

مطالعه تجربی رفتار کوله‌های خاک مسلح ژئوسنتتیکی تحت اثر

شکل بارگذاری

* بهزاد معین

* استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

moein@znu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵

چکیده

استفاده از فرآیند مسلح نمودن خاک به‌عنوان روشی جهت برطرف ساختن ضعف مقاومت کششی خاک به کمک اجزای فلزی یا پلیمری با مقاومت کششی مناسب به‌عنوان یکی از روش‌های سریع و اقتصادی پایدارسازی شیروانی‌ها و احداث دیوارهای حائل شناخته می‌شود. در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی با شتاب بالا در دستگاه سانتریفیوژ، رفتار کوله‌های خاک مسلح با ارتفاع نسبتاً بلند تحت اثر سربار خارجی مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور کوله‌ای به ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر معادل ۱۰۵۰ سانتی‌متر در واقعیت با مقیاس ۱:۳۰ با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ ساخته و تحت بارگذاری در شتاب ۳۰g قرار گرفت. در این تحقیق از خاک دانه‌ای و شش‌لایه مسلح‌کننده ژئوسنتتیکی استفاده گردید. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد، ظرفیت باربری پی‌های قرار گرفته بر روی کوله‌های خاک مسلح ارتباط کاملاً مستقیمی با شکل پی داشته و برای پی‌های با عرض یکسان هرچقدر شکل پی از مربع به شکل مستطیلی تغییر یابد (طول پی افزایش یابد) از میزان باربری نهایی کاسته خواهد شد. با بررسی المان‌های مسلح‌کننده خاک در لایه‌های مختلف به لحاظ گسیختگی و افزایش طول مشخص گردید که گسیختگی و افزایش برای پی نواری بیشترین مقدار و در پی مربعی کمترین مقدار است. به بیان دیگر با افزایش سطح بارگذاری عمق تأثیر تنش بیشتر شده و لایه‌های مسلح‌کننده بیشتری در عمق تحت تأثیر بارگذاری قرار خواهند گرفت.

واژه‌های کلیدی: کوله پل، خاک مسلح، ژئوسنتتیک، مدل‌سازی فیزیکی.

نوع مقاله: علمی

۱- مقدمه

از جمله روش‌های بهبود مقاومت خاک افزودن عناصر کششی (تسلیح خاک) برای بهبود مقاومت کششی آن است. ابداع روش‌های مدرن خاک مسلح به‌وسیله‌ی معمار فرانسوی هانری ویدال در اوایل دهه‌ی ۱۹۶۳ نقطه شروعی بر ابداع روش‌های مختلف و متعدد دیگر بوده است. ویدال این مصالح جدید را خاک مسلح نام‌گذاری نمود. ویدال توانست روش خاک مسلح را تا مرحله‌ای توسعه دهد که از نظر اقتصادی بتوان آن را در سازه‌های مهندسی بزرگ به‌کاربرد. [۱]

دیوارهای خاک مسلح که به‌صورت کوله در ساخت پل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد به‌صورت ثقلی^۱ عمل کرده و بوسیله عملکرد اصطکاکی که میان مسلح‌کننده‌هایی که بین لایه‌های خاک قرار می‌گیرد باعث افزایش مقاومت برشی در خاک می‌شوند. اگرچه ابتدا از تسمه‌های فلزی برای تسلیح خاک استفاده شد، ولی امروزه باتوجه‌به دسترس بودن مصالح و بافته‌های پلیمری موسوم به ژئوسنتتیک‌ها، استفاده از آنها در تسلیح خاک رواج بیشتری یافته است. دیوارهای خاک مسلح از لحاظ فنی و هزینه‌ای مزایایی را نسبت به سازه‌های حائل بتن مسلح در مناطقی با شرایط شالوده ضعیف دارد. در این شرایط حذف هزینه‌های لازم برای بهبود شالوده‌ها از قبیل به

1. Gravity



داده‌اند. بررسی‌ها بر روی مدل‌سازی دیوار خاک مسلح نشان داد، که گسیختگی به نوع مسلح‌کننده بستگی ندارد و همچنین روش‌های طراحی موجود برای دیوارهای خاک مسلح محافظه‌کارانه بوده، زیرا شکست در مدل سانتریفیوژ در دو برابر شتاب محاسبه شده اتفاق افتاد. [۱۵] در بررسی اثر خاک فونداسیون و خاک پشت دیوار بر رفتار دیوارهای خاک مسلح با استفاده از آزمایش سانتریفیوژ مشاهده گردید، که اثر نوع خاک بر پایداری کلی دیوارها کم می‌باشد و فونداسیون ساخته شده با خاک کم تراکم در رفتار دیوارهای خاک مسلح اثر خوبی داشته و استفاده از خاک‌های چسبنده به جای سنگدانه معمولی در دیوارهای مسلح شده با ژئوتکستایل منجر به بروز رفتارهای مطمئن در سازه می‌گردد. [۱۶] همچنین در خاک‌های چسبنده، طول زیاد مسلح‌کننده‌ها باعث بهبود رفتار سازه شده و تغییرشکل‌های زیاد دیوار ناشی از کشیدگی و افزایش طول ژئوتکستایل‌ها می‌باشد نه بیرون کشیدگی آنها [۱۷] در کل می‌توان گفت، نتایج بدست آمده از آزمایش‌های سانتریفیوژ شامل توصیف خرابی‌ها، نشست‌ها، الگوهای خرابی مسلح‌کننده، محل سطح خرابی در ژئوتکستایل و تفسیر مکانیسم خرابی می‌باشد. [۱۸-۲۰] بررسی پژوهش‌های آزمایشگاهی صورت‌گرفته تاکنون درباره دیوارهای خاک مسلح نشان می‌دهد که باوجود گسترش روزافزون استفاده از مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیکي در ساخت توده‌های خاک مسلح بلند با ارتفاع زیاد در دو دهه اخیر، پژوهشگران رفتار سازه‌های خاک مسلح را در دستگاه سانتریفیوژ عمدتاً تحت اثر وزن سازه مورد بررسی قرار داده‌اند. [۲۱-۲۳]

با مرور و بررسی تحقیقات قبلی صورت‌گرفته در خصوص موضوع این تحقیق، خلأ موجود در زمینه رفتار کوله‌های خاک مسلح تحت اثر سربار را می‌توان به‌وضوح دریافت؛ لذا در این تحقیق با مدل نمودن دیوار خاک مسلح به ارتفاع ۳۵ سانتیمتر با شش‌لایه مسلح‌کننده در سانتریفیوژ که معادل دیواری به ارتفاع ۱۰۵۰ سانتیمتر در واقعیت است، رفتار دیوار خاک مسلح به ژئوتکستایل تحت بار خارجی مورد ارزیابی قرار گرفت.

کارگیری شمع‌ها، موجب صرفه‌جویی به مقدار بیشتر از ۵۰ درصد هزینه کل پروژه می‌شود. همچنین یکی از بزرگترین مزایای دیوارهای خاک مسلح انعطاف‌پذیری این دیوارها و توانایی آن‌ها برای جذب تغییرشکل‌ها به علت شرایط ضعیف خاک شالوده‌ها می‌باشد. با توجه به عدم شناخت کامل رفتار شیروانی‌های خاک مسلح ژئوسنتتیکي بررسی پاسخ رفتار این سازه‌های خاکی برای رسیدن به درک بهتر از مکانیسم‌های گسیختگی و محتمل و بحرانی از اهمیت بسزایی برخوردار است. بمنظور شناخت رفتار دیوارهای خاک مسلح ژئوسنتتیکي، پژوهشگران تحقیقات زیادی در زمینه‌های تحلیلی، آزمایشگاهی و آزمون‌های برجا انجام داده‌اند. پژوهش‌های آزمایشگاهی عمدتاً شامل، نمونه‌های کوچک خاک^۱ مسلح در آزمایش‌های برش مستقیم، سه محوری و کرنش مسطح و مدل‌های کوچک مقیاس و متوسط مقیاس سازه‌های خاک مسلح تحت بارگذاری مونوتونیک و یا لرزه‌ای با استفاده از میز لرزه [۲-۴] و همچنین مدل‌های کوچک مقیاس سازه‌های خاک مسلح در دستگاه سانتریفیوژ و همچنین مدل‌های با مقیاس واقعی یا رفتارنگاری دیوارهای خاک مسلح در پروژه‌های واقعی می‌باشد. [۵-۸] تحقیقات انجام شده با استفاده از میز لرزه [۹، ۱۰]، نشان می‌دهد مقاومتی که مسلح‌کننده‌ها حین وارد شدن بارهای ناگهانی از خود نشان می‌دهند بیشتر از مقاومتی است که حین آزمایش‌های معمول با بارگذاری استاتیکی ثبت شده است. به عبارت دیگر مقاومت مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیکي تابع تغییرات و یا نرخ سرعت بارگذاری و در نتیجه سرعت تغییرشکل می‌باشد.

محققین از تحلیل‌های صورت‌گرفته بر روی نتایج به دست آمده از آزمایشات با مقیاس واقعی جهت بهبود روش طراحی دیوارهای مسلح ژئوسنتتیکي استفاده نمودند. [۱۱-۱۴] بدلیل مشکلات و هزینه‌های زیاد تحقیقات تجربی در مقیاس واقعی از یک سو، و قابلیت مدل‌های سانتریفیوژ در برقراری تشابه فیزیکی، لحاظ نمودن تنش‌های واقعی در مدل برای رسیدن به درک صحیح از تغییرشکل‌پذیری و مکانیسم گسیختگی از سوی دیگر، امروزه پژوهش‌های آزمایشگاهی با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص

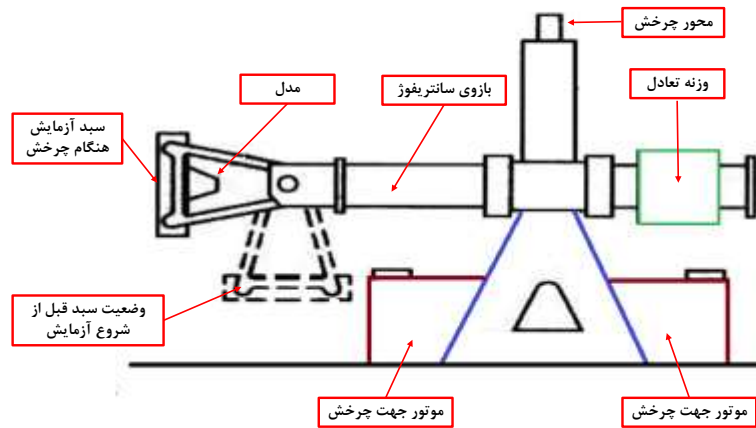
1. single element

۲- مصالح و روش تحقیق

۲-۱- دستگاه سانتریفیوژ و ضرایب تشابه

با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ مدل ساخته شده در یک میدان ثقل بالاتر از شتاب طبیعی زمین قرار می‌گیرد. این امر باعث افزایش تنش‌های ناشی از وزن تا حد تنش‌های

واقعی می‌گردد و لذا رفتار مدل مشابهت زیادی به رفتار واقعی پیدا می‌کند. دستگاه سانتریفیوژ شامل موتور دوران، بازوی دوران و همچنین یک سبد حاوی مدل فیزیکی است. شکل ۱، اجزای اصلی سانتریفیوژ مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.



الف



ب

شکل ۱. الف: اجزای اصلی سانتریفیوژ بازویی و ب: دستگاه سانتریفیوژ Actidyn C67 مورد استفاده

مدل سانتریفیوژ، ابعاد با ضریب $1/N$ مدل می‌شود و نیروهای حجمی گرانشی با ضریب N افزایش می‌یابند و تنش‌های ناشی از نیروهای حجمی مشابه در مدل و نمونه واقعی برابر خواهند بود. سایر روابط مقیاس نیز باید بر پایه این ضرایب محاسبه می‌گردند. ضرایب مقیاس رایج در مدل‌های سانتریفیوژ در جدول ۱ ارائه شده است.

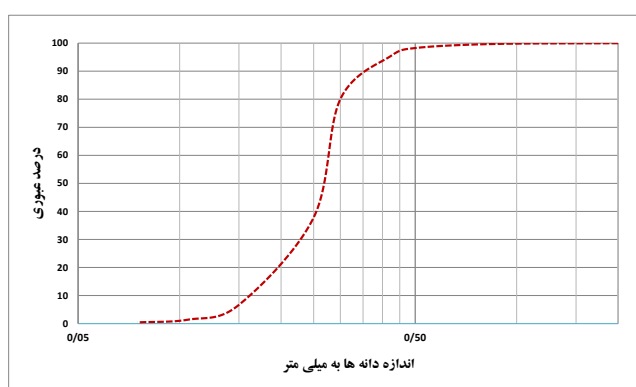
دستگاه سانتریفیوژ مورد استفاده در این تحقیق مدل Actidyn C67 ساخت فرانسه و مستقر در دانشگاه تهران می‌باشد که دارای شعاع ۳ متر است و سطح سبد محل نصب مدل فیزیکی مساحت 80×100 سانتی مترمربع دارد. این دستگاه قادر است مدل به وزن ۱۵۰۰ کیلوگرم را به شتاب $100g$ برساند.

بین تنش‌های معادل در واقعیت نسبت به مدل سانتریفیوژ، یک مقیاس خطی برقرار است. در ساخت

جدول ۱. ضرایب تشابه مدل فیزیکی برای آزمایش سانتریفیوژ ژئوتکنیکی. [۲۴، ۲۵]

مقدار	واقعیت (شتاب جاذبه زمین)	مدل (شتاب اعمالی)
طول (متر)	1	1/N
مساحت (مترمربع)	1	1/N ²
شتاب (متر بر مجذور ثانیه)	1	N
تنش (کیلونیوتن بر مترمربع)	1	1
نیرو (کیلونیوتن)	1	1/N ²
کرنش (درصد)	1	1
سختی ژئوتکستایل (کیلونیوتن بر متر)	1	1/N

(N شتاب اعمالی توسط سانتریفیوژ به مدل ژئوتکنیکی)



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در ساخت مدل‌ها

۲-۳- مسلح‌کننده

در احداث کوله‌های خاک مسلح، عموماً از دو گروه مصالح مسلح‌کننده؛ الف) مصالح پلیمری، از خانواده ژئوسنتتیک‌ها و ب) مصالح فلزی شامل تسمه‌های فلزی استفاده می‌شود. افزایش طول عمر مفید، توجیه اقتصادی و اقبال طراحان به استفاده از مسلح‌کننده‌های پلیمری، موجب افزایش استفاده از این نوع مسلح‌کننده‌ها شده است. [۲۷] ابعاد ورقه‌های مسلح‌کننده ۳۰ سانتی‌متر عرض و ۴۰ سانتی‌متر طول می‌باشد که در شکل ۳ الف نشان داده شده است و نسبت مقیاس مسلح‌کننده از نوع ژئوتکستایل در مدل سانتریفیوژ و واقعیت مطابق نمودار شکل ۳ ب می‌باشد.

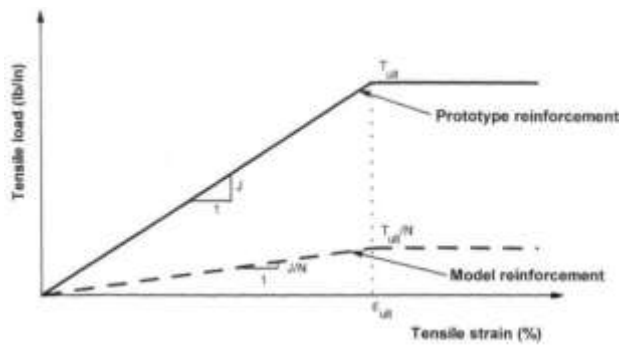
جعبه آزمایش مورد استفاده محفظه‌ای به ابعاد داخلی ۸۱×۵۶ و ارتفاع ۵۱ سانتیمتر از جنس فولاد می‌باشد. برای کنترل عرض جعبه آزمایش مسئله مهم تاثیر مرزهای صلب روی مکانیزم گسیختگی برشی خاک و ابعاد مورد نیاز مسلح‌کننده با توجه به بعد می‌باشد. براساس تحقیقات انجام شده بعد مورد نیاز مسلح‌کننده حدود ۵ تا ۶ برابر قطر پی می‌باشد. [۲۶] با توجه به حداکثر بعد پی، طول و عرض داخلی جعبه آزمایش ۸۰ و ۴۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد.

۲-۲- مصالح دانه‌ای

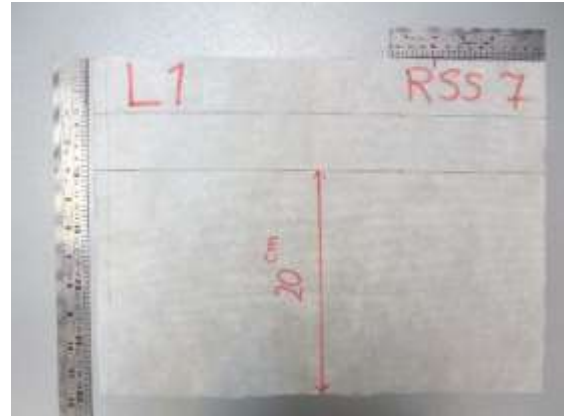
مصالح بکار رفته در این تحقیق، خاک دانه‌ای از نوع ماسه است. ماسه مذکور، ماسه سیلیسی شکسته با دانه‌بندی یکنواخت هست. مشخصات فیزیکی ماسه و منحنی دانه‌بندی مصالح بکار رفته در ساخت مدل در جدول ۲ و شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. مشخصات ماسه استاندارد مورد استفاده

مقدار	مشخصات فیزیکی
۲/۶۵۸	توده ویژه دانه‌های جامد
۰/۹۴۳	حداکثر تخلخل (درصد)
۰/۵۹۷	حداقل تخلخل (درصد)
۱/۸۷	ضریب یکنواختی
۰/۸۸	ضریب خمیدگی
۳۲/۳۳	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۱۵/۵۰	وزن مخصوص (کیلونیوتن بر مترمکعب)



ب



الف

شکل ۳. الف: ابعاد مسلح کننده ژئوتکستایل مورد استفاده برای ساخت مدل و ب: نسبت مقیاس مسلح کننده در مدل و واقعیت [۲۸]

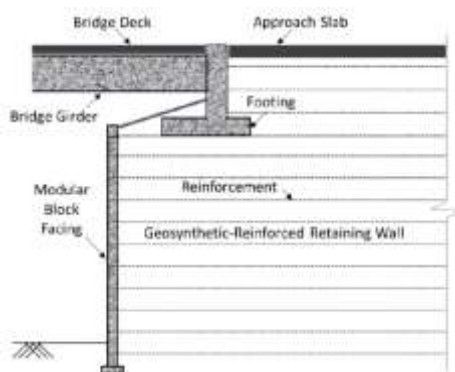
۲-۴- ساخت مدل

جهت رسیدن به ارتفاع محاسبه شده برای ساخت مدل کوله خاک مسلح، تراکم خاک به صورت حجمی - وزنی کنترل گردید. از این رو ابتدا ساخت پی مدل با ارتفاع ۵۰ میلی متر و با استفاده از ماسه صورت گرفت، سپس بخشی از لایه مسلح کننده به ابعاد ۳۰×۴۰ سانتی متر در بخشی از سطح مدل گسترده شده (شکل ۳.الف) و مصالح خاکی وزن شده روی آن پخش گردید و تا رسیدن خاک به ارتفاع مورد نظر که همان تراکم محاسبه شده است، کوبش ادامه پیدا کرد (شکل ۳.ج). جهت رسیدن به تراکم مورد نظر در هر آزمایش، بایستی خاک به صورت لایه لایه ریخته شود. یعنی در یک حجم مشخص بایستی وزن مشخصی از خاک به طور یکنواخت ریخته و کوبیده شود.

جهت تعیین ضخامت و سایر مشخصات ژئوتکستایل نفاخته (جدول ۳) از نتایج دستورالعمل ASTM-D4549 استفاده شد. [۲۹]

جدول ۳. مشخصات عددی آزمایش کشش طولی ژئوتکستایل

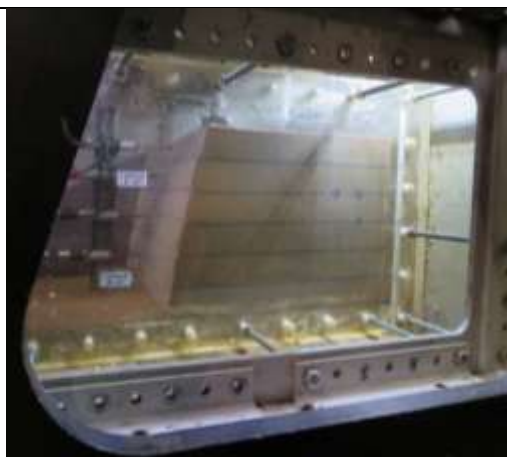
مقدار	مشخصات ژئوتکستایل نفاخته
۰/۲۵	ضخامت (میلی متر)
۳۰/۲۵	مدول الاستیسیته (نیوتن بر میلی مترمربع)
۳۹/۴۰	وزن واحد سطح (گرم بر مترمربع)
۷۹	بارکششی نهایی (نیوتن)
۵/۲۷	تنش نهایی (نیوتن بر میلی مترمربع)
۷۸/۶۰	کشش نهایی (میلی متر)



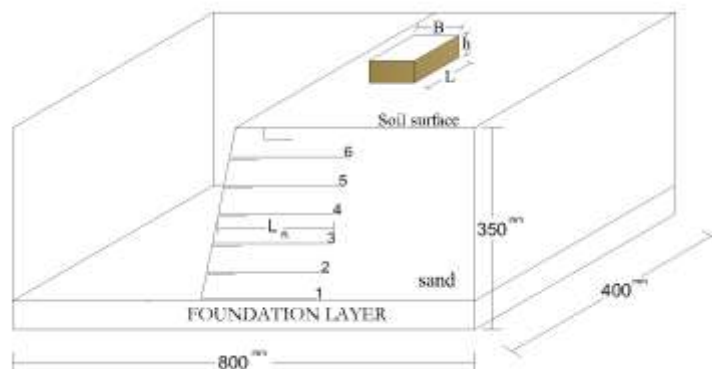
ب



الف



د



ج

شکل ۴. الف: کوله خاک مسلح ژئوسنتتیکی، ب: سطح مقطع پایه های پل قرار گرفته بر کوله خاک مسلح ژئوسنتتیکی [۳۰]، ج: مشخصات هندسی مدل آزمایش و د: مدل ساخته شده در جعبه سانتریفیوژ

از دو نوع پی مربعی و پی مستطیلی با جنس فولاد یکسان در این تحقیق استفاده شده است. عرض های انتخاب شده بر اساس محدودیت ابعاد سبد سانتریفیوژ و جعبه آزمایش به گونه ایست که محدوده ی تاثیر گوه گسیختگی پی ها از مرزها تاثیر نگیرد. در آزمایشات قبلی که بر روی طیف وسیعی از ابعاد پی و دو نوع خاک ریزدانه یکنواخت و خوب دانه بندی شده انجام شده بود حداکثر طول گوه های گسیختگی پی از طرفین عرض پی به اندازه ۳/۲۵ برابر عرض بود. [۳۱] همچنین در تحقیق دیگری میزان تاثیر گوه گسیختگی از کناره عرض پی در محدوده رابطه زیر توصیه شده است. [۳۲]

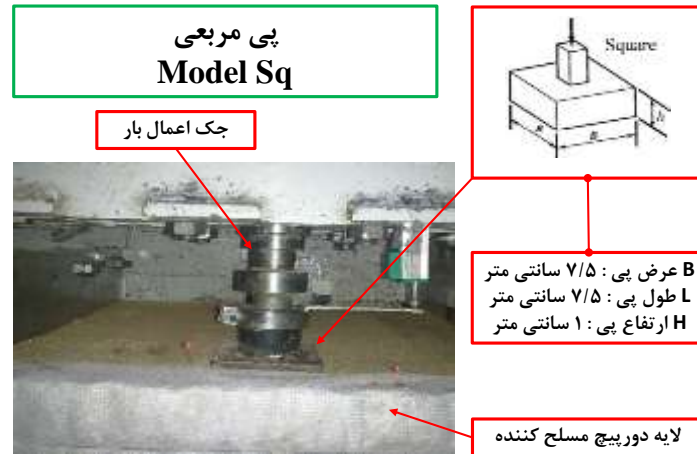
$$2.3 \leq \frac{l}{B} \leq 4.8$$

که l طول گوه گسیختگی از لبه عرض پی و B عرض پی است. براین اساس در این تحقیق حداکثر نسبت فاصله آزاد لبه پی تا مرز به عرض پی حدود ۴ است. در پی های به کار گرفته شده در آزمایش های لشچینسکی حداقل نسبت طول به عرض پی ۴ است در حالی که فرض پی نواری و تعیین ظرفیت باربری نواری و تعیین ظرفیت باربری پی با استفاده از رابطه ترزاقی صورت گرفته که در این تحقیق این نسبت حدود ۵ است. از آنجا که فرض تحقیق برای پی صلب هست، صلبیت این پی ها با انتخاب فولاد سخت و استفاده از سخت کننده های فولادی در بخش های میانی پی تأمین شد. شکل ۵ و شکل ۶ مشخصات پی های صلب مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد.

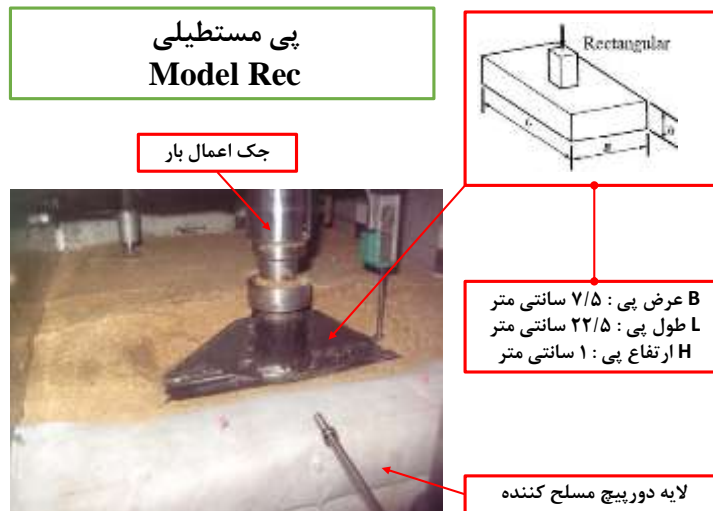
جهت بالابردن دقت در رسیدن به تراکم مورد نظر، لایه ها به عمق ۲/۵ سانتیمتر در نظر گرفته شدند. با استفاده از بارش خشک و به کاربردن قیف با ثابت نگه داشتن ارتفاع ریزش ماسه در هر لایه، خاک ریخته شد و بعد از تسطیح و تراز کردن سطح با استفاده از کوبه استاندارد آزمایشگاه لایه کوبیده شد تا به حجم محاسبه شده برسد. بعد از آماده شدن هر لایه ۵ سانتیمتری و پهن نمودن ژئوتکستایل، جهت مشاهده تغییرات وضعیت خاک زیر پی از ماسه رنگ شده در قسمت دیواره شفاف جعبه آزمایش استفاده شد. در کل جهت ساخت دیوارخاک مسلح با استفاده از ژئوتکستایل، مطابق دستورالعمل ارتش امریکا به شیوه دورپیچ عمل شد. [۲۷]

۵-۲- سیستم بارگذاری

برای اعمال بار افزایشی به مدل از میله متصل به جک هیدرولیکی کنترلی استفاده شد. سیستم بارگذاری موجود طوری طراحی شده است که توانایی تولید نیروی فشاری تا مقدار ۵ تن را داشته باشد و نیز فضای کمی اشغال نماید. هنگامی که سبد حاوی مدل ساخته شده به چرخش در آمد و تنش ها در خاک به حد واقعی تنش ها در شرایط واقعی رسید (معادل ۳۰ برابر شتاب جاذبه زمین)، میله متصل به جک هیدرولیکی نیرویی را با سرعت ۱/۷۲ سانتیمتر بر ثانیه اعمال می نماید. شکل ۵، سیستم بارگذاری مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد.



شکل ۵. مشخصات پی مربعی جهت بارگذاری کوله خاک مسلح



شکل ۶. مشخصات پی مستطیلی جهت بارگذاری کوله خاک مسلح

۲-۶- مشخصات عمومی آزمایش

در این تحقیق، آزمایش‌ها از ترکیب دو پارامتر اصلی ابعاد پی و فاصله پی با پارامترهای ثابت فاصله قائم مسلح‌کننده‌ها، جنس مسلح‌کننده‌ها، ارتفاع دیوار و زاویه شیب با سطح افق حاصل می‌شود. شکل ۵ و شکل ۶، هندسه عمومی مدل‌های مورد بررسی را نمایش می‌دهد. پارامترهای ثابت و متغیر مدل در جدول ۴ درج شده اند.

جدول ۴. مشخصات عمومی آزمایش‌ها

مقدار	پارامترها
۳۰۰	ارتفاع کوله خاک مسلح از سطح پی (میلی‌متر)
۵۰	ارتفاع پی کوله خاک مسلح (میلی‌متر)
۷۸/۷۰	زاویه کوله خاک مسلح با سطح افق (درجه)
۵۰	فاصله لبه بیرونی پی از لبه شیروانی (میلی‌متر)
۶	تعداد لایه مسلح‌کننده
۵۰	فاصله قائم مسلح‌کننده‌ها (میلی‌متر)
۴۰۰	عرض مسلح‌کننده در کل لایه‌ها (میلی‌متر)
۵۰	طول برگشتی مسلح‌کننده در لایه بعدی (میلی‌متر)
۵۰	تراکم نسبی لایه‌های ماسه (درصد)

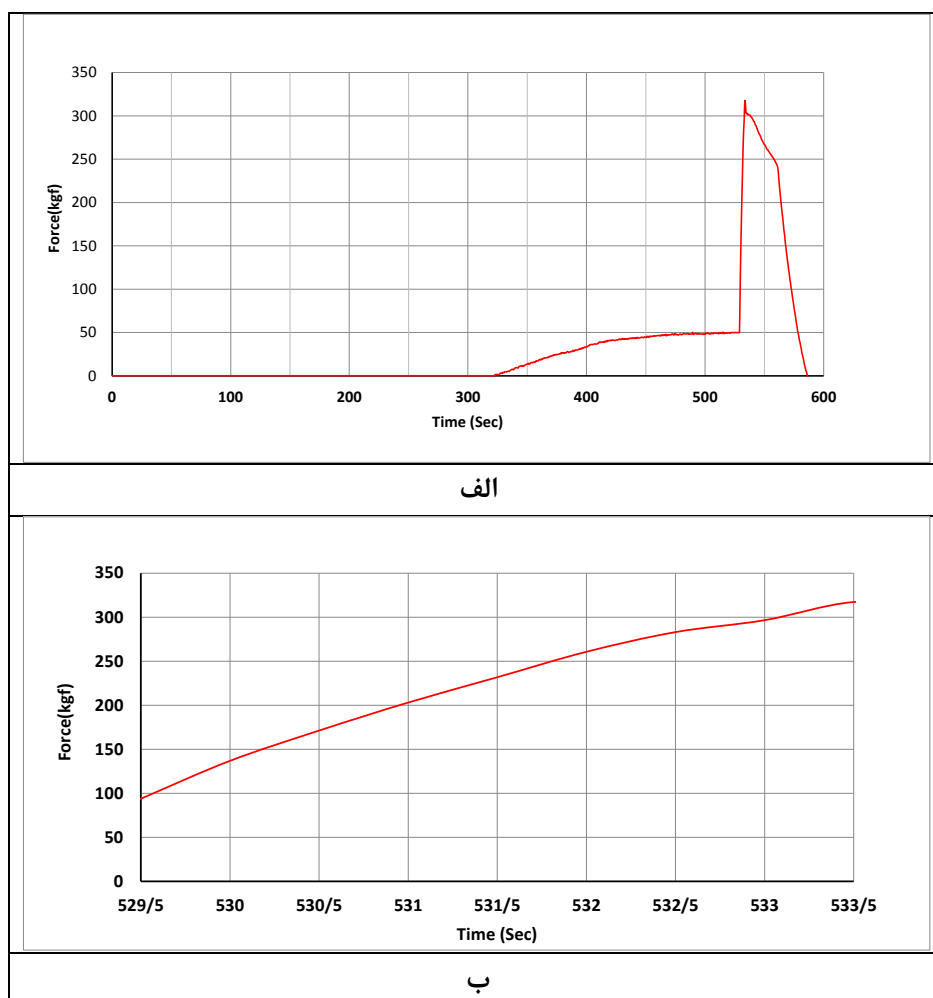
۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- رفتار پی و لایه‌های مسلح‌کننده در طول

آزمایش

در این تحقیق مدل آزمایش پی مربعی شکل Model Sq مطابق با مشخصات جدول ۴ ساخته شد و تحت بارگذاری صفحه مربعی شکل به ابعاد $7/5 \times 7/5$ سانتیمتر و مساحت $56/25$ سانتیمترمربع در شتاب $30g$ قرار گرفت. نمودار شکل ۷ نیروی وارده نسبت به زمان را برای این آزمایش نشان می‌دهد. همان طوریکه ملاحظه می‌گردد،

میزان نیرو زیر صفحه بارگذاری از لحظه شروع آزمایش تا لحظه اعمال بار ($529/5$ ثانیه) دارای مقدار صفر و نزدیک به صفر بوده و پس از اعمال بار، به مقدار حداکثر خود $317/277$ کیلوگرم نیرو می‌رسد، سپس دستگاه سانتریفیوژ با کاهش سرعت دوران به سمت کاهش شتاب حرکت می‌کند. نیروی وارده از جک در محدوده بارگذاری ($529/5$ تا $533/5$ ثانیه) در شکل ۷.ب نشان داده شده است.



شکل ۷. مشخصات نمودار نیرو - زمان آزمایش پی مربعی شکل Model Sq

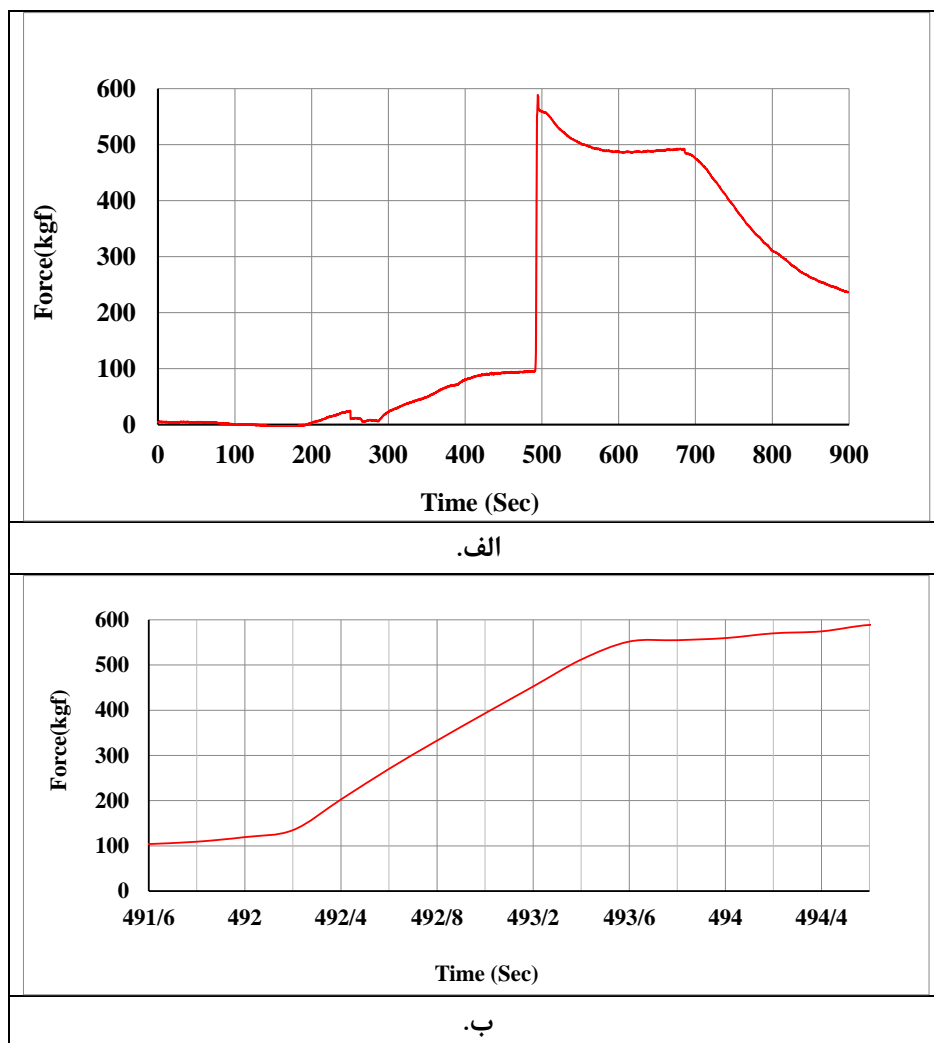
الف: از شروع تا انتهای آزمایش و ب: در محدوده بارگذاری آزمایش

۸. لایه‌های پایینی (لایه پنجم تا دوم) صرفاً دچار کشش شدند و لایه پایینی (لایه اول) بدون تغییر ظاهری مانده است.

مشخصات اندازه‌گیری و محل گسیختگی مسلح‌کننده‌ها نشان می‌دهد که گسیختگی در لایه بالایی (لایه ششم) اتفاق افتاده و با کاهش ارتفاع دیوار خاک مسلح به تدریج نیروی کمتری به مسلح‌کننده‌ها منتقل شده است (شکل

صفر و نزدیک به صفر بوده و پس از اعمال بار، به مقدار حداکثر خود $484/77$ کیلوگرم نیرو می‌رسد، سپس دستگاه سانتریفیوژ با کاهش سرعت دوران به سمت کاهش شتاب حرکت می‌کند. نیروی وارده از جک در محدوده بارگذاری ($491/6$ تا $494/6$ ثانیه) در شکل ۸. ب نشان داده شده است.

آزمایش پی مستطیلی شکل Model Rec تحت بارگذاری صفحه مستطیلی شکل به ابعاد $22/5 \times 7/5$ و با ۵ سانتیمتر فاصله لبه بیرونی پی از لبه شیروانی در شتاب $30g$ قرار گرفت. شکل ۸ نمودار نیروی وارده نسبت به زمان را برای آزمایش نشان می‌دهد. همانطوریکه ملاحظه می‌گردد، میزان نیرو زیر صفحه بارگذاری از لحظه شروع آزمایش تا لحظه اعمال بار ($491/6$ ثانیه) دارای مقدار



شکل ۸. مشخصات نمودار نیرو - زمان آزمایش پی مستطیلی شکل Model Rec
الف: از شروع تا انتهای آزمایش و ب: در محدوده بارگذاری آزمایش

و با کاهش ارتفاع دیوار در بخش‌های پایینی (لایه سوم و دوم) لایه‌ها صرفاً دچار کشش شده است. همچنین پایین‌ترین لایه (لایه اول) بدون تغییر ظاهری باقی مانده است.

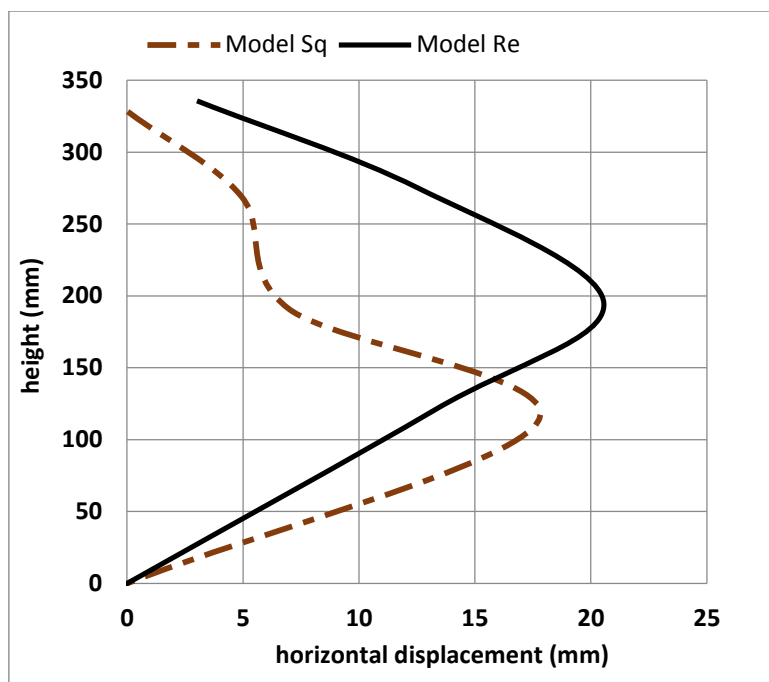
در مدل آزمایش Model Rec از شش لایه مسلح‌کننده ژئوتکستایل در فواصل یکسان ۵ سانتیمتری استفاده شده است. مشاهدات حاصل از گسیختگی مسلح‌کننده‌ها بعد از بارگذاری پی مستطیلی نشان می‌دهد که گسیختگی از لایه‌های بالایی (لایه ششم تا چهارم) شروع شده (شکل ۸)

<p>د: مسلح‌کننده لایه ششم (بالا‌ترین لایه) مدل پی مستطیلی</p>	<p>الف: مسلح‌کننده لایه ششم (بالا‌ترین لایه) مدل پی مربعی</p>
<p>ه: چهارمین لایه مسلح‌کننده (لایه میانی) مدل پی مستطیلی</p>	<p>ب: چهارمین لایه مسلح‌کننده (لایه میانی) مدل پی مربعی</p>
<p>و: ششمین لایه مسلح‌کننده (پایین‌ترین لایه) مدل پی مستطیلی</p>	<p>ج: ششمین لایه مسلح‌کننده (پایین‌ترین لایه) مدل پی مربعی</p>

چنانچه ملاحظه می‌شود با ثابت‌بودن فاصله بار از لبه شیروانی، جابه‌جایی‌های افقی به طور متوسط برای پی مستطیلی بیشترین مقدار و پی مربعی کمترین مقدار را دارد. همانطوریکه مشاهده می‌شود بیشترین جابه‌جایی افقی در بخش دو سوم میانی ارتفاع کوله پل رخ داده است.

۳-۲- جابجایی افقی شیروانی

تأثیر شکل بارگذاری بر جابه‌جایی‌های افقی نهایی رویه دیوار کوله در شکل ۱۰ مورد بررسی قرار گرفته است. این جابه‌جایی‌ها در آخرین مرحله بارگذاری ثبت شده‌اند.



شکل ۱۰. نمودار نهایی جابجایی افقی روبه دیوار

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق تغییرات شکل صفحه بارگذاری در رفتار کوله خاک مسلح در مدل‌سازی سانتی‌متری بررسی شده است. در مطالعه حاضر شیروانی مسلح شده با ژئوتکستایل توسط دو پی با عرض یکسان و شکل‌های متفاوت مربعی و مستطیلی به صورت کرنش کنترل شده تا رسیدن به گسیختگی و باربری نهایی بارگذاری شده است. با توجه به تحقیق ارائه شده پارامترهایی از جمله فاصله پی از لبه شیروانی خاک مسلح در فاصله ۵ سانتی‌متر برای کوله خاک مسلح کاملاً یکسان بررسی و مکانیزم گسیختگی، ظرفیت باربری، شرایط مسلح‌کننده‌ها قبل و بعد از گسیختگی و سطح گسیختگی به وجود آمده آنالیز گردید. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است.

• ظرفیت باربری پی‌های قرار گرفته بر روی کوله‌های خاک مسلح ارتباط کاملاً مستقیمی با شکل پی داشته و برای پی‌های با عرض یکسان هرچه قدر شکل پی از مربع به شکل نواری تغییر یابد (طول پی افزایش یابد) از میزان ظرفیت باربری نهایی کاسته خواهد شد.

• نوع نمودارهای بار نشست در پی‌های مختلف نشان می‌دهد با تغییر شکل پی از مستطیل به مربعی نوع گسیختگی از کلی به گسیختگی پانچ تغییر می‌کند.

• بررسی جابه‌جایی‌های افقی نهایی دیوار در ترازهای مختلف نشان می‌دهد که با ثابت بودن فاصله پی از لبه شیروانی، جابه‌جایی‌های افقی به طور متوسط برای پی مستطیلی بیشترین مقدار و پی مربعی کمترین مقدار را دارد.

• با بررسی المان‌های مسلح‌کننده خاک در لایه‌های مختلف به لحاظ گسیختگی و افزایش طول، مشخص گردید که به‌طور کلی گسیختگی و افزایش طول ژئوتکستایل‌ها و همچنین عمق سطح گسیختگی شیروانی برای پی‌های با عرض یکسان در شکل مستطیلی بیشترین مقدار و در پی مربعی کمترین مقدار است. به بیان دیگر با افزایش سطح بارگذاری عمق تأثیر تنش بیشتر شده و لایه‌های مسلح‌کننده بیشتری در عمق، تحت تأثیر بارگذاری قرار خواهند گرفت.

11. E. Haza ,P. Gotteland, J.-P. Gourc, Design method for local load on a geosynthetic reinforced soil structure, *Geotechnical & Geological Engineering* 18(4) (2000) 243-267.
12. L. Wichter, P. Risseuw, G. Gay, Large scale test on bearing behaviour of a woven reinforced earth, *Proceeding of the 3rd International Conference on Geotextiles*, Vienna, Austria, 1986, pp. 1073-1078.
13. B. Thamm, B. Krieger, J. Krieger, Full scale test on a geotextile reinforced retaining structure: Proc 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, The Hague, 28 May–1 June 1990 VI P3–8. Publ Rotterdam: AA Balkema, 1990, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Pergamon, 1991, p. A384.
14. R. Bathurst, D. Walters, N. Vlachopoulos, P. Burgess, T. Allen, Full scale testing of geosynthetic reinforced walls, *Advances in transportation and geoenvironmental systems using geosynthetics 2000*, pp. 201-217.
15. J. Mitchell, M. Jaber, C. Shen, Z. Hua, Behavior of reinforced soil walls in centrifuge model tests, In: *Proceedings of Centrifuge '88*, Paris, France, 1988, pp. 259-271.
16. D. Goodings, J. Santamarina, Reinforced earth and adjacent soils: centrifuge modeling study, *Journal of geotechnical engineering* 115(7) .198(9) 1021-1025.
17. A. Porbaha, D. Goodings, Geotextile reinforced cohesive slopes on weak foundations, *Proceedings of Centrifuge*, 1994, pp. 623-628.
18. E. Guler, C. Ocbe, Centrifuge and full scale models of geotextile reinforced walls and several case studies of segmental retaining walls in Turkey, *Emirates J Eng Res* 8(1) (2003) 15-23.
19. J.G. Zornberg, Performance of geotextile-reinforced soil structures, University of California, Berkeley, 1994.
20. F. Arriaga, Responses of geosynthetic-reinforced structures under working stress
- منابع
1. B.R. Christopher, V. Elias, *Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines*, United States. Federal Highway Administration, 1997.
2. N. Abu-Hejleh, J. Zornberg, T. Wang, J. Watcharamonthein, Monitored displacements of unique geosynthetic-reinforced soil bridge abutments, *Geosynthetics International* 9(1) (2002) 71-95 .
3. H.I. Ling, Y. Mohri, D. Leshchinsky, C. Burke, K. Matsushima, H. Liu, Large-scale shaking table tests on modular-block reinforced soil retaining walls, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering* 131(4) (2005) 465-476.
4. A. Murali Krishna, A. Bhattacharjee, Seismic analysis of reinforced soil retaining walls, *Geotechnical Design and Practice: Selected Topics* (2019) 159.۱۷۱-
5. D. Raisinghani, B. Viswanadham, Centrifuge model study on low permeable slope reinforced by hybrid geosynthetics, *Geotextiles and Geomembranes* 29(6) (2011) 567-580.
6. C. Yoo, S.-B. Kim, Performance of a two-tier geosynthetic reinforced segmental retaining wall under a surcharge load: full-scale load test and 3D finite element analysis, *Geotextiles and Geomembranes* 26(6) (2008) 460-472.
7. W. Burwash, J. Frost, Case history of a 9 m high geogrid reinforced retaining wall backfilled with cohesive soil, *Geosynthetics, Conference*, 1991, Atlanta, Georgia, USA, 1991.
8. R. Fannin, S. Hermann, Performance data for a sloped reinforced soil wall, *Canadian Geotechnical Journal* 27(5) (1990) 676-686.
9. K. Yang, J. Zornberg, C. Liu, H. Lin, Stress distribution and development within geosynthetic-reinforced soil slopes, *Geosynthetics International* 19(1) (2012) 62-78.
10. K.-h. Yang, Stress distribution within geosynthetic-reinforced soil structures, The University of Texas at Austin 2009.

and Budget organization, president of the Islamic Republic of Iran, Tehran, IRAN, 2013.

28. J.G. Zornberg, N. Sitar, J.K. Mitchell, Performance of geosynthetic reinforced slopes at failure, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 124(8) (1998) 670-683 .

29. ASTM.D4595, Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method, ASTM (2017).

30. T. Pham, S.M. Rahmaninezhad, A . Palma, T. Phan, T. Vu, Analytical Method for Predicting Lateral Facing Deflection of Geosynthetic-Reinforced Soil Abutment Walls, *Geo-Congress 2023*, 2023, pp. 345-358.

31. A.B. Cerato, A.J. Lutenegeger, Scale effects of shallow foundation bearing capacity on granular material, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 133(10) (2007) 1192-1202.

32. D. Leshchinsky, G.F. Marcozzi, Bearing capacity of shallow foundations: rigid versus flexible models, *Journal of Geotechnical Engineering* 116 (1990) (11) 1756-1750.

and failure conditions, University of Colorado at Boulder, 2004.

21. A. Sommers, B. Viswanadham, Centrifuge model tests on the behavior of strip footing on geotextile-reinforced slopes, *Geotextiles and Geomembranes* 27. 505-497 (2009) (6).

22. P. Aklil, W. Wu, Centrifuge model tests on foundation on geosynthetic reinforced slope [D], *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris 2013(2013).

23. B. Moein, M. Khodaparast, A.M. Rajabi, Effect of footing geometry on the slope of reinforced soil during centrifuge modeling, *Arabian Journal of Geosciences* 15(5) (2022) 425.

24. D.M. Wood, *Geotechnical modelling*, CRC press 2014.

25. L. Fuglsang, *The application of the theory of modelling to centrifuge studies*, Centrifuge in soil mechanics (1998).

26. E. Shin, B. Das, Experimental study of bearing capacity of a strip foundation on geogrid-reinforced sand, *Geosynthetics International* 7(1) (2000) 59-71.

27. TSR101, General technical specifications of the road 101, *Geosynthetics in road construction*, Plan