروبی شده، آزمایش طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس[1] در بخش معدن دانشگاه تهران انجام شده‌است که بر اساس آن، ۵۵/۸ درصد از این ماسه را ترکیبات کربناته تشکیل می‌دهد که شامل ٤٨/٥ درصد کلسیت، و ۷/۳ درصد دولومیت است. همچنین ۱۰/۷ درصد از ماسه را آنورتیت و ۱۸/۱ درصد را کوارتز تشکیل داده است. یکی از عوامل تاثیرگذار بر رفتار مقاومتی خاک‌های کربناته میزان خردشدگی مصالح است [۲۱،۲۰]. ۸۰ درصد ماسه کربناته مورد استفاده در این تحقیق، مانده روی الک شماره ۱۰۰ و ۲۰۰ است. لذا به دلیل ریزدانه بودن آن، میزان خردشدگی تحت بارهای اعمالی قابل توجه نیست و تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار مکانیکی خاک مسلح ندارد. این موضوع از طریق بررسی دانه‌بندی خاک، قبل و بعد از انجام تراکم لایه‌های خاکی در آزمون‌ها تایید شده است. شکل ۳ تصویر ماسه لایروبی‌شده به همراه بخش‌های تشکیل‌دهنده آن و جدول ۲ آنالیز عنصری هر دو نوع خاک مورد استفاده در این تحقیق که با استفاده از روش طیف‌نگاری فلوئورسانس اشعه ایکس[2] در کارخانه سیمان هرمزگان انجام شده است، را ارائه می‌دهد.



شکل ۳. ماسه لایروبی. راست) تصویر میکروسکوپ الکترونیک. چپ) نسبت دانه‌ها

جدول ۲. آنالیز عنصری خاک به روش طیف‌نگاری فلوئورسانس اشعه ایکس

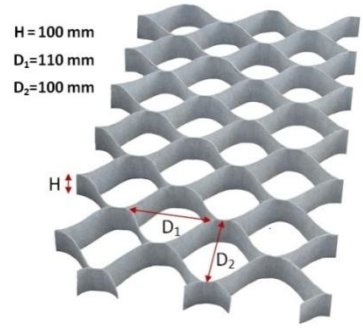
نوع خاک	Na_2O	MgO	Al_2O_3	Si_2O	SO_3	Cl	K_2O	CaO	Fe_2O_3
ماسه لایروبی	۰/٦٤	۳/۲۱	۳/۳	۱۳/٦۸	۰/۳۳	۰/٦۰۳	۰/٦٤	۳۷/۰٦	۲/۳٦
شن خوب دانه-بندی‌شده	۰/۳۳	۹/۰۸	۱/٦٦	۱٥/۳۲	۰/۲۹	۰/۰٥۸	۰/۲۹	۳٦/٦۹	۱/٥٥

1. X-ray powder diffraction (XRD)
2. X-ray fluorescence(XRF)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

ژئوسل

به‌منظور تسلیح ماسه، از ژئوسل محصول شرکت دوپونت[1] استفاده شده‌است که مشابه آن در تحقیقات پژوهش‌گران مختلفی از جمله مقدس‌تفرشی و داوسون در سال ۲۰۱۰ و توکلی و همکاران در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ استفاده شده است [۱٦]، [۲۲]، [۲۳]، [۲٤]. در تمامی آزمون‌ها ابعاد چشمه‌های ژئوسل‌ها، ۱۰cm × ۱۱cm با ارتفاع ۱۰cm است. در شکل ٤ تصویر شماتیک از ژئوسل استفاده شده به‌همراه مشخصات هندسی آن ارائه شده‌است.



شکل ٤. مشخصات هندسی ژئوسل‌های استفاده شده

این ژئوسل‌ها از ژئوتکستایل بافته نشده با اتصالات حرارتی[2] از جنس پلی‌پروپیلن[3] با مشخصات فنی ارائه‌شده در جدول ۳، ساخته شده‌اند و دارای چشمه‌های لانه‌زنبوری[4] هستند.

جدول ۳. مشخصات ژئوسل استفاده شده در این تحقیق [۲٤]

مشخصات	واحد	مقادیر
نوع ژئوتکستایل	–	نابافته ذوبی حرارتی
وزن در هر مترمربع		۲۹۰
ضخامت تحت بار ۲ $\frac{kN}{m^2}$	(mm)	۰/۷۵
ضخامت تحت بار ۲۰۰ $\frac{kN}{m^2}$	(mm)	۰/٦۲
مقاومت کششی	($\frac{kN}{m}$)	۲۱/۳۰
مقاومت در کرنش ۵٪	($\frac{kN}{m}$)	۹/۳۰

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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

مدل فیزیکی و نحوهٔ انجام آزمایش

آماده‌سازی نمونه‌های خاکی

برای ساخت مدل خاکی، لایه ماسهٔ لایروبی غیرمسلح (UDS[1]) به‌تدریج 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 دانه‌بندی‌شده ادامه پیدا کرده است. لازم به ذکر است که برای متراکم کردن همهٔ لایه‌های خاکی از کوبهٔ دستی به ابعاد ۱۰×۱۰ سانتی‌متر و وزن ۸ کیلوگرم استفاده شده است. در حالت مسلح، به‌منظور عملکرد مناسب ژئوسل به‌عنوان مسلح‌کننده، لایهٔ ماسه‌ای زیرین ژئوسل باید دارای تراکم مناسب باشد [۲۵]. از این‌رو،، پس از تراز کردن سطح فوقانی لایهٔ UDS، برای اجرای لایه خاک‌مسلح (RLS[2])، ژئوسل روی بستر ماسه‌ای پهن‌شده و موقعیت آن به‌کمک میله‌های نگه‌دارنده تعیین و ثابت شده است. سپس سلول‌های مسلح‌کننده با شرایط تراکمی کاملاً کنترل شده (کنترل وزن و حجم خاک)، با ماسهٔ لایروبی پر و متراکم شده است. در پایان، بسته به برنامه آزمایش، یک لایه ماسهٔ لایروبی یا خاک خوب دانه‌بندی‌شده (ULS[3]) با ضخامت ۵ سانتی‌متر به‌عنوان 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 کمانش دیواره‌های آن مؤثر است [۲٦]. پژوهش‌گران زیادی به بررسی و تعیین مقدار بهینهٔ ضخامت لایه رویه پرداخته‌اند. تالاک[4] 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 لایهٔ 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. نحوهٔ چیدمان

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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

لایه‌ها با توجه به نوع آزمایش، در جدول ٤ ارائه شده است. در این جدول، نام آزمون با توجه به حالت مسلح (GR) و غیرمسلح (UR) و هم‌چنین حضور رویهٔ ۵ سانتی‌متری از جنس ماسه لایروبی (S) و شن خوب دانه‌بندی‌شده (W) انتخاب شده‌است.

جدول ٤. نحوهٔ چیدمان لایه‌ها با توجه به نوع آزمایش

ردیف	نام آزمون	توصیف لایه‌های مدل خاکی
۱	UR-S5*	٦۵cm ماسه لایروبی غیرمسلح
۲	GR-S5	۵۰cm ماسهٔ لایروبی + ۱۰cm ژئوسل + ۵cm ماسه لایروبی
۳	UR-W5	٦۰cm ماسهٔ لایروبی غیرمسلح + ۵cm شن خوب دانه‌بندی‌شده
٤	GR-W5	۵۰cm ماسهٔ لایروبی + ۱۰cm ژئوسل + ۵cm شن خوب دانه‌بندی‌شده

*برای کنترل تکرارپذیری نتایج، آزمایش مذکور تکرار شده است.

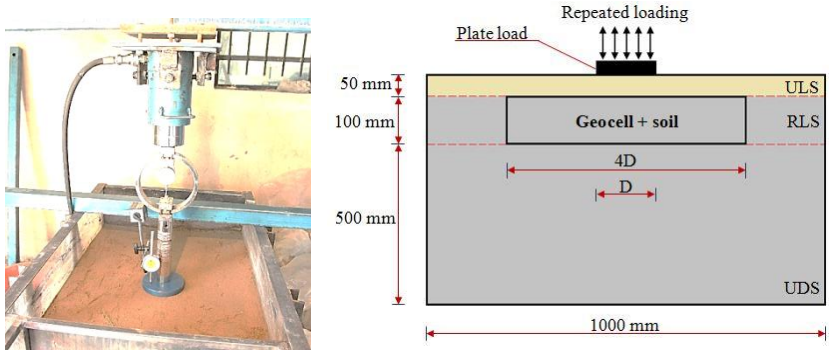
ساختار و اجزای دستگاه آزمایش

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 جابه‌جایی‌سنج و نیروسنج است [۲۷] . بارگذاری قائم به‌وسیلهٔ جک هیدرولیکی دستی با ظرفیت ۲۰ تن، متکی بر تیر عکس‌العمل انجام شده است. جعبهٔ 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 ورقهٔ پلکسی ساخته شده‌اند و به‌وسیلهٔ 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 انجام‌شده تا از اثر مقیاس مدل سطح تماس چرخ با سطح زمین تا حد ممکن کاسته شود. در این راستا، پژوهش‌گران مختلفی از صفحهٔ دایره‌ای‌شکل برای مدل‌سازی بارگذاری ترافیکی استفاده کرده‌اند

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]



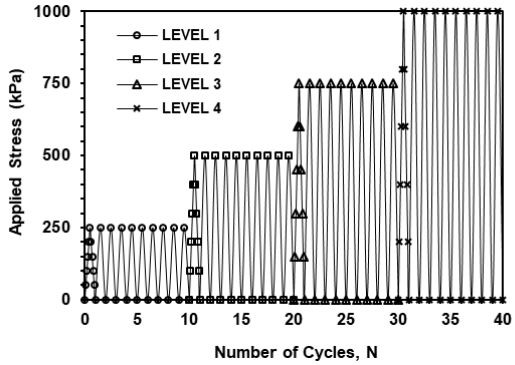
شکل ۵. ابعاد کلی مدل آزمایشگاهی، موقعیت قرارگیری لایه‌های خاکریزی و صفحه بارگذاری

داس و عمر[1] در سال ۱۹۹٤ 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[2] 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 اندازهٔ $D_{۵۰}$ خاک تأثیر چندانی بر نشست صفحه ندارد [۲۹]. در این پژوهش $D_{۵۰}$ برابر با ۰/۲۱۹ میلی‌متر است. آرنولد در سال ۲۰۰٤ 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]. خلج و همکاران در سال ۲۰۱۵ به‌منظور مدل کردن بار کامیون سنگین در حالت پر از بار و کامیون بدون بار، به‌ترتیب نیروی ۸۰۰ و ٤۰۰ 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

بحرانی‌ترین حالت بارگذاری ناشی از چرخ وسایل نقلیه زمانی رخ می‌دهد که ابتدا بار در چندمرحله به شکل ایستایی اعمال و سپس بار حداکثر به‌صورت تکراری (بارگذاری، باربرداری) وارد شود [۲٤]. از این‌رو در پژوهش حاضر برای جلوگیری از اعمال شوک به سیستم خاک و رخداد گسیختگی ناگهانی، در سیکل اول بارگذاری، ابتدا بار ایستایی در پنج مرحله به‌صورت افزایشی وارد شده و در پنج مرحله باربرداری می‌شود و پس از آن آزمایش با بارگذاری تکراری ادامه می‌یابد. فرآیند بارگذاری تکراری در شکل ٦ ارائه شده است. بارگذاری موردنظر شامل چهار سطح بارگذاری است که هر سطح بارگذاری شامل ۱۰ سیکل و هر سیکل در زمان ٦ دقیقه تداوم دارد (بارگذاری ۳ دقیقه و باربرداری ۳ دقیقه). مطابق با یافته‌های مقدس‌تفرشی و داوسون، بخش زیادی از نشست خاک (۳۵ تا ٦۰ درصد) تحت این‌گونه بارگذاری‌ها در ۱۰ سیکل اول صورت می‌گیرد [۳۳]. در مراحل مختلف، نشست صفحه بارگذاری و مقادیر بار اعمالی از طریق گیج‌های مکانیکی جابه‌جایی‌سنج و نیروسنج، خوانده می‌شود. هر آزمایش زمانی تمام می‌شود که سطح بارگذاری به ۱۰۰۰ کیلوپاسکال (سطح چهارم) رسیده یا خاک گسیخته شود.



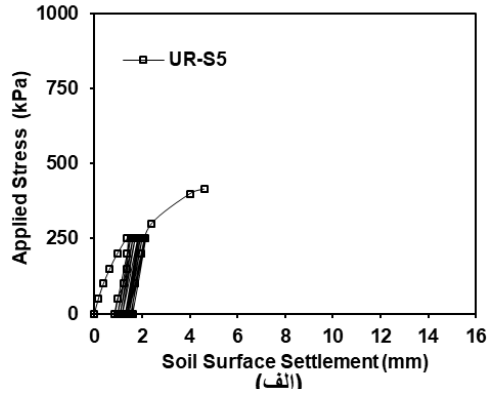
شکل ٦. روند بارگذاری تکراری استفاده شده

نتایج آزمون‌ها و تفسیر آن‌ها

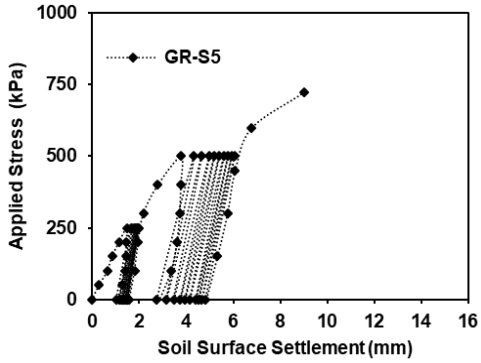
به‌منظور مقایسه و تحلیل رفتار بار-نشست خاک غیرمسلح و خاک مسلح‌شده با ژئوسل و هم‌چنین تأثیر رویهٔ شنی تحت بارگذاری تکراری، ابتدا نتایج در شکل‌های ۷ تا ۱۰ ارائه و سپس در سه بخش اثر ژئوسل، اثر رویه و اثر هم‌زمان رویه و ژئوسل بررسی شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

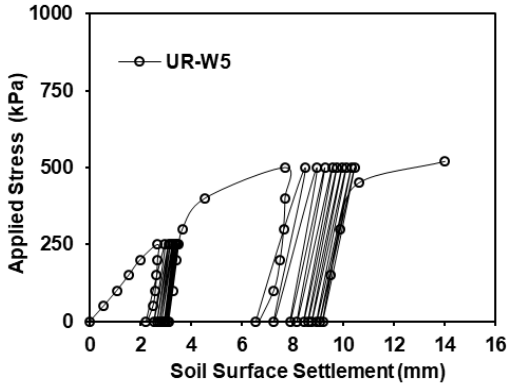
در شکل ۷ نمودارهای بار-نشست در چهار حالت غیرمسلح و مسلح‌شده با ژئوسل، برای دو رویهٔ شنی و ماسه‌ای بررسی شده‌است.



(الف)

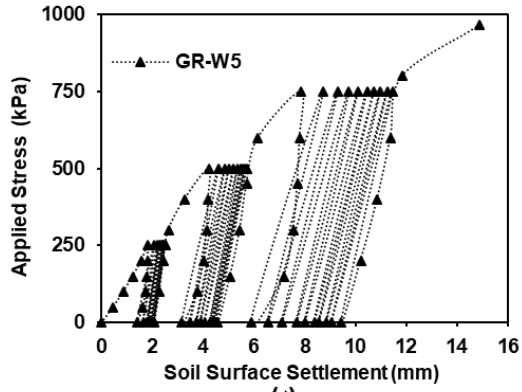


(ب)



(ج)

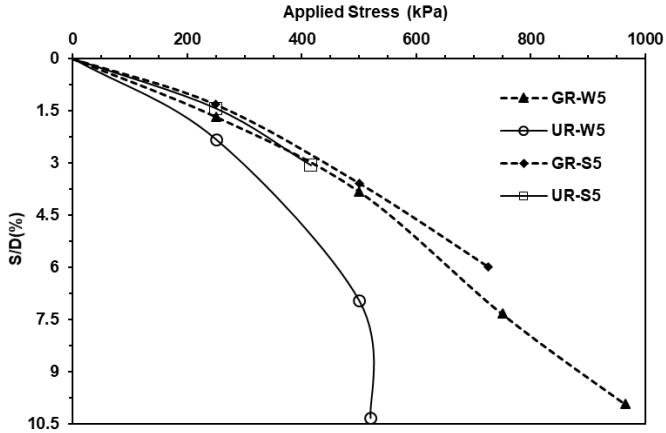
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]



(د)

شکل ۷. نمودار بار- نشست ماسه لایروبی، الف) خاک غیرمسلح با رویهٔ ماسه‌ای، ب) خاک مسلح با رویهٔ ماسه‌ای، ج) خاک غیرمسلح با رویهٔ شنی، د) خاک مسلح با رویهٔ شنی

برای ارزیابی بهتر نتایج نمودارهای ارائه شده در شکل ۷ و مقایسهٔ 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، ٦ و ۹ درصد) و ظرفیت باربری و نشست متناظر با گسیختگی سیستم، در جدول ۵ ارائه شده است.



شکل ۸. میزان بار برحسب S/D، متناظر با سیکل آخر هر سطح بارگذاری برای ماسه لایروبی غیرمسلح و مسلح‌شده با ژئوسل با رویهٔ شنی و رویهٔ ماسه‌ای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

جدول ۵. میزان باربری متناظر با نشست های مختلف خاک

نام آزمون	GR-S5	UR-S5	UR-W5	GR-W5
میزان باربری در ٪S/D=۱/۵ (کیلوپاسکال)	۲۷۵	۲۵۷	۱۷۵	۲۲۵
میزان باربری در ٪S/D=۳ (کیلوپاسکال)	٤۳۵	٤۱۰	۳۰۰	٤۲۰
میزان باربری در ٪S/D=٦ (کیلوپاسکال)	۷۲۵	-	٤٦۲	٦۵۵
میزان باربری در ٪S/D=۹ (کیلوپاسکال)	-	-	۵۲۵	۸۸۰
میزان باربری متناظر با گسیختگی (کیلوپاسکال)	۷۲۵	٤۱٦	۵۲۰	۹٦۵
نشست کل متناظر با گسیختگی (میلی‌متر)	۹	٤/٦	۱۵/۵۰	۱٤/۹۰
نشست پلاستیک تقریبی متناظر با گسیختگی (میلی‌متر)	۷	۳/۵	۱۲/۵	۱۲

برای مقایسهٔ دقیق‌تر عملکرد نوع خاک لایهٔ رویه و ژئوسل، از نسبت ظرفیت باربری[1] (BCR) [۳٤] استفاده شده است. BCR در این پژوهش عبارت است از نسبت ظرفیت باربری نهایی در حالت‌های مختلف خاک مسلح یا به‌سازی‌شده با رویهٔ شنی به خاک غیرمسلح یا به‌سازی نشده که در رابطهٔ ۱ معرفی شده است. برای تعیین ظرفیت باربری نهایی خاک، به‌دلیل این‌که میزان نشست‌های رخ‌داده کم‌تر از یک چهارم قطر صفحه بارگذاری است، بار نهایی صفحه به‌عنوان ظرفیت باربری نهایی در نظر گرفته شده است [۳۵]. با توجه به این‌که از یک سو میزان باربری برای S/Dهای بزرگ‌تر از ۳ درصد برای تمامی حالت‌ها وجود ندارد و از سوی دیگر در سطوح کرنش اندک، نقش ژئوسل در بهبود ظرفیت باربری کم‌تر است، از این‌رو، صرفا BCRهای متناظر با لحظه گسیختگی که عملکرد ژئوسل در آن مشخص‌تر است، در شکل ۹ ارائه شده است.

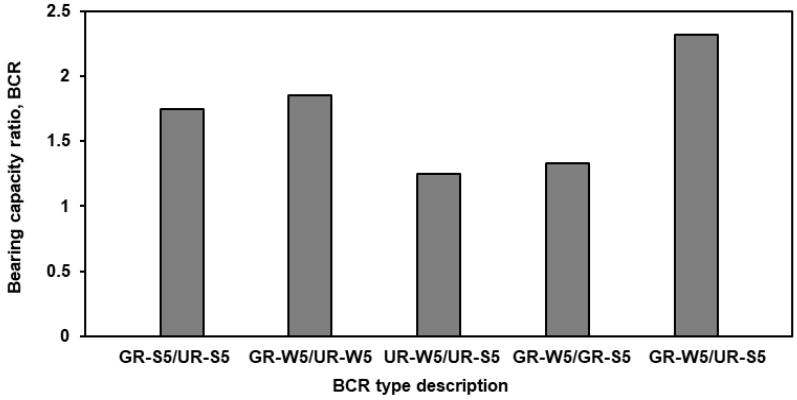
$$BCR = \frac{\left(Bearing\ Capacity\right)_{improved}}{\left(Bearing\ Capacity\right)_{unimproved}} \qquad (۱)$$

برای بررسی نشست‌های پلاستیک متناظر با سیکل‌های بارگذاری، نمودار شکل ۱۰ متناظر با چهار سطح بارگذاری[2] (مراجعه شود به شکل ٦) ارائه شده است. در این نمودار،

1. Bearing Capacity Ratio
2. loading level

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

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



شکل ۹. نسبت ظرفیت باربری در حالت‌های مختلف

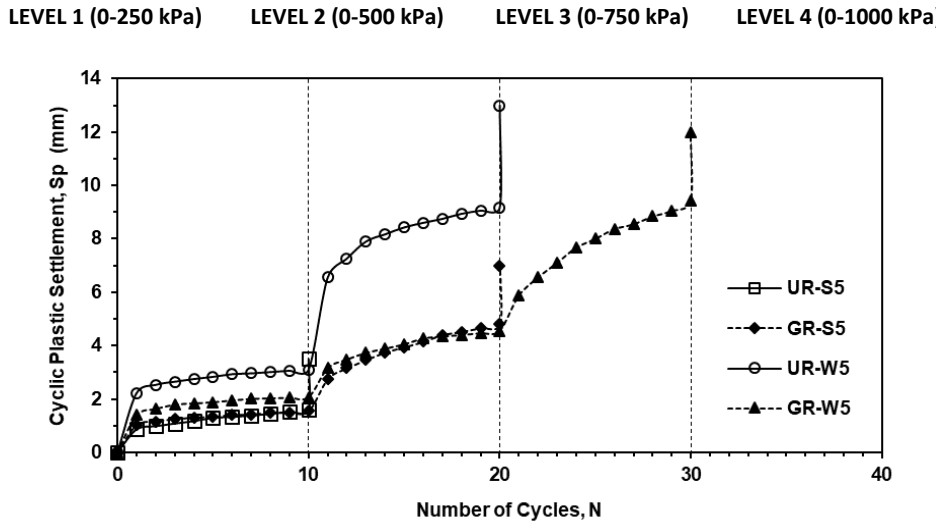
اثر تسلیح

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 رویهٔ شنی و ماسه‌ای افزایش یافته است. در حالتی که از رویهٔ ماسه‌ای استفاده شده، ظرفیت باربری با حدود ۷۰ درصد افزایش، از مقدار ٤١٦ کیلوپاسکال (مابین سطوح اول و دوم بارگذاری) به ۷۲۵ کیلوپاسکال (مابین سطوح دوم و سوم بارگذاری) ارتقا یافته است. در حالتی که از رویهٔ شنی استفاده شده، ظرفیت باربری با حدود ۸۰ درصد افزایش، از مقدار ۵۲۰ به ۹٦۰ کیلوپاسکال رسیده و نشان‌دهندهٔ آن است که نقش ژئوسل در تسلیح، در حالت رویهٔ شنی در مقایسه با رویهٔ ماسه‌ای اندکی بیش‌تر است.

مطابق با نمودار ارائه شده در شکل ۱۰ در سطح اول بارگذاری برای رویهٔ 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

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].



شکل ۱۰. مقایسهٔ نشست پلاستیک خاک غیرمسلح و خاک مسلح‌شده با ژئوسل با رویه‌های شنی و ماسه‌ای

اثر رویه

مطابق شکل ۸ و جدول ۵ در حالت غیرمسلح، استفاده از شن خوب‌دانه‌بندی شده به‌جای ماسهٔ لایروبی در لایهٔ رویه، سبب ۲۵ درصد افزایش (٤١٦ به ۵۲۰ کیلوپاسکال) در ظرفیت باربری شده است. هم‌چنین در حالت مسلح، استفاده از شن خوب دانه‌بندی‌شده در لایهٔ رویه به‌جای ماسه لایروبی، موجب افزایش نقش ژئوسل در بالارفتن ظرفیت باربری و کاهش نشست خاک، در همهٔ سطوح بارگذاری شده است. میزان افزایش ظرفیت باربری در این حالت حدود ۳۰ درصد (۷۲۵ به ۹٦۰ کیلوپاسکال) و کاهش نشست‌های پلاستیک، ۳۰ تا ۵۰ درصد در سطوح بارگذاری اول و دوم است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

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 ماسهٔ 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 به‌حالت غیرمسلح، ظرفیت باربری سیستم را بهبود بخشیده است. این موضوع می‌تواند به‌دلیل نشست ماسهٔ لایهٔ 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[1] 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 لایهٔ پوشش در لایه‌های زیرین می‌شود [۲٦]. این مطلب اهمیت نوع خاک به‌کاررفته در لایهٔ رویه را در بازده ژئوسل برای بهبود رفتار خاک‌مسلح، روشن می‌سازد.

اثر هم‌زمان رویه و تسلیح

مطابق شکل‌های ۸ و ۱۰ و جدول ۵، تسلیح هم‌زمان ماسه لایروبی با ژئوسل و رویهٔ شنی، موجب افزایش حدود ۲/۳ برابری میزان باربری خاک شده است. میزان ظرفیت باربری از ٤۱٦ (مابین سطوح اول و دوم بارگذاری) به ۹٦۰ کیلوپاسکال (مابین سطوح سوم و چهارم بارگذاری) و تعداد سیکل‌های بارگذاری از ۱۰ به ۳۰ سیکل افزایش یافته است. مقایسهٔ نمودار ماسهٔ لایروبی مسلح با رویه ماسه‌ای (GR-S5)، با نمودار ماسهٔ لایروبی غیرمسلح با رویهٔ شنی (UR-W5)، نشان می‌دهد که استفاده از خاک خوب دانه‌بندی‌شده به‌عنوان لایه خاکریز فوقانی، به اندازهٔ تسلیح با ژئوسل به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر، در کاهش نشست‌های پلاستیک ماسهٔ لایروبی مؤثر نیست. هرچند عملکرد دو حالت مذکور در کنترل تعداد

1. Mitchell

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

سیکل‌های موردنیاز برای گسیختگی خاک، تقریباً مشابه است ولی ظرفیت باربری نمونه مسلح حدود ٤٠ 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 لایهٔ رویه پرداخته شد و نتایج نشان داد که:

۱. برای استفاده از ماسهٔ لایروبی در لایه‌های زیرین خاکریز محوطه‌ها و جاده‌های دسترسی بندر شهید رجایی می‌توان از ژئوسل برای تسلیح آن به‌همراه شن خوب دانه‌بندی‌شده در لایهٔ فوقانی خاک مسلح استفاده کرد. استفادهٔ هم‌زمان از خاک خوب دانه‌بندی شده در لایهٔ رویه (به‌ضخامت ۵ سانتی‌متر) در کنار مسلح‌سازی ماسه لایروبی با ژئوسل (به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر) منجر به افزایش تقریباً ۲/۳ برابری ظرفیت باربری شده است. در این حالت ظرفیت باربری خاک برای صفحهٔ بارگذاری به قطر ۱۵ سانتی‌متر از ٤١٦ به ۹٦٠ کیلوپاسکال افزایش یافته است.

۲. استفاده از ژئوسل برای تسلیح ماسهٔ 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 ۱/۷ تا ۱/۸ برابر نسبت به حالت غیرمسلح کرده است. میزان این افزایش در حالت استفاده از رویهٔ شنی، حدود ۱۰ درصد در مقایسه با رویهٔ ماسه‌ای، بیش‌تر است.

۳. در حالت غیرمسلح، استفاده از ۵ سانتی‌متر شن خوب دانه‌بندی‌شده در لایهٔ 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.

٤. در حالت مسلح، استفاده از ۵ سانتی‌متر شن خوب دانه‌بندی شده در لایهٔ رویه، باعث افزایش میزان بازده 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.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

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 ماسهٔ کربناتی حدود ۱۰ سیکل (یک سطح بارگذاری) افزایش پیدا کند.

٦. در حالتی که لایهٔ 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 لایهٔ 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",

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

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.,

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

"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.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

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)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.2.5]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.237]

(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 pratice" (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.