

چکیده

در پژوهش حاضر، با هدف مطالعه تأثیر فرکانس بر نشست و باربری خاک دانه‌ای مسلح به ژئوگرید، سیستم آزمایشگاهی جدیدی طراحی و ساخته شده که قادر به انجام آزمایش بارگذاری صفحه به صورت استاتیکی و تناوبی و اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر نیروی وارد به صفحه، نشست صفحه بارگذاری، فشار زیر صفحه^۱ بارگذاری و کرنش محوری ژئوگرید^۲ باشد. سپس توده خاک با روش بارش ماسه^۳ آماده شده و با تک‌لایه ژئوگرید در موقعیت بهینه مسلح شده است. در نهایت، یک آزمایش بارگذاری صفحه^۴ استاتیکی و سه آزمایش بارگذاری صفحه تناوبی با فرکانس‌های ۱، ۲ و ۴ هرترز صورت گرفته است و با مقایسه نتایج مشخص شده که با افزایش فرکانس بارگذاری و نزدیک شدن مقدار آن به فرکانس طبیعی سیستم، نشست تناوبی افزایش می‌یابد ولی تأثیر آن به دلیل افزایش تراکم خاک به تدریج کاهش می‌یابد. همچنین، بارگذاری تناوبی^۵ باعث ایجاد نشست‌های ماندگار در توده خاک شده و مسلح‌سازی خاک نتوانسته مانع وقوع چنین نشست‌هایی حتی بعد از هزار چرخه بارگذاری شود. بارگذاری تناوبی باعث افزایش تراکم و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری نسبت به حالت استاتیکی می‌شود ولی تغییرات فرکانس تأثیری بر ظرفیت باربری پس تناوبی^۶ ندارد. ضمن اینکه فرکانس بارگذاری تأثیری بر توزیع فشار زیر شالوده و کرنش لایه ژئوگرید نیز نداشته است.

واژگان کلیدی: آزمایش بارگذاری صفحه تناوبی، خاک مسلح، فرکانس بارگذاری، ظرفیت باربری، نشست.

بررسی اثر فرکانس بارگذاری بر نشست و ظرفیت باربری خاک دانه‌ای مسلح به ژئوگرید

عبداله تبرئی

دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی عمران، تهران، ایران

سعید ابریشمی (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران، s.abrishami@um.ac.ir

سید احسان سیدی حسینی نیا

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

نوید گنجیان

استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی عمران، تهران، ایران

۱- مقدمه

شرایط بارگذاری برخوردار نیستند. در نتیجه مهندسان ژئوتکنیک با چالش طراحی و ساخت پی مناسب جهت تأمین محدودیت‌های باربری و نشست به‌خصوص برای شرایط بارگذاری دینامیکی و تناوبی مواجه شده‌اند و بهسازی خاک به صورت مسلح‌سازی توسط المان‌هایی نظیر ژئوگرید که قابلیت تحمل کشش را دارند به عنوان یک راهکار مطرح نموده‌اند.

پیوری و همکاران [۱] و شین و همکاران [۲] با انجام آزمایش‌هایی بر روی شالوده مربعی با ابعاد ۷۶/۲ میلی‌متر و همچنین دس و شین [۳] با انجام آزمایش‌های مشابهی بر روی شالوده نواری به عرض ۷۶/۲ میلی‌متر، به بررسی نشست ماندگار^۷ خاک ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح به ژئوگرید تحت بارگذاری

توده خاک در موارد متعددی تحت بارگذاری‌های دینامیکی و تناوبی قرار می‌گیرد که از آن جمله می‌توان به زلزله، بار ناشی از ترافیک و ارتعاش ناشی از ماشین‌آلات اشاره نمود. ماهیت متفاوت بارهای دینامیکی باعث عملکرد متفاوت توده خاک در مقایسه با شرایط استاتیکی می‌شود. به عنوان مثال، چرخه‌های متعدد بارگذاری و باربرداری باعث ایجاد کرنش‌های برگشت‌ناپذیر و نشست‌های ماندگار در پی می‌شود که می‌تواند بهره‌برداری از سازه را مختل سازد یا سبب گسیختگی گردد. به‌خصوص که پیشرفت‌های صورت گرفته در صنعت و فناوری باعث افزایش شدت بارهای وارده شده است. لذا در بسیاری از موارد، دستگاه‌های موجود از باربری مناسبی در مقایسه با

مسلح به ژئوگرید نداشته است. او علت آن را فاصله فرکانس بارگذاری با فرکانس طبیعی سیستم بیان کرد. مرور متون فنی گذشته نشان می‌دهد که اکثر مطالعات صورت گرفته در خصوص بررسی عملکرد توده خاک مسلح تحت بار تناوبی قائم، مربوط به شالوده‌های نواری و با مقیاس کوچک بوده، در حالی که اولاً در بسیاری از سازه‌ها مانند برج‌های خنک‌کننده، ایستگاه‌های رادار، مخازن ذخیره نفت، برج‌های تلویزیون و چرخ و فلک شهر بازی‌ها از شالوده منفرد دایره‌ای استفاده می‌شود، ثانیاً نتایج آزمایش‌های کوچک مقیاس با توجه به اهمیت سطح تنش و اثرات مقیاس، قابل تعمیم نیست و ثالثاً طبق استاندارد ASTM D1194 [۸]، آزمایش بارگذاری صفحه‌ای به ابعاد حداقل ۳۰۰ میلی‌متر یک روش استاندارد جهت تخمین سختی و باربری زمین است. از طرفی، اکثر تحقیقات پیشین با فرکانس حداکثر یک هرتز و تعداد چرخه‌های حداکثر صد بوده، در حالی که غالباً فرکانس‌های بارگذاری بالاتر است (نظیر فرکانس بارگذاری ماشین‌آلات) و در طول عمر بهره‌برداری از سازه، تعداد چرخه‌های بسیار بیشتری به شالوده اعمال می‌شود. ضمن اینکه در هیچ‌یک از تحقیقات پیشین به مطالعه ظرفیت باربری پس تناوبی پرداخته نشده است. لذا در پژوهش حاضر به مطالعه رفتار خاک دانه‌ای مسلح به ژئوگرید تحت آزمایش بارگذاری صفحه تناوبی پرداخته شده است. بدین منظور یک سیستم آزمایشگاهی توسعه یافته‌ای طراحی و ساخته شده تا بتواند سربارهای استاتیکی و تناوبی را با دامنه فرکانس مشخص به شالوده دایره‌ای اعمال نماید.

۲- سیستم آزمایشگاهی

شکل (۱) مقطعی از مسئله که یک صفحه دایره‌ای به قطر D_p ، نیروی قائم محوری Q را بر سطح توده خاک مسلح به یک لایه ژئوگرید به قطر D_g وارد می‌کند، نشان می‌دهد.

سیستم آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده در پژوهش حاضر از شش بخش صفحه بارگذاری، مخزن آزمایش، سیستم بارش ماسه، قاب بارگذاری، سیستم بارگذاری و سیستم ابزار دقیق و پایش که

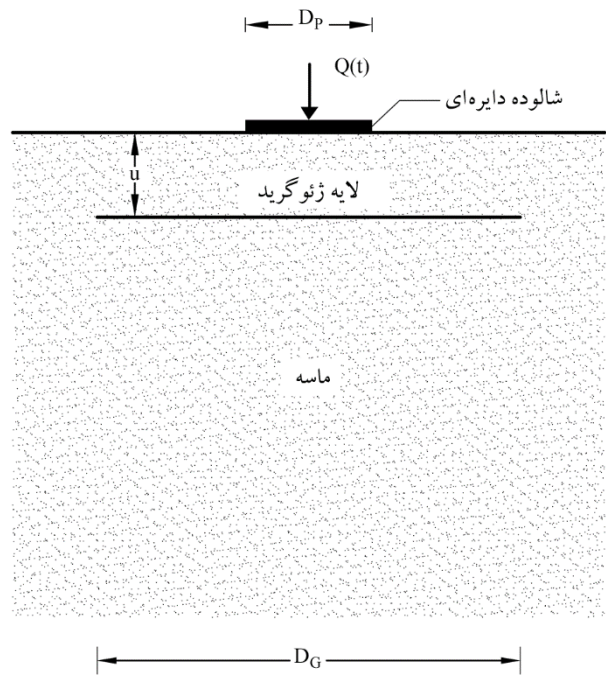
تناوبی پرداختند. در این سه مطالعه، ابتدا سربار استاتیکی و سپس سربار تناوبی به صورت پله‌ای شکل و با فرکانس یک هرتز با دامنه مشخص به شالوده اعمال شد. نتایج این مطالعات نشان داد که اولاً تکنیک تسلیح خاک سبب کاهش قابل ملاحظه نشست تناوبی شالوده در سربارهای برابر با حالت غیرمسلح می‌شود و ثانیاً به ازای یک مقدار بار استاتیکی و تعداد چرخه بارگذاری - باربرداری معین، با افزایش سربار تناوبی، نشست تناوبی شالوده مربعی افزایش می‌یابد. ال سواف و نظیر [۴] با انجام آزمایش‌های کوچک مقیاس بر روی شالوده مستطیلی به عرض ۸۰ میلی‌متر واقع بر ماسه مسلح به ژئوگرید، به بررسی اثر بارگذاری تکرار شونده بر ظرفیت باربری و نشست خاک پرداختند و دریافتند که برای یک نسبت سربار و تعداد چرخه بارگذاری - باربرداری معین، با افزایش تراکم نسبی خاک، ظرفیت باربری افزایش و نشست تحت بارگذاری تناوبی کاهش می‌یابد. مقدس تفرشی و داوسن [۵] با انجام آزمایش‌های کوچک مقیاس بر روی شالوده نواری به عرض ۷۵ میلی‌متر واقع بر ماسه مسلح به ژئوسل، به بررسی نشست خاک تحت بارگذاری تناوبی پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که به ازای یک دامنه‌ی بار تکرار شونده‌ی مشخص، با افزایش ضخامت ژئوسل، نشست شالوده کاهش می‌یابد ولی با کاهش شدت بار تکرار شونده، مزایای استفاده از ژئوسل با ضخامت بیشتر کاهش می‌یابد. همچنین، قسمت عمده نشست در ۱۰ چرخه ابتدایی بارگذاری ایجاد می‌شود.

هوتی و همکاران [۶] با انجام آزمایش‌هایی مشابه بر روی شالوده مربعی به ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر واقع بر ماسه مسلح به ژئوگرید، به بررسی اثر بارگذاری تناوبی بر رفتار خاک زیر شالوده پرداختند و دریافتند که با افزایش تراکم نسبی خاک، اصطکاک بین ماسه و ژئوگرید افزایش یافته که این امر سبب بهبود عملکرد شالوده و جلوگیری از گسیختگی برشی خاک زیر شالوده می‌گردد.

ابریشمی [۷] با انجام آزمایش‌های تناوبی بر روی شالوده نواری واقع بر خاک مسلح^۸ با فرکانس بارگذاری زیر یک هرتز نشان داد، تغییرات فرکانس بارگذاری در محدوده‌ی کوچک‌تر از یک هرتز اثر قابل توجه و آشکاری بر رفتار توده خاک دانه‌ای



شکل (۲): نمای مقابل سیستم آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده به همراه ضمايم و ملحقات آن.



شکل (۱): مقطع مسئله بارگذاری صفحه دایره‌ای واقع بر خاک مسلح به ژئوگرید.

مخزن آزمایش، سیستم بارش پرده‌ای متحرک به همراه مخزن ذخیره خاک طراحی و ساخته شده است. جزئیات بیشتر این سیستم بارش در تیرئو و همکاران [۱۰] ارائه شده است. پس از ارزیابی عملکرد این سیستم و اثبات همگن بودن توده خاک باریده شده و تکرارپذیری نتیجه بارش، ارتفاع و شدت بارش به گونه‌ای انتخاب شده که با کمترین زمان، دانسیته نسبی مورد نظر به دست آید.

جهت تأمین عکس‌العمل بار قائم اعمالی، از قالب بارگذاری استفاده شده است. این قالب که از دو ستون قائم با مشخصات پروفیل فولادی IPB320 به ارتفاع ۲۵۰۰ میلی‌متر و یک تیر افقی با مشخصات پروفیل فولادی IPB500 به طول ۲۰۶۰ میلی‌متر تشکیل شده، برای اعمال بار ۵۰ تن طراحی و ساخته شده و لذا در محدوده سربارهای اعمالی در این پژوهش به صورت کاملاً صلب عمل نموده است.

سیستم بارگذاری هیدرولیکی شامل بخش نرم‌افزاری جهت کنترل مجموعه و بخش‌های سخت‌افزاری جهت اعمال بار، به گونه‌ای طراحی و ساخته شده که قادر به اعمال هم‌زمان سربار استاتیکی و تناوبی باشد [۹]. بارگذاری اعمالی توسط این سیستم مطابق شکل (۳) از سه مرحله تشکیل شده است:

۱- بارگذاری استاتیکی به صورت کنترل نیرو و تا مقدار تعیین شده Q_{static}

در شکل (۲) نشان داده شده، تشکیل شده است. صفحه بارگذاری به صورت دایره‌ای شکل با قطر ۳۰۰ میلی‌متر، از دو صفحه آلومینیومی به ضخامت ۳۰ میلی‌متر ساخته شده است. ضخامت صفحات جهت تأمین صلیبت شالوده انتخاب شده است و علت استفاده از دو صفحه با فاصله ۱۲۰ میلی‌متر، قرارگیری حس‌گرهایی جهت اندازه‌گیری فشار خاک زیر صفحه تحتانی بوده است. به منظور اتصال دو صفحه و انتقال بار از صفحه فوقانی به تحتانی، از پنج عدد پایه استفاده شده است. همچنین، کف صفحه تحتانی با چسباندن یک لایه بسیار نازک مصالح ماسه‌ای با چسب اپوکسی کاملاً زیر گردیده است. با توجه به شکل دایره‌ای صفحه بارگذاری، مخزن آزمایش به صورت استوانه‌ای شکل و به گونه‌ای طراحی و ساخته شده که با توجه به فشارهای وارده، شرایط مخزن صلب را برآورده نماید. بر اساس تیرئو [۹] قطر مخزن ۱۴۰۰ و ارتفاع آن ۹۰۰ میلی‌متر انتخاب شده تا محدودیت ابعاد تأثیری بر نتایج نگذارد. همچنین به منظور حذف اثر اصطکاک از دیواره‌های مخزن، این وجوه تا حد امکان صاف و صیقلی شده‌اند.

جهت ساخت مدل زمین، از روش بارش استفاده شده است.

بدین منظور و با توجه به حجم بالای خاک مورد نیاز جهت پر کردن

ویژه (مطابق با ASTM D854 [۱۳])، تعیین دانسیته نسبی (مطابق با ASTM D4254 [۱۴]) و برش مستقیم (مطابق با ASTM D3080 [۱۵]) انجام گرفته است. مطابق نتایج به دست آمده و بر اساس سیستم طبقه بندی متحد (ASTM D2487 [۱۶])، مصالح خاکی مورد استفاده از نوع ماسه بد دانه بندی شده (SP) می باشد. پارامترهای به دست آمده از مجموعه آزمایش های صورت گرفته بر روی ماسه مورد استفاده در پژوهش حاضر، در جدول (۱) ارائه شده است. لازم به ذکر است دانسیته نسبی ماسه در آزمایش های صورت گرفته برابر ۷۲ درصد و معادل حالت خاک متراکم بوده است.

جدول (۱): مشخصات مصالح خاکی مورد استفاده در پژوهش حاضر.

ردیف	نام مشخصه	علامت اختصاری	واحد	مقدار
۱	اندازه مؤثر دانه ها	D ₁₀	mm	۰/۴۸
۲	-	D ₃₀	mm	۰/۶۱
۳	اندازه متوسط دانه ها	D ₅₀	mm	۰/۶۸
۴	-	D ₆₀	mm	۰/۷۲
۵	ضریب یکنواختی	C _u	-	۱/۵
۶	ضریب خمیدگی	C _c	-	۱/۰۸
۷	توده ویژه	G _s	-	۲/۷۱
۸	میزان رطوبت	ω	%	۰/۲۳
۹	وزن مخصوص خشک حداقل	(γ _d) _{min}	g/cm ³	۱/۳۰
۱۰	وزن مخصوص خشک حداکثر	(γ _d) _{max}	g/cm ³	۱/۶۰
۱۱	زاویه اصطکاک داخلی	φ	°	۳۵

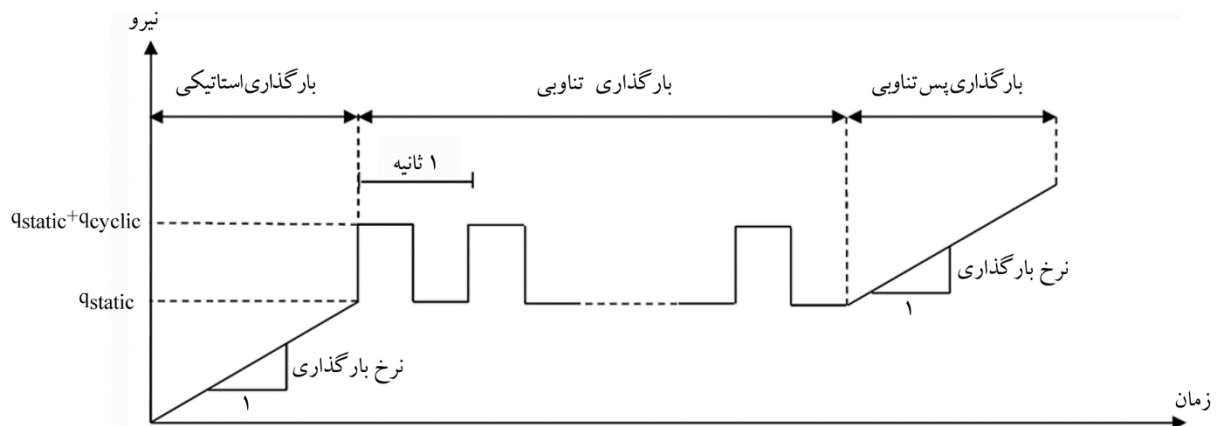
۲- بارگذاری تناوبی به صورت پالس های مستطیلی با دامنه ی q_{cyclic} و فرکانس معین

۳- بارگذاری استاتیکی پس تناوبی به صورت کنترل نیرو تا وقوع گسیختگی.

سیستم ابزار دقیق و پایش مورد استفاده جهت اندازه گیری و ثبت پارامترهای مورد نظر شامل یک LVDT جهت اندازه گیری نشست، یک نیروسنج^۹ جهت اندازه گیری نیروی وارده، سه نیروسنج جهت اندازه گیری فشار در کف شالوده در فواصل ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی متر از مرکز صفحه، چهار کرنش سنج^{۱۰} جهت اندازه گیری کرنش محوری ایجاد شده در لایه ژئوگراید، کارت A/D با قابلیت قرائت داده از ۱۶ کانال و نرم افزاری جهت دریافت داده ها و ثبت آنها در فایل بوده است. کالیبراسیون هر یک از مبدل ها قبل از آغاز و پس از اتمام پژوهش انجام گرفته و مشخص شده که عملکرد آنها خطی و برگشت پذیر است و حین انجام آزمایش ها دچار تغییر نشده است.

۳- مصالح مورد استفاده

مصالح مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل خاک و مسلح کننده بوده است. از ماسه ۱۳۱ فیروزکوه که فاقد ریزدانه و دارای دانه بندی یکنواخت است و در بسیاری از تحقیقات دیگر مورد استفاده قرار گرفته، به عنوان مصالح خاکی استفاده شده و جهت تعیین پارامترهای آن آزمایش های دانه بندی (مطابق با ASTM D422 [۱۱])، تعیین درصد رطوبت (مطابق با ASTM D2216 [۱۲])، تعیین توده



شکل (۳): الگوی بارگذاری تناوبی اعمالی به شالوده دایره ای در آزمایش های پژوهش حاضر.

ظرفیت باربری نهایی (q_u) اعمال شده است تا اثر فرکانس بیشتر دیده شود. مقدار ضریب اطمینان جهت اعمال سربار استاتیکی برابر ۳ بوده که در مهندسی عمران بسیار رایج است. مقدار نسبت سربار تناوبی نیز مطابق با مقدار رایج در سایر مطالعات پیشین می‌باشد [۱-۳].

منحنی باربری- نشست برای آزمایش‌های استاتیکی و تناوبی صورت گرفته در شکل (۴) ارائه شده است. نشست به صورت بی بعد، یعنی نسبت به قطر شالوده (s/D_p) لحاظ شده است. بر اساس شکل (۴) و با توجه به توضیحات ارائه شده توسط داس و سبحان [۱۹]، مکانیسم گسیختگی در مطالعه حاضر، چه در آزمایش استاتیکی و چه در قسمت پس تناوبی آزمایش‌های تناوبی، به صورت گسیختگی برشی موضعی بوده است؛ یعنی بالا آمدگی خاک در اطراف شالوده مشاهده نشده است و در نمودار بار- نشست نیز لحظه وقوع گسیختگی مشهود نیست. لذا ظرفیت باربری نهایی در حالت استاتیکی، q_u مطابق با تیرئی و همکاران [۱۸]، به روش تقاطع مماس‌های ابتدا و انتهای منحنی بار- نشست تعیین شده و مقدار آن تقریباً برابر ۲۹۰ کیلو پاسکال به دست آمده است؛ اما در حالت پس تناوبی، شکل منحنی بار- نشست به دلیل اعمال چرخه‌های متعدد دچار تغییر شده و استفاده از این روش را غیر ممکن ساخته است. لذا در این حالت، از نسبت بار تحمل شده در حالت پس تناوبی به حالت استاتیکی، $q_{post\ cyclic}/q_{static}$ در نشست مشخص استفاده شده است.

چنان که ملاحظه می‌شود، افزایش فرکانس بارگذاری که به معنای افزایش سرعت بارگذاری- باربرداری است، باعث شده سیستم نتواند در چرخه‌های ابتدایی (ده چرخه اول) که نشست خاک قابل توجه است، کل سربار تناوبی مورد نظر را اعمال نماید؛ اما پس از چرخه دهم، سربار تناوبی اعمالی در هر سه آزمایش تناوبی یکسان بوده است و لذا مقایسه نشست‌های تناوبی در بازه چرخه ۱۰ تا ۱۰۰۰ انجام شده است.

تغییرات نشست تناوبی با تعداد چرخه‌های بارگذاری- باربرداری به‌ازای مقادیر مختلف فرکانس، در شکل (۵) ارائه

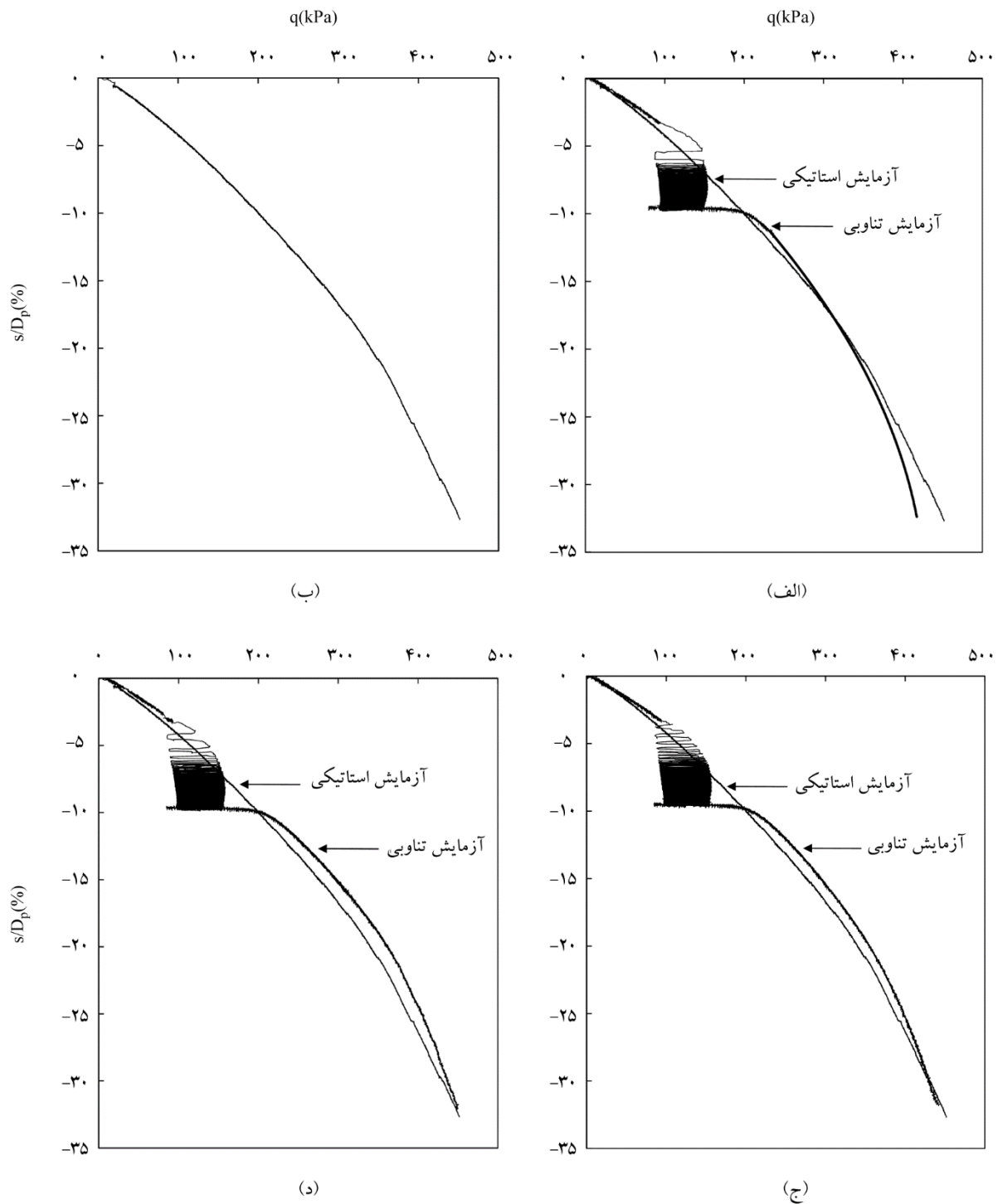
مسلح‌کننده مورد استفاده در پژوهش حاضر از نوع ژئوگرید با نام تجاری CE121 و محصول شرکت «مش ایران» بوده که تحت لیسانس و نظارت شرکت نتلون انگلستان تولید می‌شود و در بسیاری از تحقیقات دیگر نیز مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات فیزیکی ژئوگرید، اندازه‌گیری شده و مشخصات مکانیکی ژئوگرید، با انجام چند آزمایش کشش مطابق با ASTM D6637 [۱۷] و متوسط‌گیری نتایج، تعیین شده است. خلاصه این نتایج در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۲): مشخصات ژئوگرید مورد استفاده در پژوهش حاضر.

مقدار	واحد	نام تجاری
HDPE	-	جنس
۶×۸	mm	ابعاد مش
۷۳۰	gr/m ²	وزن
۳/۳	mm	ضخامت مش
۵/۶۸	kN/m	مقاومت کششی حداکثر
۹/۰۳	%	کرنش در بار حداکثر
۱۷۸/۸۵	kN/m	سختی محوری در کرنش ۲ درصد
۱۰۴/۲۰	kN/m	سختی محوری در کرنش ۵ درصد

۴- آزمایش‌ها و نتایج

جهت بررسی اثر فرکانس بارگذاری بر رفتار توده خاک دانه‌ای مسلح به ژئوگرید، یک آزمایش بارگذاری صفحه استاتیکی (جهت مقایسه با حالت تناوبی) و سه آزمایش بارگذاری صفحه تناوبی با فرکانس‌های ۱، ۲ و ۴ هرگز انجام شده است. ابعاد بهینه‌ی ژئوگرید و عمق بهینه‌ی استقرار آن، با توجه به مطالعات تیرئی و همکاران [۱۸] انتخاب شده است؛ یعنی در همه آزمایش‌ها از یک لایه ژئوگرید با قطر ۱۳۵۰ میلی‌متر (نسبت قطر ژئوگرید به قطر صفحه بارگذاری ۴/۵) استفاده شده است و عمق قرارگیری لایه ژئوگرید از کف شالوده برابر ۵۰ میلی‌متر (نسبت عمق ژئوگرید به قطر صفحه بارگذاری ۰/۱۷) بوده است. در آزمایش‌های تناوبی، ۱۰۰۰ چرخه بارگذاری با سربارهای استاتیکی و تناوبی به ترتیب برابر ۳۳ و ۲۰ درصد



شکل (۴): منحنی باربری- نشست؛ الف) آزمایش استاتیکی، ب) آزمایش تناوبی با فرکانس ۱ هرتز، ج) آزمایش تناوبی با فرکانس ۲ هرتز و د) آزمایش تناوبی با فرکانس ۴ هرتز.

شده است. همچنین، اثر فرکانس بر نشست ماندگار تناوبی از چرخه ۱۰ تا چرخه ۱۰۰۰ در شکل (۶) و اثر فرکانس بر باربری پس تناوبی شالوده به‌ازای مقادیر مختلف نشست (20٪، 25٪ و 30٪)، خلاصه نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها نیز در جدول (۳) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است، در مقیاس

شده است. همچنین، اثر فرکانس بر نشست ماندگار تناوبی از چرخه ۱۰ تا چرخه ۱۰۰۰ در شکل (۶) و اثر فرکانس بر باربری پس تناوبی شالوده به‌ازای مقادیر مختلف نشست (20٪، 25٪ و 30٪)،

جدول (۳): نتایج به دست آمده از آزمایش‌های بارگذاری صفحه تناوبی بر روی شالوده دایره‌ای مسلح.

شماره آزمایش	فرکانس (Hz)	نسبت باربری پس تناوبی شالوده در نسبت نشست مشخص				نشست تناوبی (mm)		
		s/Dp				پایان چرخه		
		%۱۵	%۲۰	%۲۵	%۳۰	۱۰	۱۰۰	۱۰۰۰
۱	۱	۱/۰۲	۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۵	۳/۰۱	۶/۷۳	۱۱/۰۰
۲	۲	۱/۰۸	۱/۰۶	۱/۰۴	۱/۰۱	۶/۹۸	۱۱/۱۵	۱۵/۶۷
۳	۴	۱/۰۶	۱/۰۴	۱/۰۲	۱/۰۰	۷/۷۸	۱۲/۶۵	۱۷/۲۷

لازم به توضیح است که طبق نظر داس و لو [۲۰] فرکانس طبیعی پی تحت بار قائم از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_z}{m}} \quad (1)$$

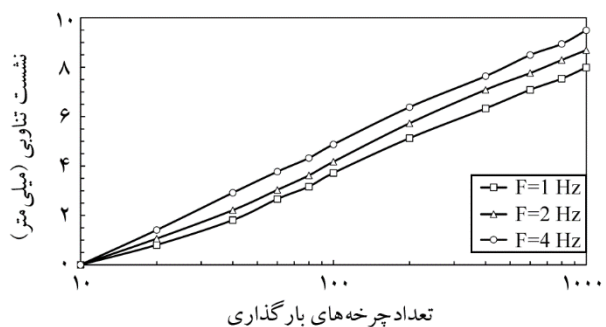
که در رابطه اخیر، f_n فرکانس طبیعی سیستم، k_z سختی سیستم در راستای قائم و m جرم می‌باشد. با توجه به موجود بودن نتایج آزمایشگاهی، می‌توان سختی سیستم را از رابطه زیر به دست آورد:

$$k_z = \frac{Q}{S} \quad (2)$$

که در رابطه اخیر، Q نیروی اعمالی در راستای قائم و S نشست صفحه بارگذاری است. با توجه به شکل (۴) و با استفاده از رابطه (۲)، مقدار سختی قائم برای بارگذاری استاتیکی (برای فشار از صفر تا حدود ۱۰۰ کیلو پاسکال)، ۷۸۵ کیلو نیوتن بر متر به دست می‌آید. از طرفی، با در نظر گرفتن جرم سیستم با توجه به نیروی استاتیکی، یعنی ۶۷۶/۵ کیلوگرم، فرکانس طبیعی سیستم از رابطه (۱)، ۵/۴ هرتز به دست می‌آید. البته با متراکم شدن خاک تحت چرخه‌های متعدد بارگذاری - باربرداری، فرکانس طبیعی سیستم به شدت افزایش می‌یابد. مجدداً با توجه به شکل (۴)، سختی قائم سیستم در مرحله پس تناوبی یعنی پس از اعمال ۱۰۰۰ چرخه بارگذاری (برای فشار از حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلو پاسکال) به ۱۳۲۰۷/۵ کیلو نیوتن بر متر و لذا فرکانس طبیعی سیستم به ۲۲/۲ هرتز افزایش یافته است. در نتیجه، فاصله

لگاریتمی، نشست تناوبی شالوده با افزایش تعداد چرخه‌های متعدد بارگذاری - باربرداری به صورت تقریباً خطی افزایش یافته است.

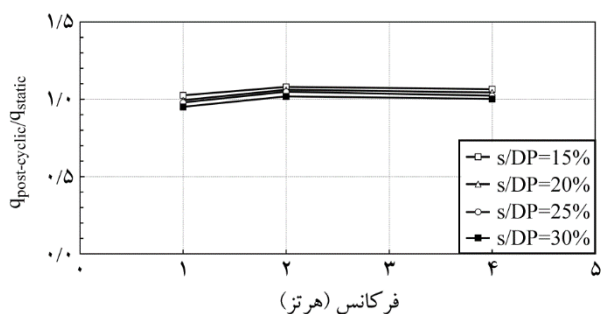
طبق شکل (۶) و جدول (۳)، با افزایش فرکانس بارگذاری از یک به ۴ هرتز، نشست ماندگار ناشی از بارگذاری تناوبی افزایش یافته که دلیل آن نزدیک شدن به فرکانس طبیعی سیستم است. روند این افزایش برای تحقیق حاضر در مقیاس لگاریتمی تقریباً خطی است.



شکل (۵): تغییرات نشست تناوبی صفحه بارگذاری با تعداد چرخه‌ها (پس از چرخه دهم).



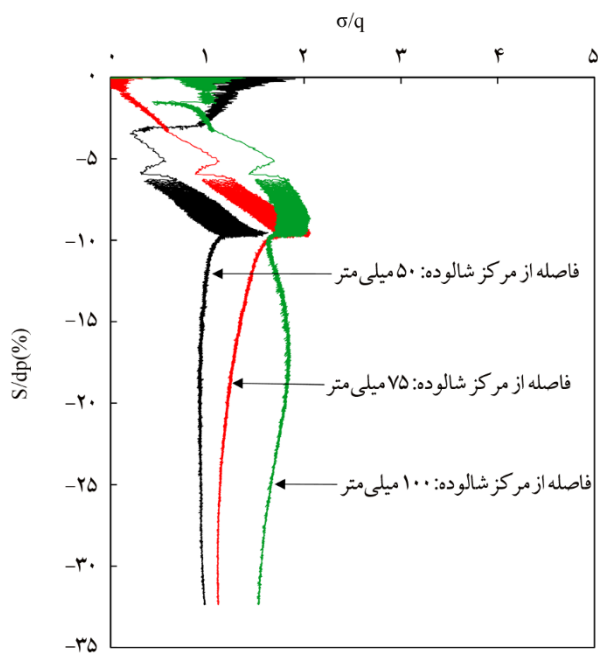
شکل (۶): تغییرات نشست تناوبی از چرخه ۱۰ تا چرخه ۱۰۰۰ با فرکانس بارگذاری.



شکل (۷): تأثیر فرکانس بارگذاری بر باربری پس تناوبی.

بین فرکانس‌های بارگذاری اعمالی با فرکانس طبیعی سیستم افزایش یافته و تأثیر فرکانس کمتر شده است. این نکته در شکل (۵) نیز مشهود است، زیرا مقادیر نشست برای بارگذاری با فرکانس ۴ هرگز، ابتدا بسیار بیشتر از دو حالت دیگر است ولی به تدریج روند افزایش نشست برای هر سه حالت یکسان می‌شود و اختلاف نشست ثابت باقی می‌ماند.

با توجه به شکل (۷) و جدول (۳)، نسبت باربری پس تناوبی برای آزمایش‌های تناوبی با فرکانس ۲ و ۴ هرگز، اندکی بزرگ‌تر از یک به دست آمده است. به عبارت دیگر، در این دو آزمایش، باربری پس از اعمال ۱۰۰۰ چرخه بارگذاری تناوبی، اندکی نسبت به حالت استاتیکی افزایش یافته است، ولی برای آزمایش تناوبی با فرکانس یک هرگز، نسبت باربری اندکی از یک کمتر است، یعنی باربری نسبت به حالت استاتیکی، اندکی کاهش یافته است. چنان‌که در شکل (۷) ملاحظه می‌شود، با توجه به اختلاف کمتر از ۷ درصد در نسبت باربری‌های پس تناوبی این سه آزمایش و عدم مشاهده رابطه مشخصی بین باربری با فرکانس، نمی‌توان فرکانس بارگذاری در محدوده این پژوهش را در باربری مؤثر دانست و به نظر می‌رسد که علت این اختلاف، ناهمگنی در لایه ژئوگرید یا توده مصالح باشد که در کرنش‌های بزرگ، اثرات آن ظاهر می‌شود.



شکل (۸): تغییرات فشار نرمالیزه شده با نسبت نشست در آزمایش تناوبی با فرکانس ۲ هرگز.

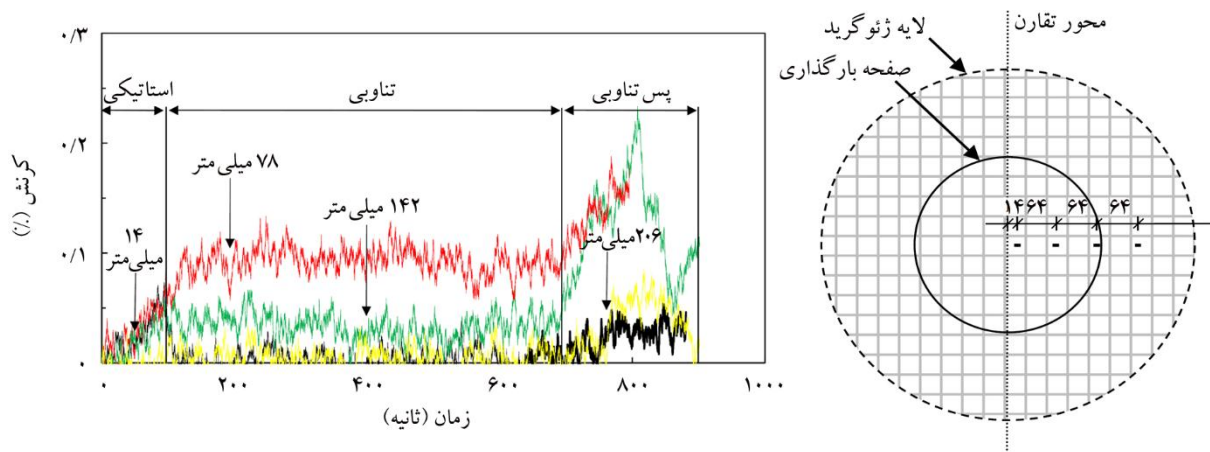
از آنجا که آزمایش‌های صورت گرفته در مطالعه حاضر، آزمایش بارگذاری صفحه واقع بر خاک ماسه‌ای بوده است، می‌توان به کمک روابط زیر، نتایج آزمایش‌های صورت گرفته (شامل باربری و نشست) را برای شالوده واقع بر خاک ماسه‌ای تعمیم داد [۱۹]:

از آنجا که آزمایش‌های صورت گرفته در مطالعه حاضر، آزمایش بارگذاری صفحه واقع بر خاک ماسه‌ای بوده است، می‌توان به کمک روابط زیر، نتایج آزمایش‌های صورت گرفته (شامل باربری و نشست) را برای شالوده واقع بر خاک ماسه‌ای تعمیم داد [۱۹]:

$$Q_u(\text{footing}) = Q_u(\text{plate}) \cdot \frac{D_{\text{footing}}}{D_{\text{plate}}} \quad (3)$$

$$S_e(\text{footing}) = S_e(\text{plate}) \cdot \left[\frac{2D_{\text{footing}}}{D_{\text{footing}} + D_{\text{plate}}} \right]^2 \quad (4)$$

که در روابط اخیر، $Q_u(\text{footing})$ و $S_e(\text{footing})$ به ترتیب ظرفیت باربری نهائی و نشست شالوده، $Q_u(\text{plate})$ و $S_e(\text{plate})$ به ترتیب ظرفیت باربری نهائی و نشست به دست آمده از آزمایش، D_{footing} قطر شالوده و



شکل (۹): الف) موقعیت کرنش سنج‌ها نسبت به صفحه بارگذاری (همه ابعاد به میلی‌متر است) و ب) تغییرات کرنش محوری با زمان در آزمایش تناوبی با فرکانس ۲ هرتز.

سربار استاتیکی، چرخه‌های متعدد سربار تناوبی تأثیر کمتری بر کرنش محوری لایه ژئوگرید داشته است. به نظر می‌رسد که با توجه به ماهیت بارگذاری تناوبی، بخشی از نشست شالوده به دلیل فرار ذرات از زیر صفحه بارگذاری باشد. به عبارت دیگر، برخلاف بارگذاری استاتیکی، ذرات خاک بیشتر تمایل به حرکت و جابه‌جایی جانبی دارند و لذا نقش ژئوگرید کم‌رنگ شده است. در نهایت در بخش سوم که مربوط به بارگذاری پس تناوبی است، مجدداً مشابه بخش اول، کرنش محوری لایه ژئوگرید افزایش یافته است. مطابق شکل (۹-ب)، میزان کرنش محوری ژئوگرید در فاصله ۷۸ میلی‌متری از مرکز بارگذاری بیشتر از سایر نقاط است ولی مقدار کرنش در فاصله ۱۴۲ میلی‌متری در مرحله پس تناوبی تقریباً با آن برابر می‌شود. پس تمرکز نیرو در بخشی از ژئوگرید که در زیر پیرامون صفحه بارگذاری واقع است، رخ می‌دهد.

۵- محدودیت‌های پژوهش

از جمله محدودیت‌های مطالعه حاضر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- مطالعه آزمایشگاهی حاضر، تنها با یک نوع ژئوگرید مشخص و روی یک نوع خاک ماسه‌ای مشخص انجام شده

جهت اندازه‌گیری کرنش ایجاد شده روی سطح لایه ژئوگرید، در نقاط مختلف از چهار عدد حس‌گر کرنش سنج استفاده شده است. این حس‌گرها روی یک شعاع و در فواصل ۱۴، ۷۸، ۱۴۲ و ۲۰۶ میلی‌متری از مرکز ژئوگرید که منطبق بر مرکز شالوده است، نصب شده‌اند (شکل ۹-الف). نتایج به دست آمده از حس‌گرهای کرنش سنج برای هر سه آزمایش تناوبی مشابه بوده و اختلاف محسوسی مشاهده نشده است و لذا فقط نتایج کرنش سنج‌ها برای آزمایش تناوبی با فرکانس ۲ هرتز در شکل (۹-ب) ارائه شده است. از این شکل می‌توان دریافت، تغییرات کرنش محوری ایجاد شده در لایه ژئوگرید از سه بخش عمده تشکیل شده است. در بخش اول با اعمال سربار استاتیکی، ذرات خاک بیشتر تمایل به حرکت و جابه‌جایی در راستای قائم دارند و به خصوص ذرات زیر ناحیه پیرامونی صفحه بارگذاری، تمایل به خروج از زیر ناحیه بارگذاری دارند ولی با مقاومت لایه ژئوگرید، حرکت آنها مهار شده و کرنش و به تناسب آن نیروی محوری در ژئوگرید در این ناحیه ایجاد شده است. در بخش دوم با اعمال سربار تناوبی، کرنش محوری ایجاد شده در سطح لایه ژئوگرید تقریباً تغییر نکرده و به همین دلیل، اختلاف محسوسی بین سه آزمایش تناوبی مشاهده نشده است؛ بنابراین در مقایسه با اعمال

زیرا به تدریج تراکم خاک به دلیل چرخه‌های بارگذاری افزایش یافته و در نتیجه فرکانس طبیعی سیستم نیز افزایش می‌یابد؛ یعنی فرکانس بارگذاری از فرکانس طبیعی سیستم دور شده و تأثیر فرکانس روی نشست کم می‌شود.

۲- رفتار توده خاک مسلح تحت بار تناوبی قائم، مشابه خاک غیرمسلح است؛ یعنی با افزایش تعداد چرخه‌های بارگذاری، نشست ماندگار نیز افزایش می‌یابد و مسلح‌سازی توانسته مانع از ایجاد نشست‌های ماندگار حتی بعد از ۱۰۰۰ چرخه بارگذاری و ایجاد تراکم بالا در خاک زیر صفحه بارگذاری شود. البته به دلیل سختی بیشتر خاک مسلح، نرخ افزایش نشست تناوبی ماندگار در این خاک کمتر از خاک غیرمسلح خواهد بود.

۳- تغییر فرکانس بارگذاری تأثیر محسوسی بر ظرفیت باربری پس تناوبی ندارد که علت آن می‌تواند یکسان بودن نشست‌های ایجاد شده در هر سه آزمایش تناوبی باشد. البته در کل، ظرفیت باربری پس تناوبی اندکی بیشتر از ظرفیت باربری استاتیکی است که علت آن افزایش تراکم خاک است.

۴- فشار زیر صفحه بارگذاری از فرکانس بارگذاری متأثر نشده است، زیرا مقادیر فشار زیر صفحه بارگذاری تابع نیروی اعمالی است و این نیرو در تمامی آزمایش‌ها یکسان بوده است. البته به صورت کلی، فشار در مرکز صفحه بارگذاری کاهش و در نواحی پیرامونی افزایش یافته است که دلیل آن می‌تواند تمایل ذرات خاک به فرار از زیر صفحه بارگذاری و مقاومت ژئوگرید در برابر این پدیده باشد.

۵- کرنش لایه ژئوگرید نیز از فرکانس بارگذاری متأثر نشده است، زیرا مقدار کرنش در مرحله بارگذاری تناوبی و علی‌رغم نشست‌های ماندگار رخ داده تقریباً تغییری نداشته است. به نظر می‌رسد علت این پدیده نیز تمایل ذرات به جابه‌جایی افقی و فرار از زیر صفحه بارگذاری باشد که در نتیجه میزان تأثیر تغییر شکل‌های توده‌ی خاک روی کرنش

است و برای شرایط دیگر، باید به تفاوت نوع مسلح‌کننده و مشخصات خاک توجه شود. همچنین از یک لایه ژئوگرید با ابعاد بهینه استفاده شده و خاک دارای یک تراکم مشخص بوده است. لذا برای بررسی سایر حالات، نیاز به انجام آزمایش‌های بیشتر است.

۲- آزمایش‌های صورت گرفته در مطالعه حاضر از نوع آزمایش بارگذاری صفحه با ابعاد مشخص و محدود بوده و جهت تعمیم آن برای تخمین باربری و نشست شالوده‌ها، علاوه بر روابط (۳) و (۴)، می‌توان از آزمایش‌های سانتریفیوژ یا آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس استفاده نمود.

۳- در آزمایش‌های تناوبی صورت گرفته در مطالعه حاضر حداکثر فرکانس بارگذاری برابر ۴ هرتز و حداکثر تعداد چرخه‌های بارگذاری برابر ۱۰۰۰ بوده است و لذا برای بررسی اثر فرکانس‌های بالاتر یا تعداد چرخه‌های بیشتر نیاز به انجام مطالعات تکمیلی است.

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، یک سیستم آزمایشگاهی با قابلیت انجام آزمایش‌های بارگذاری صفحه استاتیکی و تناوبی و قابلیت اندازه‌گیری و ثبت پارامترهایی نظیر نیروی اعمالی، نشست، فشار زیر کف شالوده و کرنش لایه ژئوگرید طراحی و ساخته شده است. به منظور مطالعه رفتار تناوبی توده خاک مسلح تحت بارگذاری قائم، به خصوص جهت مطالعه تأثیر فرکانس بر نشست و باربری خاک دانه‌ای مسلح به ژئوگرید، یک آزمایش بارگذاری صفحه استاتیکی و سه آزمایش بارگذاری صفحه تناوبی با فرکانس‌های مختلف انجام شده است. نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر نشان می‌دهد که:

۱- با افزایش فرکانس بارگذاری و نزدیک شدن مقدار آن به فرکانس طبیعی سیستم، نشست تناوبی افزایش می‌یابد. البته این افزایش برای تعداد چرخه‌های محدودی محسوس است

Science and Research branch (in Persian).

10. Tabaroei, A., Abrishami, S., and Seyedi Hosseininia, E. (2017) Comparison between two different pluviation setups of sand specimens. *J. Mater. Civ. Eng. ASCE*, **29**(10), 04017157.
11. ASTM, D. 422-63 (2007) *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
12. ASTM, D. 2216. (2010) *Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil, Rock, and Soil-Aggregate Mixtures*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
13. ASTM, D. 854-10 (2010) *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. The ASTM International, West Conshohocken, PA.
14. ASTM, D. 4254-00 (2002) *Standard Test Method for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density*. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
15. ASTM, D. 3080/D. 3080M (2011) *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions*. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
16. ASTM, D. 2487-11 (2011) *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. Annual book of ASTM standards, ASTM international, West Conshohocken, PA.
17. ASTM, D. 6637 (2011) *Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Geogrids by the Single or Multi-Rib Tensile Method*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
18. Tabaroei, A., Abrishami, S., Seyedi Hosseininia, E., and Ganjian, N. (2019) An experimental study on bearing capacity of circular footing resting on geogrid reinforced granular soil. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, DOI: 10.22060/CEEJ.2017.13150.5339, in press (in Persian).

ژئوگرید نسبت به حالت وقوع جابه‌جایی‌های قائم تحت بارگذاری استاتیکی، کمتر می‌شود.

مراجع

1. Puri, V.K., Yen, S.C., Das, B.M., and Yeo, B. (1993) Cyclic load-induced settlement of a square foundation on geogrid-reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, **12**(6), 587–597.
2. Shin, E.C., Das, B.M., Kim, S.S., Imamoto, H., and Yeo, B.C. (1995) Permanent settlement of a square shallow foundation sand due to cyclic load. *Proc. Conf. Earthquake Geotechnical Engineering*, 779-783.
3. Das, B.M. and Shin, E.C. (1994) Strip foundation on geogrid reinforced clay: behavior under cyclic loading. *Geotextiles and Geomembranes*, **13**(10), 657–667.
4. El Sawwaf, M. and Nazir, A.K. (2010) Behavior of repeatedly loaded rectangular footings resting on reinforced sand. *Alexandria Engineering Journal*, **49**(4), 349–356.
5. Moghaddas Tafreshi, S.N. and Dawson, A.R. (2012) A comparison of static and cyclic loading responses of foundations on geocell-reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, **32**, 55–68.
6. Hotti, B., Rakaraddi, P.G., and Kodde, S. (2014) Behavior of square footing resting on reinforced sand subjected to incremental loading and unloading. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, **3**, 1-8.
7. Abrishami, S. (2010) *The Study of Cyclic Bearing Capacity of Dry Geogrid-Reinforced Sand by Physical Modeling*. Ph.D. Thesis, Amirkabir University of Technology (Polytechnique) (in Persian).
8. ASTM, D. 1194-94 (2003) *Standard Test Method for Bearing Capacity of Soil for Static Load and Spread Footings*. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
9. Tabaroei, A. (2018) *A study on behavior of granular soil reinforced with geogrid based on cyclic plate load test*. Ph.D. Thesis, Islamic Azad University,

19. Das, B.M. and Sobhan, K. (2013) *Principles of Geotechnical Engineering*. 8th ed., Cengage Learning, Stamford.
20. Das, B.M. and Luo, Z. (2016) *Principles of Soil Dynamics*, Cengage Learning.

واژه‌نامه

Contact pressure	۱- فشار زیر صفحه
Geogrid	۲- ژئوگرید
Sand	۳- ماسه
Plate Load Test	۴- آزمایش بارگذاری صفحه
Cyclic Loading	۵- بارگذاری تناوبی
Post Cyclic Bearing Capacity	۶- ظرفیت باربری پس تناوبی
Permanent Settlement	۷- نشست ماندگار
Reinforced Soil	۸- خاک مسلح
Load Cell	۹- نیروسنج
Strain Gauge	۱۰- کرنش سنج

An Experimental Investigation on the Effect of Loading Frequency on the Settlement and Bearing Capacity of the Footing over the Soil Reinforced by One Geogrid Layer

Abdolah Tabaroei¹, Saeed Abrishami^{2*}, Ehsan Seyedi Hosseininia³ and Navid Ganjian⁴

1. Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
*Corresponding Author: email: s.abrishami@um.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
4. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

The soil under footings is generally under cyclic loading, which causes that the footing operation becomes different from that in static loading condition. The change in the behavior corresponds to the bearing capacity and the settlement of the footing under cyclic loading. To compensate such limitations, it is common practice to improve the soil behavior by considering reinforcement layers in depths under the footing region. By this approach, the reinforcement layers, which are able to resist tensile loads, decrease the soil settlements and consequently, cause to increase the tolerable applied pressure with respect to the condition where the soil is not reinforced with such layers. In the literature, there are several researches that studied and compared the behavior of non-reinforced and reinforced soils under both static and cyclic loads. It is noted that most of these studies were performed by considering small dimensions of footings by using dimensional analysis. Furthermore, all previous studies have only focused on the post-cyclic settlement of the footings and no investigation was done on the effectiveness of the bearing capacity or applied load under the footing. In the present study, the mechanical behavior of a footing under static and cyclic loading condition is investigated by paying attention to both the settlement and bearing capacity. It is also aimed to find the effect of loading frequency on the footing behavior. In order to have more effective results to be used as practice, experimental tests were performed by using an equipped plate load test (PLT) system. The diameter of the circular plate is 300 mm that is equal to traditional PLT equipment in common practice. The plate was thick to behave rigidly and it is equipped with monitoring system including LVDTs, load cells, pressure gauges and strain gauges installed in different parts of the plate. The test were done in a reservoir with diameter of 1400 mm and height of 900 mm. The soil inside the reservoir was uniform-graded sand whose relative density was 72%. In order to assure having a uniform-compacted soil in the whole reservoir, a portable curtain rain system was utilized. The loading equipment includes a loading steel frame with high capacity and a loading jack with 50-ton capacity. The loading system works hydraulically with closed-loop algorithm. In the experimental tests, only one layer of geogrid with the commercial name of CE121B was used, which was installed at 50 mm below the footing surface (equal to the ratio of the embedment depth to the plate diameter of 0.17). The ultimate bearing capacity of the footing (plate) was obtained experimentally for both non-reinforced and reinforced soil conditions. In order to investigate the footing behavior under cyclic loading, the footing was first loaded under static force equal to 33% of the corresponding ultimate bearing capacity and then, the cyclic loading was applied. The dynamic loading was harmonic with three different frequencies of 1, 2, and 4 Hz along with 1000 cycles with the amplitude of 20% of the static ultimate bearing capacity of the footing. The results show that the variation of the cyclic settlement is almost

linear with the logarithm of number of cycles. In addition, comparison of the results shows that although the frequency has an increasing effect on the cyclic settlement, the effect of frequency is not so much. The cyclic settlement increases 18% if the frequency augments from 1 to 4 Hz. The applied load under the footing at the post-cyclic condition was also investigated for different footing settlements for all loading frequency levels. It was observed that generally, there is the same trend regardless of the level of footing settlement. There is a small increase in the loading (less than 10%) at the frequency of 2 Hz, such that it can be concluded that the frequency has very small effect on the pressure under the footing. The induced tensile strain in the geogrid layer was also investigated and it was found that for the applied loading conditions in this study, the loading frequency has no effect on it.

Keywords: Cyclic Plate Load Test, Reinforced Soil, Loading Frequency, Bearing Capacity, Settlement.