

ارزیابی اثر شکل و موقعیت بارگذاری بر پایداری شیب مسلح شده با ژئوتکستایل با استفاده از

مدلسازی سانتریفوژ

بهزاد معین^۱، علی محمد رجبی^{۲*}، مهدی خداپرست^۳

پذیرش مقاله: ۹۸/۰۷/۰۸

دریافت مقاله: ۹۸/۰۶/۱۲

چکیده

خاک مسلح ژئوسنتتیکی به عنوان یکی از روش‌های سریع و اقتصادی پایداری‌سازی شیروانی‌ها و احداث دیوارهای حائل شناخته می‌شود. در این تحقیق با استفاده از مدلسازی سانتریفوژ، رفتار دیوارهای خاک مسلح شده با ژئوتکستایل با ارتفاع نسبتاً بلند و شیب (۵ قائم به ۱ افقی) تحت اثر سربار خارجی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور ۳ نمونه شیب خاک مسلح به ارتفاع ۳۵ سانتی متر با مقیاس ۱:۳۰ و یک مدل بدون مسلح کننده ساخته و پس از رسیدن به شتاب ۳۰g در دستگاه سانتریفوژ تحت بارگذاری قرار گرفت. نتایج بدست آمده 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 نوع مربع به نوع نواری تغییر یابد (طول پی افزایش یابد) به میزان باربری نهایی آن اضافه خواهد شد. با بررسی المان‌های مسلح کننده خاک در لایه‌های مختلف، مشخص گردید که بیشترین میزان خرابی ژئوتکستایل مربوط به حالتی است که تحت بار نواری بوده و کمترین تخریب مربوط به بارگذاری با سطح مقطع مربعی می‌باشد.

کلید واژه‌ها: شیب خاک مسلح، ژئوتکستایل، مدلسازی سانتریفوژ، هندسه بارگذاری.

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه قم، قم؛ b.moein@stu.qom.ac.ir

۲. استادیار، گروه زمین شناسی مهندسی، دانشکده زمین شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران؛ amrajabi@ut.ac.ir

۳. دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه قم، قم؛ khodaparast@qom.ac.ir

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

عموماً طراحی و تحلیل دیوارهای خاک مسلح نیازمند از دو منظر پایداری و تغییرشکل پذیری انجام می شود. در دیوارهای خاک مسلح متعارف با ارتفاع نه چندان زیاد، معمولاً نیازی به محاسبه و کنترل تغییرشکل های دیوار نیست، اما با توسعه کاربرد خاک مسلح در ساخت دیوارهای با ارتفاع زیاد، مانند دیوارهای باربر و کوله پل ها، علاوه بر پایداری، تغییر شکل دیوار در مدت زمان بهره برداری نیز مورد توجه قرار می گیرد. بررسی تغییرشکل پذیری دیوارهای خاک مسلح با گسترش کاربرد لایه های ژئوسنتتیک در دهه های اخیر با ساخت دیوارهای باربر و کوله پل ها، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است (Moein et al., 2015; جلیل زاده et al., 2018). یکی از روش های بهبود مقاومت خاک افزودن عناصر کششی برای برطرف نمودن ضعف کششی آن است. ابداع روش های مدرن خاک مسلح به وسیله ی هانری ویدال در اوایل دهه ۱۹۶۳ نقطه شروعی بر ابداع روش های مختلف و متعدد دیگر بوده است. ویدال این مصالح جدید را خاک مسلح نامگذاری نمود (JONES, 2002). اگرچه ابتدا از تسمه های فلزی برای تسلیح خاک استفاده شد، ولی امروزه با توجه به دسترس بودن مصالح و بافته های پلیمری موسوم به ژئوسنتتیک ها، استفاده از آنها در تسلیح خاک رواج بیشتری یافته است. دیوارهای خاک مسلح از لحاظ فنی و هزینه ای مزایایی را نسبت به سازه های حائل بتن مسلح در مناطقی با شرایط شالوده ضعیف دارد. در این شرایط حذف هزینه های لازم برای بهبود شالوده ها از قبیل به کارگیری شمع ها، موجب صرفه جویی به مقدار بیشتر از ۵۰ درصد هزینه کل پروژه می شود. همچنین یکی از بزرگترین مزایای دیوارهای خاک مسلح انعطاف پذیری این دیوارها و توانایی آن ها برای جذب تغییرشکل ها به علت شرایط ضعیف خاک شالوده ها می باشد (Christopher and Elias, 1997).

با توجه به سیر تحقیقات انجام شده در خصوص دیوارخاک مسلح و با در نظر گرفتن موارد مشترک در اهداف و نتایج، مدل سازی فیزیکی در زمینه ساخت دیوارهای خاک مسلح به

سه بخش کلی؛ مدل سازی کوچک و بزرگ مقیاس، پایش سازه های در حال بهره برداری و مدل سازی با استفاده از دستگاه سانتریفوژ ژئوتکنیکی قابل تقسیم می باشد. در آزمایش های کوچک مقیاس تعیین مکانیزم گسیختگی، تعداد لایه های مسلح کننده، مقدار نشست، تاثیر مواد افزودنی به خاک مسلح، فاصله اولین لایه مسلح کننده از سطح مورد بررسی قرار گرفته است (Matsuo et al., 1998; Sommers and Viswanadham, 2009; Wong et al., 1994). مدل های آزمایشگاهی کوچک مقیاس در محیط 1g به صورت کامل بیانگر رفتار دیوارهای خاک مسلح در واقعیت نیست و همواره به دلایلی مثل اثر مقیاس و دیگر فرضیات ساده کننده تفاوت هایی با مدل واقعی دارند. در مدل سازی دیوار خاک مسلح در مقیاس بزرگ اثر پارامترهایی مانند مسلح کننده مصرفی (Haza et al., 2000)؛ بارگذاری قائم (Fannin and Hermann, 1990; Thamm et al., 1991; Wichter et al., 1986; Won and Kim, 2007; Won et al., 2008; Yoo and Kim, 2008)؛ اثر پوشش در رویه (Bathurst et al., 2000)؛ تاثیر مواد افزودنی به خاک مسلح (Guler et al., 2012; Güler and Ocbe, 2003) در نظر گرفته شده است.

مدل سازی در مقیاس شتاب بالا، یکی از بهترین روش های موجود جهت رفع مشکلات ذکر شده ناشی از مدل های آزمایشگاهی دیوارخاک مسلح کوچک مقیاس و تمام مقیاس تا به امروز می باشد (Rojhani et al., 2012). در مدل سازی خاک مسلح با سانتریفوژ؛ پارامترهایی مانند جنس و تعداد مسلح کننده، سطح بارگذاری و افزودنی به خاک مسلح مورد بررسی گرفته است. اولین تحقیقات انجام گرفته با دستگاه سانتریفوژ ژئوتکنیکی در مورد بررسی رفتار سازه های خاک مسلح توسط بولتن (Bolton and Pang, 1982; Bolton et al., 1978) با مسلح کننده های نوار فولادی (stainless steel strip)، مفتول فولادی (mild steel welding rod) و نوار آلومینیومی انجام گرفت. سایر آزمایش ها نیز اثر سربار ثابت (Matichard et al., 1988)؛ اثر تراکم خاک (Goodings and Santamarina, 1989; Mitchell et al., 1988)؛ اثر نوع خاک

جهت تکرار پذیری آزمایش، مصالح خاکی بکار رفته در تحقیق، از نوع ماسه استاندارد فیروزکوه به شماره ۱۶۱ (نوعی ماسه استاندارد و شناخته شده در شمال ایران) می باشد که تحقیقات متعدد آزمایشگاهی با سانتریفوژ نیز با خاک ماسه ای استاندارد فیروزکوه ۱۶۱ انجام شده است. (Ahmadi et al., 2018; Ashtiani et al., 2017; Bahadori et al., 2008; Darvishi Alamouti et al., 2018; Farahmand et al., 2016; Sabermahani et al., 2018; Sabermahani et al., 2009) ویژگی های شاخص ماسه مورد مطالعه در مقایسه با سایر محققین در جدول ۱ نشان داده شده است. مطابق جدول (۱)، ماسه ۱۶۱ فیروزکوه شباهت نزدیکی با ماسه های مصرفی سایر محققین در آزمایش های سانتریفوژ دارد (Arriaga, 2004; Zornberg et al., 1998).

۲-۲. مسلح کننده

در احداث دیوارهای خاک مسلح، عموماً از دو گروه مصالح مسلح کننده های پلیمری (از خانواده ژئوسنتتیک ها) و فلزی (شامل تسمه های فلزی) استفاده شده است. افزایش طول عمر مفید، توجیه اقتصادی و اقبال طراحان به استفاده از مسلح کننده های پلیمری، دلیل انتخاب این نوع مسلح کننده در این مطالعه بوده است (TSR101, 2013). مسلح کننده بکار رفته در ساخت مدل ها از نوع ژئوتکستایل نفاخته دارای وزن ۴۰ گرم بر مترمربع می باشد. این ژئوتکستایل ساخت کشور ایران بوده و سایر مشخصات این نوع ژئوتکستایل مصرفی با استفاده از دستورالعمل ASTM-D4549 مورد آزمایش قرار گرفته است (جدول ۲ و شکل ۱).

و افزودن آهک به خاکریز (Guler and Ocbe, 2003; Porbaha and Goodings, 1994)؛ اثر تعداد لایه های ژئوتکستایل در ساخت شیروانی هایی مسلح شده (Zornberg, 1994; Zornberg and Arriaga, 2003) و اثر اعمال بار توسط صفحه مستطیلی شکل و بررسی زاویه شیب نیز (Aklil and Wu, 2013a; Sommers and Viswanadham, 2009) بر رفتار دیوارهای خاک مسلح در شتاب بالا مورد بررسی قرار دادند.

آزمایش های دیوار خاک مسلح با سانتریفوژ که نتایج آنها تا کنون منتشر شده، به صورت عمده با زاویه ۹۰ درجه و با مسلح کننده های فولادی بوده است (Zornberg et al., 1998). از طرف دیگر تمامی آزمایش های مذکور با افزایش تدریجی شتاب انجام شده و تنها در موارد بسیار معدودی اثر سربار در شتاب ثابت آن هم به صورت نواری بر رفتار توده خاک مسلح به طور مستقیم بررسی شده است. در این موارد متغیرهای مورد بررسی تعداد لایه ها و زاویه با افق بوده و صفحه اعمال بار نیز مستطیلی به ابعاد 50×180 میلیمتر در فاصله ۶۰ میلیمتری لبه شیروانی قرار داشت (Aklil and Wu, 2009; Sommers and Viswanadham, 2013b). بر این اساس در این تحقیق با مدل نمودن دیوار خاک مسلح به ارتفاع ۳۵ سانتیمتر با شش لایه مسلح کننده در سانتریفوژ با شتاب ۳۰g که معادل سازه ای به ارتفاع ۱۰۵۰ سانتیمتر در واقعیت می باشد به بررسی اثر سه نوع سطح بارگذاری مستطیلی، نواری و مربعی پرداخته شده است.

۲. روش پژوهش آزمایشگاهی

۱-۳. مصالح دانه ای

جدول ۱. مشخصات فیزیکی ماسه استاندارد ۱۶۱ فیروزکوه در مقایسه با سایر محققین (Arriaga, 2004; Zornberg et al., 1998).

Soil Type	Specific gravity (G_s)	Max Void ratio (e_{max})	Min Void ratio (e_{min})	Coefficient of uniformity (C_u)	Coefficient of curvature (C_c)	Unit weights γ (kN/m^3)
Firozkoh No.161 sand	2.658	0.943	0.597	1.87	0.88	15.5
Zornberg sand	-	0.83	0.53	1.3	1.1	15.64 - 16.21
Monterey No.30 sand	2.65	0.76	0.56	1.8	1	14.76 - 16.7

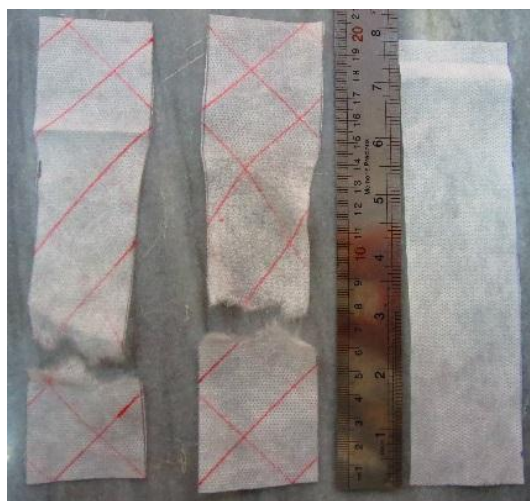
جدول ۲. مشخصات فیزیکی ژئوتکستایل مصرفی در این تحقیق.

Weave type	Thickness (mm)	Elasticity modulus (N/mm ²)	Mass per unit area (gr/m ²)	Ultimate tensile Load (N)	Ultimate strain (mm)
non-woven	0.25	30.25	40	79	78.6

صفحات بارگذاری مورد استفاده در جدول (۳) نشان داده شده است.

۲-۴. نحوه ساخت و لایه بندی نمونه

در هر سری از آزمایش های مدل فیزیکی همواره نمی توان تمامی پارامترهای مدل را مقیاس نمود و اولویت با مقیاس نمودن پارامترهای مهم و تاثیرگذار در نتیجه مورد نظر تحقیق می باشد. جهت پیش بینی ابعاد و پارامترهای اولیه آزمایش مانند ارتفاع شیروانی، تراکم و دیگر پارامترهای لازم از نتایج نرم افزار ارتقا یافته تراس (TRASS : Three dimensional Analysis of Reinforced Soil Slopes with upper bound limit analysis method) برای خاکهای مسلح استفاده شد (Khoshnevis Ansari, 2015; Zohdi Tavassoli, 2010). شکل ۲، هندسه عمومی مدل های مورد بررسی را نمایش می دهد. در این تحقیق، در مجموع ۴ مدل فیزیکی جهت بررسی رفتار دیوار خاک مسلح ساخته شد. پارامترهای ثابت و متغیر مدل در جدول ۴ و همچنین تعداد آزمایش های انجام شده در جدول ۵ درج شده اند.



شکل ۱. گسیختگی ژئوتکستایل پس از آزمایش طبق استاندارد ASTM-D4549.

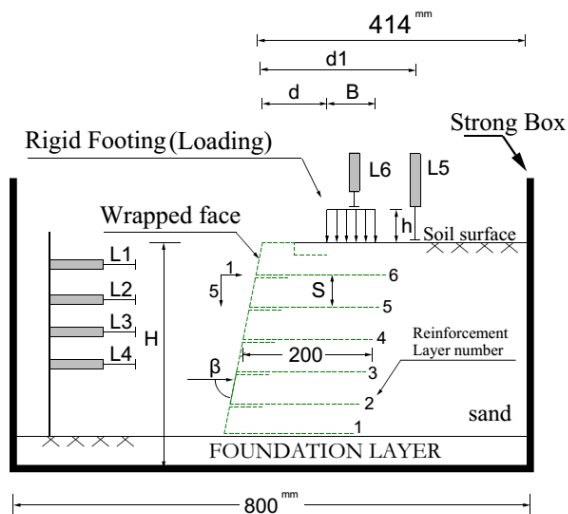
۲-۳. بارگذاری

سیستم بارگذاری مورد استفاده در این تحقیق با توجه به افزایش وزن قطعات در شتاب های بالا و افزایش نیروی مورد نیاز برای اعمال نیرو، از نوع هیدرولیک انتخاب شده است. 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. مشخصات ابعادی و وزن هر کدام از

جدول ۳. مشخصات پی های مورد استفاده جهت بارگذاری روی شیب خاک مسلح در این مطالعه.

Shape of Loading	Strip	Rectangular	Square
Schematic			
Dimension (mm) B. L. h	75 × 390 × 20	75 × 225 × 10	75 × 75 × 10
Weight (gr)	3410	1795	765

تفکیک در جدول ۶ آورده شده است. شکل ۳ مراحل ساخت نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۲. جزئیات مدل و محل جایگذاری ژئوتکستایل ها در مدل فیزیکی.

برای تهیه نمونه مورد آزمایش، ابتدا یک فونداسیون از جنس ماسه استاندارد فیروزکوه با ابعاد ۸۰۰ در ۴۰۰ میلیمتر مربع و با ارتفاع ۵۰ میلیمتر و تراکم ۶۰٪ در کف محفظه ی ساخت نمونه، اجرا شد. سپس جهت لایه گذاری ژئوتکستایل با ابعاد ۳۰×۴۰ سانتی متر بر روی فونداسیون گسترده شد، به نحوی که ۲۰ سانتیمتر از منسوج مذکور با لایه خاک ماسه های در تماس بوده و ماسه وزن شده به ارتفاع ۵ سانتیمتر روی آن با رعایت نسبت تراکم یکسان ۵۰٪ پخش شده و سپس ۵ سانتیمتر از لبه باقیمانده ژئوتکستایل، روی سطح خارجی این لایه ماسه ای برگشته و گسترانیده می شود. این ترتیب لایه گذاری برای لایه های بعدی نیز رعایت گردید. این نوع ساخت دیوارخاک مسلح با استفاده از ژئوتکستایل مطابق دستورالعمل ارتش امریکا به شیوه دورپیچ (Wrap around) مرسوم است (TSR101, 2013; Zornberg, 1994). مطابق شکل ۲ مشاهده می شود که برای ساخت مدل‌ها از ۶ لایه مسلح کننده با طول های مندرج در جدول ۴ استفاده شده است. همچنین حجم ماسه مورد استفاده نیز در هر لایه به

جدول ۴. مشخصات کلی و ثابت آزمایش های انجام شده در این مطالعه.

No.	Parameter	Symbol	Unit	Value
1	Acceleration in Centrifuge	N	g	30
2	Wall height from the bottom of the strong box	H	mm	350
3	Vertical Height of slope	-	mm	300
4	Wall angle with horizon surface (Slope)	1H : 5V	degree	78.7°
5	Distance of the load from the edge	d	mm	50
6	Location of the LVDT5	d1	mm	Refer to text
7	Space between Layers (Reinforcement Layers)	S	mm	50
8	Number of Reinforcement Layers	-	-	6
9	Width of reinforcement	-	mm	400
10	Length of reinforcement (Layer 1 - 5)	-	mm	300
11	Length of reinforcement (Layer 6)	-	mm	400
12	Moisture content of sand	w	%	5
13	Density of Foundation layer	Dr	%	60
14	Density of layers	Dr	%	50
15	Width of foundation	B	mm	75
16	Length of foundation (Square)	L	mm	75
17	Length of foundation (Rectangular)	L	mm	225
18	Length of foundation (Strip)	L	mm	390

جدول ۵. شماره و برنامه آزمایش های انجام شده در این مطالعه.

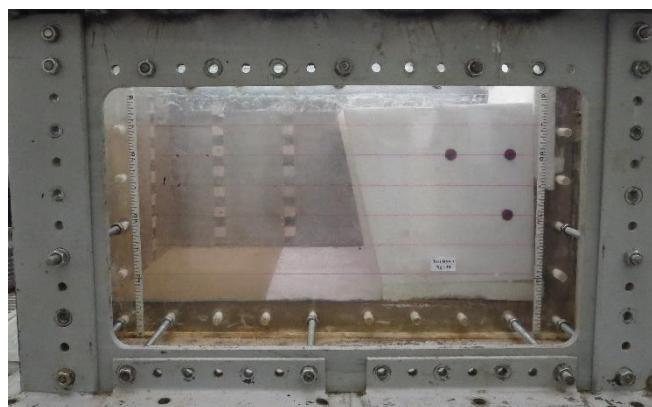
Test No.	Test label	Shape of Loading	Wall height (mm)	Slope (degree)	Distance of the Foundation from the edge (mm)
1	RSS 08	-	350	78.7°	-
2	RSS 02	Square	350	78.7°	50
3	RSS 07	Rectangular	350	78.7°	50
4	RSS 03	Strip	350	78.7°	50

جدول ۶. حجم و وزن ماسه مصرفی در ساخت نمونه های مورد بررسی در این مطالعه.

Layers	Volume (cm ³)	Weight (kg)	Density (%)
Layer 6	8448	13.30	50
Layer 5	8596	13.53	50
Layer 4	8844	14.15	50
Layer 3	8988	14.46	50
Layer 2	9188	14.46	50
Layer 1	9332	14.69	50
Foundation	1072.20	25.68	60
Total	54468.2	110.27	-

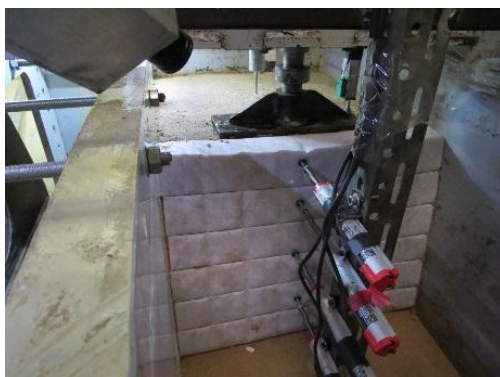


ب- پایان ساخت نمونه؛ نما از روبرو



الف- قالب یونولیتی جهت حفظ شیب؛ نما از جانب

شکل ۳. مراحل ساخت نمونه های مورد استفاده در این مطالعه.



شکل ۴. محل نصب جابجایی سنج های افقی و قائم؛ نما

از روبرو.

۲-۵. رفتارنگاری

به منظور رفتارنگاری و اندازه گیری جابجایی افقی رویه دیوار و قائم سطح پی، از ۶ مبدل اندازه گیری تغییرمکان سنج (linear variable deformation transformer) با مدل های SLPT و GEFRAN با وضوح نامحدود استفاده شده است. طرح کلی و محل نصب ابزارهای اندازه گیری در شکل های ۲ و ۴ نشان داده شده است.

جدول ۷. ضرایب تشابه مدل در سانتریفوژ ژئوتکنیکی.

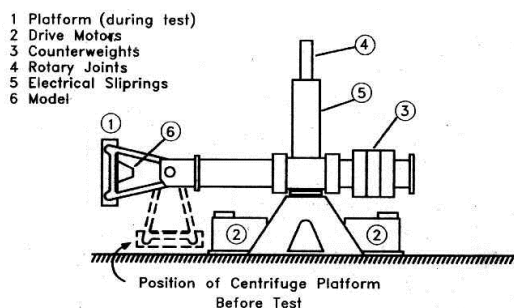
Parameter	Model/Prototype
Acceleration	N
Displacement	1/N
Force	1/N ²
Length	1/N
Mass density	1
Strain	1
Stress	1

شکل ۵، اجزای اصلی دستگاه سانتریفوژ مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. دستگاه سانتریفوژ مورد استفاده در این تحقیق از نوع بازویی به شعاع ۳ متر بوده و دارای سبد شناور جهت نصب مدل فیزیکی به مساحت ۸۰ در ۱۰۰ سانتی متر مربع می باشد. دستگاه توسط شرکت Actidyn فرانسه ساخته شده و مشابه دستگاه دانشگاه Dundee در Scotland می باشد و قادر است مدلی به وزن های ۱۵۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم را به ترتیب به شتاب ۱۰۰g و ۱۳۰g برساند.

با توجه به سیستم ابزاربندی و دوربین های فیلم برداری در این مطالعه از ۹ کانال استاتیکی دستگاه ثبت اطلاعات استفاده شده است. برای مشاهده تغییرشکل ها در حین بارگذاری و پس از پایان آزمایش، در مجاورت جدار جعبه از لایه های ماسه رنگی در ردیف لایه های مسلح کننده مجاورت شیشه پلاکسی گلاس استفاده شده است.

۲-۷. دستگاه سانتریفوژ

مدلسازی در دستگاه سانتریفوژ یکی از ابزارهای مهم در امر پژوهش، آموزش و مسائل کاربردی مهندسی ژئوتکنیک می باشد. با استفاده از دستگاه سانتریفوژ مدل ساخته شده در یک میدان ثقل بالاتر از شتاب طبیعی زمین قرار می گیرد. این امر باعث افزایش تنش های ناشی از وزن تا حد تنش های واقعی می گردد و لذا رفتار مدل مشابهت زیادی به رفتار واقعی پیدا می کند (Wood, 2003). در جدول ۷ ضرایب مقیاس مورد استفاده در این تحقیق ارائه شده است.



الف- شکل شماتیک سانتریفوژ بازویی



ج - اتاق کنترل



ب - نمای جانبی سانتریفوژ Actidyn C67

شکل ۵. شکل شماتیک سانتریفوژ بازویی (Elgamil, 1991) و اجزای اصلی دستگاه سانتریفوژ مورد استفاده در این مطالعه.

۳. بحث و بررسی نتایج

جدول ۵ برنامه آزمایش های انجام شده بر روی نمونه های خاک مسلح را نشان داده است. همان طور که مشاهده می شود اثر تفاوت انواع بارگذاری ها در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۱. آزمایش شماره ۱، بدون مسلح کننده (RSS 08)

در شکل ۶ نمودار افزایش شتاب بر حسب زمان تا رسیدن به مرحله بارگذاری نشان داده شده است. تمامی مدل های خاک مسلح شده با ژئوتکستایل تا شتاب نهایی ۳۰g سالم ماندند و بعد از اعمال بارگذاری قائم دچار تغییر شکل و گسیختگی شدند. مدل بدون ژئوتکستایل در شتاب ۳/۳۷g و در زمان ۱۲۰ ثانیه از شروع آزمایش دچار گسیختگی می گردد. نشست سطح سطح شیب دار مدل در فاصله ۲۴۰ میلی متری از لبه سطح شیب دار در کل محدوده آزمایش RSS 08 در شکل ۷ ارائه شده است. چنانچه ملاحظه می شود با افزایش بار، نشست به طور پیوسته افزایش یافته است. پس از آنکه سطح شیب دار مدل گسیخته شد، بارگذاری خاتمه پیدا کرده که به دنبال آن نشست نیز متوقف شده است. همچنین مشاهده می شود پس از باربرداری، سطح شیب دار مدل به مقدار قابل توجهی به سطح قبل از بارگذاری برگشت نموده است.

۳-۲. نشست سطح مدل و گسیختگی ژئوتکستایل ها

• آزمایش شماره ۲ (RSS 02)

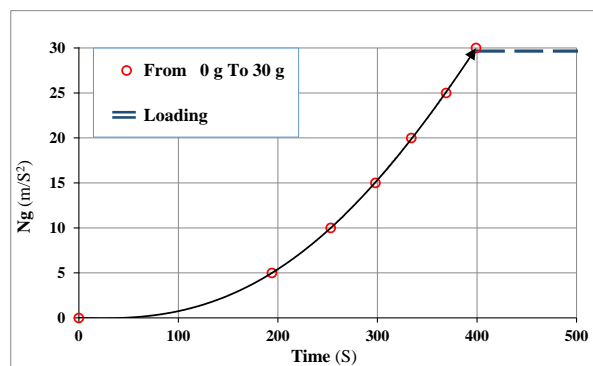
چنانچه پیشتر شرح داده شد، در تمامی مدل ها از شش لایه مسلح کننده ژئوتکستایل در فواصل عمودی یکسان ۵ سانتی متری استفاده شده است. در مدل آزمایش RSS 02 تحت بارگذاری صفحه مربعی شکل به ابعاد $7/5 \times 7/5$ و با ۵ سانتیمتر فاصله لبه بیرونی پی از لبه شیروانی در شتاب ۳۰g قرار گرفته است. در این آزمایش پارگی یا میزان کش آمدگی ژئوتکستایل ها پس از اتمام آزمایش مورد بررسی قرار گرفته است. چنانچه در شکل ۷ ملاحظه می شود با افزایش بار، نشست در نقطه ۲۳۸ میلیمتری از لبه شیروانی به طور پیوسته افزایش یافته است. همچنین مشاهده می شود پس از باربرداری، نشست متوقف شده و به سبب تاثیر حضور فاز تقویت کننده پلیمری سطح شیب دار مدل کمی به حالت اولیه برگشت نموده است.

جدول ۸ و شکل ۱۰ مشخصات اندازه گیری و محل گسیختگی ژئوتکستایل ها را نشان می دهد. بر این اساس، گسیختگی کامل در لایه بالایی (لایه ششم) اتفاق افتاده است. با کاهش ارتفاع دیوار خاک مسلح به تدریج نیروی کمتری به لایه های پایینی تقویت کننده ها منتقل شده است. لایه های پایینی (لایه پنجم تا دوم) صرفا دچار کشش شده و لایه پایینی (لایه اول) بدون تغییر ظاهری مانده است.

جدول ۸. محل گسیختگی ژئوتکستایل پس از بارگذاری در

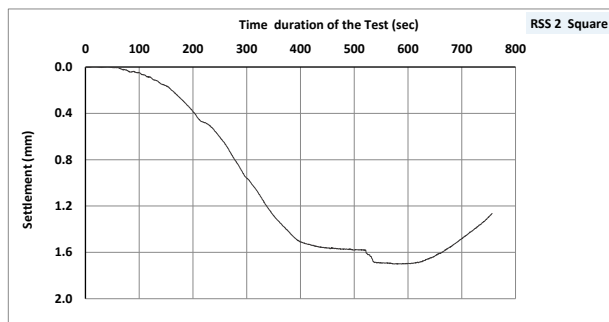
آزمایش RSS 02

Reinforce ment Layers	Observation after Test	Geotextile Elongation (%)
Layer 6	Failure	Torn
Layer 5	Elongation	5
Layer 4	Elongation	3
Layer 3	Elongation	2.5
Layer 2	Elongation	2.5
Layer 1	No change in length	0

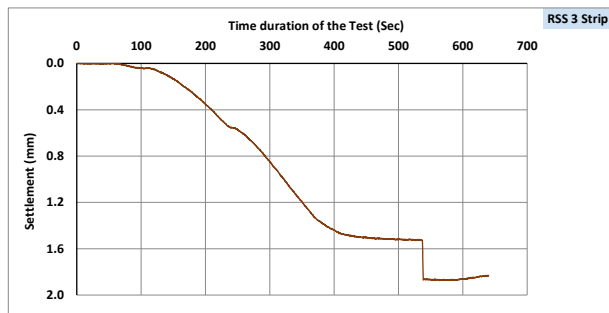


شکل ۶. نمودار افزایش شتاب تا رسیدن به مرحله بارگذاری.

شده و پس از باربرداری، سطح شیروانی به مقدار قابل توجهی به حالت اولیه برگشته است. محل گسیختگی مسلح کننده ها در شکل های ۶ و ۸ و جدول ۹ نشان می دهد که گسیختگی از لایه های بالایی (لایه ششم تا چهارم) شروع شده و با کاهش ارتفاع دیوار در بخش های پایینی (لایه سوم و دوم) لایه ها صرفاً دچار کشش شده است. همچنین پایین ترین لایه (لایه اول) بدون تغییر ظاهری باقی مانده است.

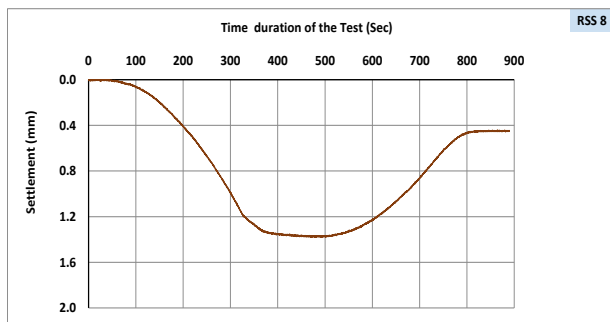


ب - آزمایش شماره ۲، تحت بارگذاری صفحه مربعی شکل

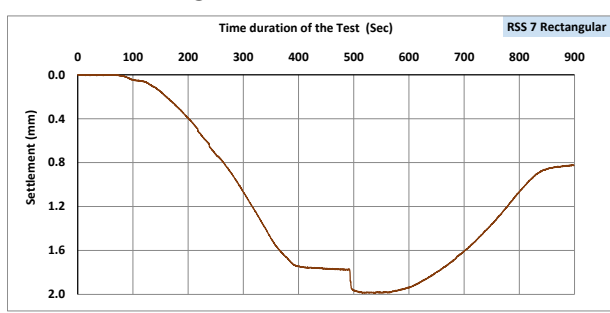


د - آزمایش شماره ۴، تحت بارگذاری صفحه نواری شکل

• آزمایش شماره ۳ (RSS 07) مدل آزمایش RSS 07 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. نشست سطح شیروانی در فاصله ۲۳۰ میلی متری نسبت به لبه شیروانی در کل محدوده آزمایش در شکل ۷ ارائه شده است. چنانچه مشاهده می شود با افزایش بار، نشست به طور پیوسته افزایش یافته است. همچنین ملاحظه می شود با اتمام بارگذاری نشست متوقف



الف - آزمایش شماره ۱، بدون مسلح کننده

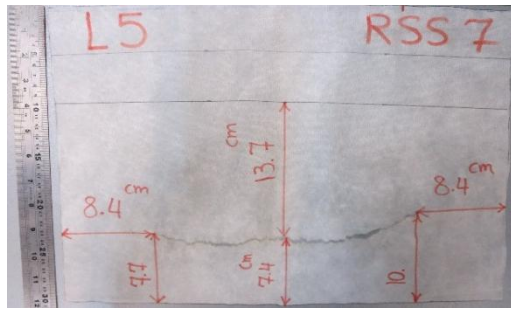


ج - آزمایش شماره ۳، تحت بارگذاری صفحه مستطیلی شکل

شکل ۷. نمودار نشست سطح شیبدار مدل های مورد بررسی از ابتدا تا انتهای آزمایش.

جدول ۹. محل گسیختگی ژئوتکستایل پس از بارگذاری در آزمایش RSS 07.

Reinforcement Layers	Observation after Test	Geotextile Elongation (%)
Layer 6	Failure	Torn
Layer 5	Failure	Torn
Layer 4	Failure	Torn
Layer 3	Elongation	5
Layer 2	Elongation	2.5
Layer 1	No change in length	0



ب - مسلح کننده لایه پنجم



الف - تغییر شکل رویه مدل و نشست پی؛ نما از روبرو

شکل ۸. تغییر شکل های بوجود آمده در پایان آزمایش RSS 07

جدایش بین مسلح کننده ها رخ نداده است. لایه های پایینی (لایه دوم) صرفاً دچار کشش شدند و لایه اول بدون تغییر ظاهری مانده است.

جدول ۱۰. محل گسیختگی ژئوتکستایل پس از بارگذاری در

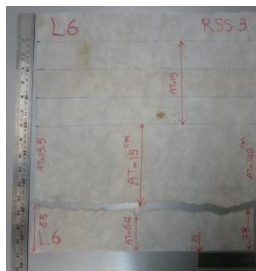
آزمایش RSS 03

Reinforcement Layers	Observation after Test	Geotextile Elongation (%)
Layer 6	Failure	Torn
Layer 5	Failure	Torn
Layer 4	Failure	Torn
Layer 3	Failure	Torn
Layer 2	Elongation	5
Layer 1	No change in length	0

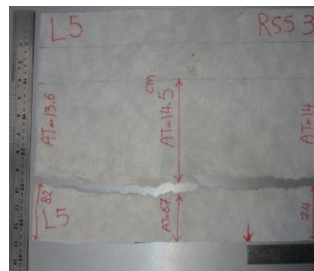
• آزمایش شماره ۴ (RSS 03)

نشست سطح شیروانی تحت بارگذاری صفحه نواری شکل به ابعاد $39 \times 7/5$ در فاصله $224/5$ میلی متری نسبت به لبه شیروانی (نقطه d1 شکل ۲) در کل محدوده آزمایش در شکل ۵ ارائه شده است. چنانچه ملاحظه می شود با افزایش بار، نشست به طور پیوسته افزایش یافته است. همچنین مشاهده می شود پس از اتمام بارگذاری نشست متوقف شده است.

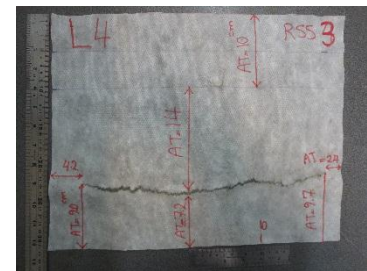
مشخصات اندازه گیری و محل گسیختگی مسلح کننده ها در شکل های ۹ و ۱۰ و جدول ۱۰ نشان می دهد که پارگی کامل در لایه های بالایی (لایه ششم و پنجم) اتفاق افتاده است. با کاهش ارتفاع دیوار خاک مسلح در لایه های میانی (لایه چهارم و سوم) فقط گسیختگی در لایه ها اتفاق افتاده و



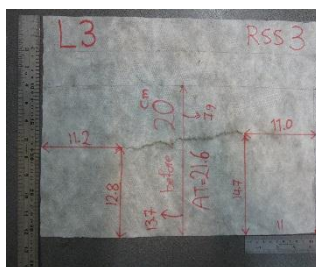
مسلح کننده لایه ششم



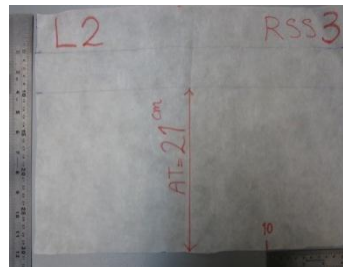
مسلح کننده لایه پنجم



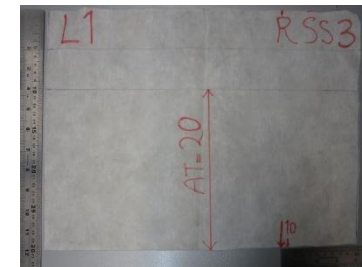
مسلح کننده لایه چهارم



مسلح کننده لایه سوم



مسلح کننده لایه دوم



مسلح کننده لایه اول

شکل ۹. تغییر شکل های بوجود آمده در ژئوتکستایل ها در پایان آزمایش RSS 03

شیروانی نشان داده شده است. در شرایط یکسان فاصله از لبه شیروانی، مقدار باربری شیب خاک مسلح برای سطوح مربعی کمترین (RSS 02) و سطوح نواری (RSS 03) بیشترین مقدار است.

۳-۳. ظرفیت باربری شیروانی خاک مسلح

در این بخش نتایج آزمایش سطح های مربعی و مستطیل، نواری شکل از لبه شیروانی مورد مقایسه قرار گرفته و تأثیر پارامترهای ذکر شده بر رفتار شیروانی بررسی شده است. در جدول ۱۱ مقدار باربری نهایی مدل‌ها تحت بارگذاری های مختلف نواری، مربعی و مستطیلی برای دو فاصله مختلف از

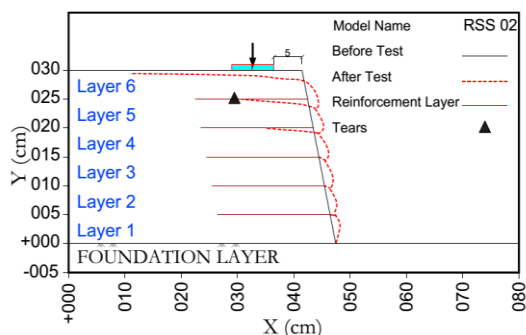
جدول ۱۱. بار نهایی حاصل از گسیختگی و نشست متناظر.

Test No. (Test label)	#2 (RSS 02)	#3 (RSS 07)	#4 (RSS 03)
Shape of Loading	Square	Rectangular	Strip
Distance of the Foundation from the edge (mm)	50	50	50
Ultimate Load (N)	3172.8	5548.2	8461.5
Foundation settlement (mm)	48.79	30.85	35.32

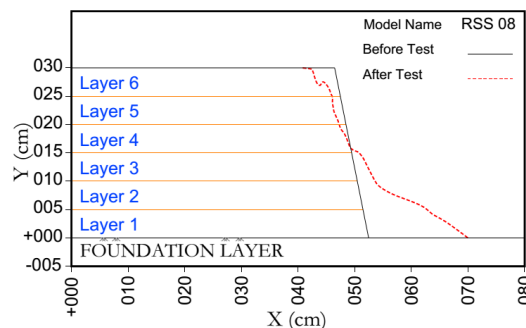
شده‌اند. چنانچه ملاحظه می‌شود با ثابت بودن فاصله سطح بارگذاری از لبه شیروانی، جابجایی های افقی به طور متوسط برای سطح نواری بیشترین مقدار و سطح مربعی کمترین مقدار را دارد.

۴-۳. جابجایی های افقی شیروانی خاک مسلح

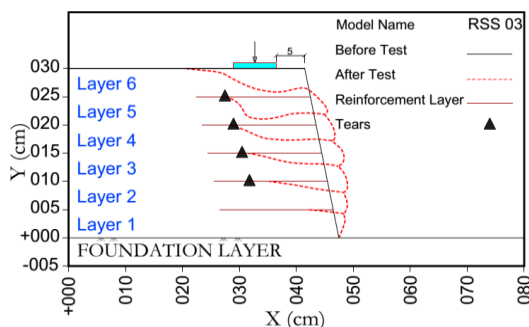
تأثیر سطح بارگذاری بر جابجایی های افقی نهایی رویه دیوار و مکانیزم گسیختگی جانبی و محل پارگی ژئوتکستایل ها در شکل ۱۰ با استفاده از پردازش تصویر و با مقیاس نشان داده شده است. این جابجایی‌ها در آخرین مرحله بارگذاری ثبت



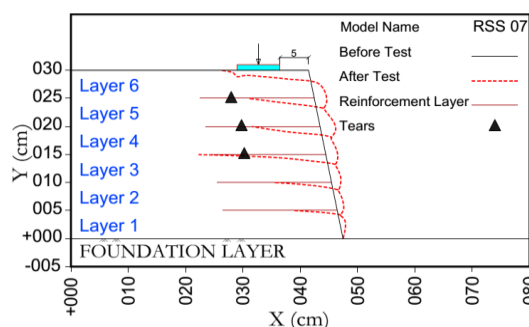
ب - آزمایش شماره ۲، تحت بارگذاری صفحه مربعی شکل



الف - آزمایش شماره ۱، بدون مسلح کننده



د - آزمایش شماره ۴، تحت بارگذاری صفحه نواری شکل



ج - آزمایش شماره ۳، تحت بارگذاری صفحه مستطیلی شکل

شکل ۱۰. نمودار نهایی جابجایی افقی رویه دیوار و محل گسیختگی ژئوتکستایل.

بیشتر شده و لایه‌های مسلح کننده بیشتری در عمق، تحت تأثیر بارگذاری قرار خواهند گرفت.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله، به بررسی اثر نوع سربار بر شیب خاک مسلح شده با ژئوتکستایل پرداخته شده است. برای رسیدن به این هدف شیب خاک مسلح و همچنین سازه خاکی تقویت نشده ابتدا توسط سانتیفریوژ تحت بار شتاب $30g$ قرار گرفته سپس بار عمودی به روی سطح سازه وارد می‌گردد. در این تحقیق، پارامترهایی نظیر شکل هندسه بارگذاری: مربعی، مستطیلی و نواری که دارای عرض یکسان بودند و همچنین فاصله بار از لبه سطح شیب دار خاک مسلح در فاصله ۵۰ میلیمتری مورد بررسی قرار گرفته و مکانیزم گسیختگی، ظرفیت باربری، شرایط ژئوتکستایل قبل و بعد از گسیختگی آنالیز گردید. در این بخش نتایج به دست آمده به صورت خلاصه ارائه شده است:

- با انجام آزمایشات مذکور ملاحظه شد که تمامی نمونه هایی خاک مسلح ساخته شده تا شتاب نهایی $30g$ سالم ماندند و بعد از اعمال بارگذاری قائم دچار تغییر شکل و گسیختگی شدند. این در حالیست که اساساً نمونه شاهد (فاقد مسلح کننده ژئوتکستایل) تحمل و پایداری رسیدن به شتاب $30g$ را نداشتند.
- 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) به میزان ظرفیت باربری نهایی افزوده خواهد شد.
- نوع نمودارهای بار نشست در پی‌های مختلف نشان می‌دهد با تغییر شکل پی از نواری به مربعی نوع گسیختگی از کلی به گسیختگی پانچ تغییر می‌کند.
- بررسی جابجایی‌های افقی نهایی دیوار در ترازهای مختلف نشان می‌دهد که با ثابت بودن فاصله پی از لبه شیروانی، جابجایی‌های افقی به طور متوسط برای پی مستطیلی بیشترین مقدار و پی مربعی کمترین مقدار را دارد.

آزمایش شماره ۱ (شیب فاقد ژئوتکستایل) در شتاب $3/37g$ گسیخته شد که در واقعیت می‌توان با مشخصات و تراکم شرح داده شده، سازه ای به ارتفاع $117/95$ سانتیمتر بدون مسلح کننده ژئوتکستایل بنا نمود که فقط توانایی تحمل وزن خود را دارد. از طرفی دیگر سه مدل مسلح شده با ژئوتکستایل (آزمایش های ۲ تا ۴) علاوه بر تحمل وزن و سربار اعمالی در شتاب $30g$ ، حداقل مساحت تقریبی $14/9$ مترمربع در ارتفاع $10/5$ متری از کف زمین در واقعیت را بهسازی نموده است. گسیختگی مدل فاقد مسلح کننده، از لبه شیب شروع شده و تا لایه چهارم گسترش کمی داشته و بلافاصله از لایه سوم ریزش پرحجم اتفاق می‌افتد و پایین شیب دچار خسارت فراوانی می‌شود، در حالیکه در مدل‌های مسلح شده با ژئوتکستایل خرابی عمده‌ای مشاهده نمی‌شود و سازه‌ها علاوه بر تحمل نیروی وارد با گسیختگی جدی مواجه نمی‌شوند و مدل‌ها با تحمل تغییر شکل های افقی پایدار مانده اند. همانطوریکه در شکل ۱۰ نشان داده شده است، مکانیزم گسیختگی در تمامی مدل‌های مسلح شده با ژئوتکستایل از امتداد پی شروع شده و به لایه های پایینی گسترش پیدا می‌کند، شروع مکانیزم گسیختگی مطابقت خوبی با محل گسیختگی و پارگی ژئوتکستایل‌ها در لایه ششم تمامی مدل‌ها دارد. مقدار جابجایی و تخریب افقی فقط در آزمایش های ۲ و ۳ (به ترتیب مدل‌های تحت سربار مربعی و مستطیلی شکل) در لایه های اول تا سوم همانند یکدیگر بوده و در هیچ کدام از مدل‌های مسلح شده با ژئوتکستایل ریزش رخ نداده است ولی در آزمایش شماره ۱ (مدل فاقد مسلح کننده) محدوده ای نزدیک به ۶ متر در واقعیت تحت تاثیر ریزش خاک ماسه ای قرار گرفت. با بررسی المان‌های مسلح کننده خاک در لایه‌های مختلف به لحاظ گسیختگی و افزایش طول، مشخص گردید که به طور کلی گسیختگی و افزایش طول ژئوتکستایل‌ها و همچنین عمق سطح گسیختگی شیروانی برای پی‌های با عرض یکسان در شکل نواری بیشترین مقدار و در پی مربعی کمترین مقدار است. به بیان دیگر با افزایش سطح بارگذاری عمق تأثیر تنش

منابع

- جلیل زاده، ز.، حاجی علیلوی بناب، م.، کاتبی، ه.، ۲۰۱۸. بررسی آزمایشگاهی دیوار گود پایدار شده با ترکیب میخ‌کوبی و مهارگذاری. نشریه انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران ۱۱(۲)، ۳۳-۴۴.
- Aklil, P., Wu, W., 2013a. Centrifuge model tests on foundation on geosynthetic reinforced slope [D]. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013
- Aklil, P., Wu, W., 2013b. Centrifuge model tests on foundation on geosynthetic reinforced slope [D]. Vienna, Austria: University of Natural Resources and Life Sciences.
- Arriaga, F., 2004. Responses of geosynthetic-reinforced structures under working stress and failure conditions, University of Colorado at Boulder.
- Bathurst, R., Walters, D., Vlachopoulos, N., Burgess, P., Allen, T., 2000. Full scale testing of geosynthetic reinforced walls, *Advances in transportation and geoenvironmental systems using geosynthetics*, pp. 201-217.
- Bolton, M., Pang, P., 1982. Collapse limit states of reinforced earth retaining walls. *Geotechnique* 32(4), 349-367.
- Bolton, M.D., Choudhury, S.P., Pang, P., 1978. Reinforced earth walls: a centrifugal model study, *Proceedings of Symposium on Earth Reinforcement*. ASCE: American Society of Civil Engineers, pp. 252-281.
- Christopher, B.R., Elias, V., 1997. *Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines*, United States. Federal Highway Administration.
- Elgamal, A.-W., 1991. Design, construction and operation of 100 g-ton centrifuge at RPI. *Centrifuge* 91, 27-34.
- Fannin, R., Hermann, S., 1990. Performance data for a sloped reinforced soil wall. *Canadian Geotechnical Journal* 27(5), 676-686.
- Goodings, D., Santamarina, J., 1989. Reinforced earth and adjacent soils: centrifuge modeling study. *Journal of geotechnical engineering* 115(7), 1021-1025.
- Guler, E., Cicek, E., Demirkan, M.M., Hamderi, M., 2012. Numerical analysis of reinforced soil walls with granular and cohesive backfills under cyclic loads. *Bulletin of Earthquake Engineering* 10(3), 793-811.
- Güler, E., Goodings, D.J., 1992. Centrifuge models of clay-lime reinforced soil walls, *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*. ASCE, pp. 1249-1260.
- Guler, E., Ocbe, C., 2003. 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), 15-23.
- Haza, E., Gotteland, P., Gourc, J.-P., 2000. Design method for local load on a geosynthetic reinforced soil structure. *Geotechnical & Geological Engineering* 18(4), 243-267.
- JONES, J., 2002. *Guide to Reinforced Fill Structure And Slope Design*.
- Khoshnevis Ansari, A., 2015. *Three dimensional stability of reinforced soil bridge abutments by upper bound limit analysis method*, University of Tehran.
- Madabhushi, G., 2014. *Centrifuge modelling for civil engineers*. CRC Press.
- Matichard, M., Blivet, J., Garnier, J., Delmas, P., 1988. Etude en grandes deformations d'ouvrages de soutènement renforcés par géotextile, *International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling*, Jean Francois Corte, ed. Paris pp. 273-281.
- Matsuo, O., Yokoyama, K., Saito, Y., 1998. Shaking table tests and analyses of geosynthetic-reinforced soil retaining walls. *Geosynthetics International* 5(1-2), 97-126.
- Mitchell, J., Jaber, M., Shen, C., Hua, Z., 1988. Behavior of reinforced soil walls in centrifuge model tests, In: *Proceedings of Centrifuge '88*, Paris, France, pp. 259-271.
- Moein, B., Bazargan, J., Derakhshani, A., 2015. Evaluate the behavior of geosynthetic reinforced soil walls in centrifuge modeling and large-scale model under surcharge, 10TH INTERNATIONAL CONGRESS ON CIVIL ENGINEERING. University of Tabriz - Faculty of Civil Engineering.
- Porbaha, A., Goodings, D., 1994. Geotextile reinforced cohesive slopes on weak foundations, *Proceedings of Centrifuge*, pp. 623-628.

- Rojhani, M., Moradi, M., Galandarzadeh, A., Takada, S., 2012. Centrifuge modeling of buried continuous pipelines subjected to reverse faulting. *Canadian Geotechnical Journal* 49(6), 659-670.
- Sommers, A., Viswanadham, B., 2009. Centrifuge model tests on the behavior of strip footing on geotextile-reinforced slopes. *Geotextiles and Geomembranes* 27(6), 497-505.
- Taylor, R.e., 2003. *Geotechnical centrifuge technology*. CRC Press.
- Thamm, B., Krieger, B., Krieger, J., 1991. 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 V1 P3-8. Publ Rotterdam: AA Balkema, 1990, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Pergamon, pp. A384.
- TSR101, 2013. General technical specifications of the road 101, *Geosynthetics in road construction*. Plan and Budget organization, president of the Islamic Republic of Iran, Tehran, IRAN.
- Wichter, L., Risseeuw, P., Gay, G., 1986. Large scale test on bearing behaviour of a woven reinforced earth, *Proceeding of the 3rd International Conference on Geotextiles*, Vienna, Austria, pp. 1073-1078.
- Won, M.-S., Kim, Y.-S., 2007. Internal deformation behavior of geosynthetic-reinforced soil walls. *Geotextiles and Geomembranes* 25(1), 10-22.
- Won, M., Kim, Y., Lee, K., 2008. A study on the deformation behavior of laboratory geosynthetics reinforced soil walls, *Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering*. Springer, pp. 291-294.
- Wong, K., Broms, B., Chandrasekaran, B., 1994. Failure modes at model tests of a geotextile reinforced wall. *Geotextiles and Geomembranes* 13(6-7), 475-493.
- Wood, D.M., 2003. *Geotechnical modelling*, 1. CRC Press.
- Yoo, C., Kim, S.-B., 2008. 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), 460-472.
- Zohdi Tavassoli, H., 2010. Three dimensional Analysis of reinforced soil slopes with upper bound limit analysis method using laminar blocks, University of Tehran.
- Zornberg, J.G., 1994. Performance of geotextile-reinforced soil structures, University of California, Berkeley.
- Zornberg, J.G., Arriaga, F., 2003. Strain distribution within geosynthetic-reinforced slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 129(1), 32-45.
- Zornberg, J.G., Sitar, N., Mitchell, J.K., 1998. Performance of geosynthetic reinforced slopes at failure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 124(8), 670-683.