

اثر درصد ریزدانه در رفتار دیوارهای ماسه‌یی مسلح شده تحت اثر سربار در دستگاہ سانتریفیوژ

حمیدرضا رازقی* (دانشیار)

راهین ریاحی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمدرضا غلامشاهی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایرانمهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۷ (ص. ۶۹-۷۷)
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۱/۴، ص. ۶۹-۷۷

دیوارهای خاک مسلح، جایگزینی مطمئن برای دیوارهای حائل متداول هستند و در سال‌های اخیر، استفاده از ژئوسینتتیک‌ها به عنوان مسلح‌کننده منجر به رواج بیشتر دیوارهای مذکور شده است. از جمله کاربردهای دیوارهای خاک مسلح، استفاده در کوله‌ی پل‌ها و قرارگیری پی مربوط به عرشه‌ی پل بر روی آن‌هاست. در پژوهش حاضر، تأثیر وجود ریزدانه، سربار نواری و شیب نمای دیوار در حالت اشباع در رفتار دیوارهای خاک مسلح ژئوسینتتیکی با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی در دستگاہ سانتریفیوژ مطالعه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهند که وجود ریزدانه در خاک ماسه‌یی در حالت اشباع با درصد کم باعث بهبود عملکرد و با درصد زیاد باعث ضعف کارکرد دیوار خاک مسلح می‌شود.

واژگان کلیدی: دیوار خاک مسلح، ژئوسینتتیک، ریزدانه، اشباع، سانتریفیوژ.

razeghi@iust.ac.ir
riahira@gmail.com
m.gh6911@yahoo.com

۱. مقدمه

نیز خاک‌های با درصد بالای ریزدانه، گستره‌ی زیادی دارند و از لحاظ آیین‌نامه‌یی برای احداث دیوارها و شیروانی‌های خاک مسلح مناسب نیستند، بنابراین در ایران، مطالعه بر روی سازه‌های مطرح شده اهمیت ویژه‌ی دارد. لذا در سال‌های اخیر، مطالعات عددی و آزمایشگاهی مختلفی بر روی آن‌ها صورت گرفته است.

برای نمونه در سال ۲۰۱۴، آزمایش‌های بزرگ مقیاسی بر روی دیوارهای مسلح شده با ژئوگرید^۱ که حاوی ریزدانه هستند، انجام شده است.^[۹] آزمایش‌های صورت گرفته روی دیوارهای مسلح شده با ژئوگرید نشان می‌دهد که استفاده از ژئوگرید سخت‌تر، یکی از گزینه‌های مناسب به منظور کاهش مسائل موجود در خاک‌های ماسه‌یی حاوی ریزدانه است.^[۱۰] استفاده از ژئوتکتایل‌ها^۲ نیز به منظور مسلح کردن دیوارهای خاک مسلح در سال‌های اخیر توسعه پیدا کرده و بررسی‌ها نشان داده است که استفاده از آن‌ها در دیوارهای خاک مسلح حاوی ریزدانه، روشی مؤثر برای افزایش پایداری دیوار است.^[۱۱] برخی پژوهشگران (۲۰۱۵) نیز با مطالعات عددی اثر لایه‌های هیبرید - ژئوسینتتیک^۳ را در یک شیب تحت اثر بارش باران بررسی کردند و نشان دادند که پایداری استاتیکی شیب‌های مذکور در مقایسه با شیب‌های مسلح نشده تحت شدت‌های مختلف بارش به‌طور قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند.^[۱۲]

از جمله کاربردهای دیوارهای خاک مسلح، استفاده از آن‌ها به عنوان کوله‌ی پل است. در این حالت پی مربوط به عرشه‌ی پل به صورت یک پی نواری در نزدیکی تاج دیوار قرار می‌گیرد. در پژوهشی در سال ۲۰۱۳، با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی نشان داده شد که کاربرد مسلح‌کننده با فواصل مناسب، باعث

استفاده از نی و کاه برای بهبود کیفیت آجرهای خشتی به زمان انسان‌های اولیه باز می‌گردد. تعداد زیادی از انسان‌های اولیه از چوب و شاخه‌ها برای مسلح ساختن خانه‌های گلی استفاده می‌کردند. روش‌های مدرن مسلح‌سازی خاک برای دیوارهای حائل در دهه‌ی ۶۰ میلادی استفاده شد که به خلق و توسعه‌ی خاک مسلح منتهی شد.^[۱] استفاده از دیوارهای خاک مسلح در ایران به دهه‌ی ۵۰ شمسی باز می‌گردد.^[۲] در سال ۲۰۰۱، به منظور تحلیل پایداری دیوارهای خاک مسلح روشی ارائه شد،^[۳] که به دنبال آن، مطالعات تحلیلی صورت گرفته منجر به تحلیل گسیختگی پیش‌رونده در دیوارهای خاک مسلح شد.^[۴]

روش‌ها و آیین‌نامه‌های طراحی موجود در کشورهای مختلف، توصیه‌هایی در مورد مصالح مناسب دیوار خاک مسلح ارائه کرده‌اند.^[۵] بیشینه‌ی مقدار ریزدانه در مصالح خاگریز در آیین‌نامه‌ی AASHTO و دستورالعمل ۲۰۰۱ FHWA به ۱۵٪ محدود شده است،^[۶] در حالی که در آیین‌نامه‌ی NCMA، که آیین‌نامه‌ی بومی کشور کاناداست، مقدار مذکور برابر ۳۵٪ است.^[۸] از طرف دیگر، عدم دسترسی به مصالح مناسب در برخی مناطق و تأمین آن از مناطق دوردست، هزینه‌های زیادی در بردارد و حتی ممکن است مزیت اقتصادی بودن دیوارهای خاک مسلح را تحت تأثیر قرار دهد. این امر به عنوان یک چالش اساسی در مناطقی که قسمت اعظم آن‌ها از خاک ریزدانه تشکیل شده است، مطرح است. در مناطق مختلف ایران

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۹/۶، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱۱/۱۶، پذیرش ۱۳۹۵/۱۱/۳۰

DOI: 10.24200/J30.2019.1431

جدول ۱. ضرایب مقیاس در مدل‌سازی سانتریفیوژی.

کمیت	مدل	سازه‌ی واقعی
شتاب	N	۱
طول	۱	N
مساحت	۱	N^2
حجم	۱	N^3
سرعت	۱	۱
جرم	۱	N^3
نیرو	۱	N^2
انرژی	۱	N^3
تنش	۱	۱
کرنش	۱	۱
جرم حجمی	۱	۱
زمان (در مسائل دینامیکی)	۱	N
زمان (در مسائل انتشار)	۱	N^2

جدول ۲. ضرایب مقیاس در شبیه‌سازی خاک - المان مسلح‌کننده.

نسبت سازه‌ی واقعی به مدل	کمیت	نسبت سازه‌ی واقعی به مدل
۱	پارامترهای مقاومت برشی (c, φ)	خاک
۱	رفتار تنش - کرنش	خاک
N	مقاومت کششی (T_{ult})	المان مسلح‌کننده
N	مدول (J)	المان مسلح‌کننده
۱	مقاومت برشی سطح مشترک	سطح مشترک
۱	رفتار تنش - کرنش سطح مشترک	خاک - مسلح‌کننده

جدول ۳. مشخصات پی‌های نواری قرارگرفته بر روی مدل‌ها.

پی نواری	ابعاد (mm)	جرم (kg)	تنش در شتاب $1g$ (kN/m^2)
A	40×160	۲,۲۹۰	۳,۵
B	40×160	۲,۶۱۰	۴

طول پی برابر با عرض جعبه‌ی ساخت مدل باشد، اندرکنش بین جداره‌های جعبه و قسمت‌های انتهایی پی باعث ایجاد یک نیروی مقاوم می‌شود و از میزان بار منتقل شده از پی به سطح خاک کم می‌کند.^[۱۵] طبق گزارش ارائه‌شده‌ی دیگری،^[۱۶] میانگین تنش اعمال شده از پی سطحی عرشه به سطح بالایی کوله‌ی پل (kPa) ۲۰۰ عنوان شده است. از این جهت به منظور بررسی تأثیر میزان سربار نواری در رفتار دیوارهای خاک مسلح ژئوسنتتیکی، وزن پی‌های نواری به گونه‌ی انتخاب شده است که با این موضوع منطبق باشد. جدول ۳، مشخصات پی نواری استفاده‌شده در پژوهش حاضر و تنش ناشی از آن را در شتاب $1g$ نمایش می‌دهد. فشار (kPa) ۴ در شتاب $5g$ ، معادل (kPa) ۲۰۰ است.

این موضوع که از ابتدای آزمایش، به سازه‌ی حاکی بار وارد شود، باعث می‌شود که نشست و تراکم خاک مدل نسبت به حالتی که از جک بارگذاری استفاده شود،

ایجاد عملکرد مناسب و ایجاد مقدار بیشینه‌ی ظرفیت باربری پی نواری در نزدیکی دیوار حائل ماسه‌ی مسلح می‌شود.^[۱۳] در پژوهش حاضر سعی شده است عملکرد سازه‌های خاک مسلح ذکرشده در شرایط اشباع و درصدهای مختلف ریزدانه‌ی خاک دیوار بررسی شود. از این جهت تلاش شده است با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی صورت‌گرفته در دستگاه سانتریفیوژ^۴، تأثیر عواملی همچون وجود ریزدانه در خاک دیوار، وجود سربار نواری روی تاج دیوار و تغییر شیب نمای دیوار بر روی رفتار دیوارهای خاک مسلح مطالعه شود.

۲. اصول مدل‌سازی سانتریفیوژی و قوانین مقیاس

قوانین مقیاس را می‌توان با استفاده از تحلیل ابعادی و یا بررسی معادلات دیفرانسیلی حاکم به دست آورد. مدل‌های فیزیکی با توجه به اعمال ضرایب کوچک‌نمایی براساس پروژه‌ها با ابعاد واقعی ساخته می‌شوند. بنابراین مشخصات مصالح و المان‌ها در مدل فیزیکی باید به دقت مقیاس شوند، تا بتوان رفتار سازه‌ی واقعی را از آن‌ها انتظار داشت و خطاهای ناشی از اثر مقیاس را به میزان کمینه رسانید. از طرفی ماهیت رفتار سازه‌های ژئوتکنیکی^۵ وابسته به تنش است و بسته به سطح تنش وارده، رفتار متفاوتی را نشان می‌دهند. اما اگر بتوان به طریقی شرایط تنش در نقاط متناظر مدل و واقعیت را با هم یکسان کرد، آنگاه تا حدود بسیار زیادی مشکل ناشی از خطاهای اثر مقیاس ناچیز می‌شود. سانتریفیوژ ژئوتکنیکی دستگاهی است که با افزایش موضعی شتاب گرانشی توسط دوران، کاهش تنش ناشی از کوچک شدن مدل را جبران می‌کند. جهت آشنایی و مقایسه‌ی قوانین مقیاس در مدل‌های سانتریفیوژ و مدل‌های $1g$ ، ضرایب مقیاس رایج در مدل‌های سانتریفیوژ در جدول ۱ ارائه شده است. علاوه بر آن، قوانین مقیاس برای شبیه‌سازی خاک، المان مسلح‌کننده و خصوصیات سطح مشترک خاک - المان مسلح‌کننده به دست آمده از جدول ۱ در جدول ۲ ارائه شده است. این روابط مقیاس با فرض تشابه خاک در مدل و سازه‌ی اصلی و نیز استفاده از المان‌های صفحه‌ی در مدل به دست آمده‌اند.

۳. آزمایش مدل‌ها

۳.۱. تجهیزات آزمایش

در پژوهش حاضر از دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی دانشگاه علم و صنعت ایران استفاده شده است، که دستگاهی با بازوی دوران ۸۵ سانتی‌متر، بیشینه‌ی ظرفیت $(ton - g)$ ۱۴ و بیشینه‌ی شتاب گریز از مرکز (g) ۲۰۰ است.^[۱۴] همچنین به منظور ساخت مدل‌ها از یک جعبه‌ی مقاوم از جنس ورق گالوانیزه با ابعاد داخلی به طول ۵۰۰، عرض ۱۸۰ و ارتفاع ۱۷۳ میلی‌متر استفاده شده است. در دو صفحه‌ی جانبی جعبه‌ی ساخت مدل، از صفحات پلکسی‌گلاس شفاف با ضخامت ۵ میلی‌متر استفاده شده است، تا بتوان مقاطع جانبی مدل را در حین ساخت مدل و در طول آزمایش بازبینی کرد. به منظور ضبط تصاویر مدل در طول آزمایش جهت انجام تحلیل دیجیتالی تصاویر در پایان آزمایش، از یک عدد دوربین دیجیتال استفاده شده است، که قابلیت عکس‌برداری با کیفیت ۱۸/۲ مگاپیکسل و ضبط فیلم با سرعت ۶۰ فریم در ثانیه را داشت.

پی نواری انتخاب‌شده در پژوهش حاضر مشابه با حالت پایه‌ی پل قرارگرفته در نزدیک تاج دیوار بود و سطح مقطعی به عرض $B = 40$ (mm) و طول $L = 160$ (mm) داشت. برخی پژوهشگران (۲۰۰۹) نشان داده‌اند در حالتی که

بیشتر باشد و این مسئله به این دلیل است که با توجه به ضرایب مقیاس زمان در دستگاه‌های سانتریفیوژ، مدت زمان بارگذاری در حالتی که سربار نواری از ابتدای آزمایش روی مدل قرار دارد، نسبت به حالتی که از جک بارگذاری استفاده می‌شود بسیار بیشتر است. به عبارت دیگر، می‌توان عنوان کرد که نوع عملکرد مدل در این دو حالت با یکدیگر متفاوت است.

۲.۳. مصالح مدل سازی ۱.۲.۳. خاک

در پژوهش حاضر، جهت مدل سازی خاک دیوار مسلح شده با ژئوتکستایل از مخلوط ماسه‌ی استاندارد ۱۶۱ فیروزکوه (ماسه‌ی سیلیسی شکسته) و رس کائولین استفاده شده است. جدول ۴، ترکیب درصدهای مختلف استفاده شده‌ی مصالح مذکور را در خاک مدل نشان می‌دهد. براساس سیستم طبقه‌بندی متحد، خاک ماسه‌ی مورد استفاده در پژوهش حاضر در گروه خاک‌های SM قرار می‌گیرد.

آزمایش تراکم پروکتور اصلاح شده طبق دستورالعمل ASTM D1557 روی خاک مخلوط انجام و $\gamma_{d \max}$ و درصد رطوبت بهینه (w_{opt}) برای خاک مخلوط به دست آمد. $\gamma_{d \min}$ نیز طبق دستورالعمل ASTM D4254 برای مخلوط اندازه‌گیری شد. تراکم نسبی خاک در مدل‌ها برابر ۶۵٪ و خاک در حالت اشباع است. جدول ۵، مشخصات مخلوط خاک‌ها را نشان می‌دهد.

۲.۲.۳. مسلح‌کننده

ژئوتکستایل مورد استفاده در مدل سازی مذکور، کاربرد غیرسازه‌ی داشت، لیکن طوری انتخاب شد که رفتار تنش - کرنش ژئوتکستایل سازه‌ی اصلی و برهم کنش خاک - ژئوتکستایل را به درستی مدل کند. ژئوتکستایل مورد استفاده از نوع بافته نشده بود که در جدول ۶ برخی مشخصات مقاومتی آن ارائه شده است.^[۱۷]

۳.۳. مشخصات آزمایش‌ها

در پژوهش حاضر، ۸ آزمایش سانتریفیوژی انجام شده است که در آن‌ها پارامترهای متغیر شامل درصد ریزدانه‌ی خاک (F)، میزان سربار نواری (q) و شیب نمای دیوار (θ) است و سایر پارامترها نظیر فاصله‌ی عمودی مسلح‌کننده، درصد تراکم خاک، ارتفاع مدل و نوع مسلح‌کننده ثابت در نظر گرفته شد. در جدول ۷، خلاصه‌ی مشخصات نمونه‌های آزمایش شده در پژوهش حاضر ارائه شده است.

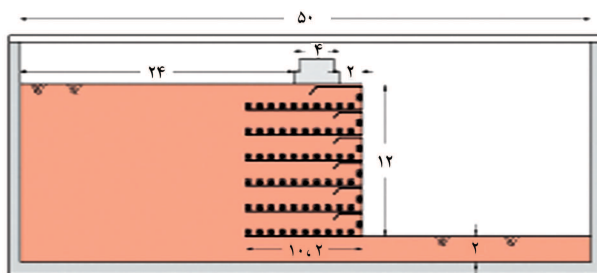
در تمامی مدل‌ها، به منظور ایجاد یک نمای اعطاف پذیر در دیوار برای قرار دادن المان‌های مسلح‌کننده از روش برگشتی^۶ استفاده شد که در آن طول مسلح‌کننده،

جدول ۴. ترکیب خاک‌های استفاده شده در مخلوط خاک مدل‌ها.

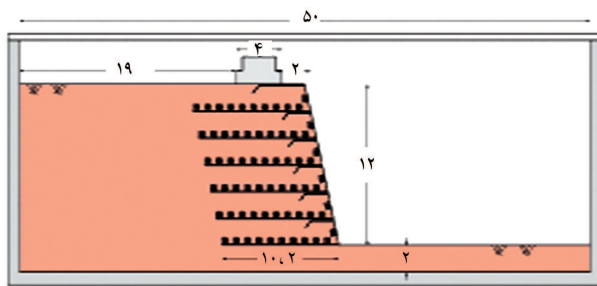
نام مخلوط	ماسه (درصد)	رس کائولین (درصد)
خاک ۱۰٪ ریزدانه	۹۰	۱۰
خاک ۲۰٪ ریزدانه	۸۰	۲۰

اضافه‌تر در نظر گرفته می‌شود و پس از مقداری خاکریزی، مسلح‌کننده بر روی نمای دیوار امتداد می‌یابد و پس از تکمیل خاکریزی به میزان ضخامت طراحی، روی آن پوشانده و در نهایت امتداد آن در خاک همان لایه مدفون می‌شود. جهت کمیته‌سازی لغزش المان مسلح‌کننده در خاک با توجه به تجربیات موجود در مدل‌سازی‌های مشابه در دستگاه سانتریفیوژ^[۱۵] نسبت طول مسلح‌کننده (L) به ارتفاع دیوار (H) در تمامی مدل‌ها ثابت و برابر با ۰٫۸۵ انتخاب شد ($L/H = 0.85$) که با توجه به ارتفاع ۱۲۰ میلی‌متری دیوار خاک مسلح برابر با ۱۰۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین نسبت طول برگشتی المان‌های مسلح‌کننده (L') به ارتفاع دیوار (H) برابر ۰٫۲۲ انتخاب شد ($L'/H = 0.22$) که برابر با ۲۶٫۴ میلی‌متر به دست آمد. برای جلوگیری از گسیختگی موضعی در بالاترین لایه، نسبت طول برگشتی لایه‌ی فوقانی المان مسلح‌کننده (L'_0) به ارتفاع دیوار (H) برابر با ۰٫۴ انتخاب شد ($L'_0/H = 0.4$) که برابر با ۴۸ میلی‌متر به دست می‌آید.^[۱۵] شکل ۱ (الف و ب)، نمایی شماتیک از مدل‌های دیوار به ترتیب قائم و مایل را نشان می‌دهد.

اصطکاک و چسبندگی بین دیواره‌های جعبه‌ی ساخت مدل و خاک می‌تواند در نتایج تأثیر بگذارد، از این جهت آزمایش‌ها به گونه‌ی طراحی شدند که شرایط کرنش صفحه‌ی بدون هیچ اثر مرزی ایجاد شود. راه حل پیشنهادی برای کمیته‌سازی خطا در ایجاد شرایط کرنش صفحه‌ی، استفاده از مدل‌های با عرض زیاد و یا کاهش اصطکاک در سطوح مرزی نمونه است. در پژوهش حاضر، اصطکاک در سطوح جانبی مدل با به‌کار بردن یک لایه‌ی نازک ژل پترولیوم کاهش یافت. با روش مذکور، اثر اصطکاک کاهش می‌یابد و شرایط آزمایش به حالت کرنش صفحه‌ی نزدیک می‌شود.



شکل ۱ (الف) قائم



شکل ۱ (ب) مایل (ابعاد بر حسب cm).

شکل ۱. نمایی شماتیک از مدل‌های دیوار.

جدول ۵. مشخصات مخلوط خاک‌ها.

نوع خاک	$\gamma_{d \max}$ (kN/m^3)	$\gamma_{d \min}$ (kN/m^3)	w_{opt}	w_{sat}	γ_{65} (kN/m^3)
۱۰٪ ریزدانه	۱۷٫۶	۱۴٫۲	۱۰٫۵٪	۲۳٫۹٪	۱۶٫۲
۲۰٪ ریزدانه	۱۹٫۸	۱۲٫۸	۱۱٫۵٪	۲۵٫۳٪	۱۶٫۶

جدول ۶. خصوصیات ژئوتکستایل مورد استفاده در مدل سازی. [۱۷]

مقدار	خصوصیت
۲۴/۵	جرم در واحد سطح (gr/m^2)
۰/۵۹	مقاومت کششی نهایی T_{ult} (kN/m) در جهت طولی
۴۵	کرنش نهایی ϵ_u (%) در جهت طولی
۱/۰۳	مقاومت کششی T_{ult} (kN/m) در جهت عرضی
۵۴/۵	کرنش نهایی ϵ_u (%) در جهت عرضی

اول، با توجه به ابعاد لایه‌ی پی و درصد تراکم مورد نظر، وزن خشک خاک پی محاسبه و به منظور سهولت در تراکم، پس از رساندن رطوبت خاک به رطوبت بهینه، خاک مرطوب به صورت یکنواخت در داخل جعبه‌ی دستگاه ریخته شد. جهت تراکم یکنواخت خاک، یک قطعه و گوه‌ی چوبی روی خاک قرار داده شد و عملیات تراکم به وسیله‌ی کوبش چکش مخصوص روی گوه‌ی چوبی تا رسیدن به ضخامت مورد نظر ادامه یافت. در مرحله‌ی دوم، به منظور ساخت دیوار با شیب صحیح، یک تخته‌ی چوبی با شیب مورد نظر در مقابل دیوار قرار داده شد.

قبل از نصب لایه‌ی ژئوتکستایل، باید ابتدا نشانگرهای چسبانده شده به ژئوتکستایل به ژل پترولیوم آغشته شوند. این کار به منظور کاهش آثار اصطکاک در سطوح تماس نشانگرها و جداریه‌ی جعبه انجام می‌شود. در نتیجه نشانگرها را می‌توان در پایان ساخت مدل و در طول آزمایش به طور واضح مشاهده و ردیابی کرد. سپس لایه‌ی ژئوتکستایل بر روی سطح خاک پهن و صاف ریخته و در مکان صحیح خود مستقر می‌شوند.

در مرحله‌ی سوم، بعد از نصب لایه‌ی المان مسلح‌کننده، جهت نمایش کیفی

۴.۳. ساخت مدل

ارتفاع مدل‌های ساخته شده در پژوهش حاضر، ۱۴۰ میلی‌متر بود که در آن‌ها ضخامت لایه‌ی پی ۲۰ میلی‌متر و ارتفاع دیوار خاک مسلح ۱۲۰ میلی‌متر و دیوار در ۶ لایه‌ی ۲۰ میلی‌متری ساخته و اجرا شد. در روش مذکور، ابتدا لایه‌ی پی مدل که طول و عرض آن برابر با ابعاد جعبه‌ی دستگاه است، ساخته و بعد از آن نوبت به ساخت لایه‌های دیوار خاک مسلح می‌رسد. در مرحله‌ی

جدول ۷. خلاصه‌ی مشخصات نمونه‌های آزمایش شده.

شماره‌ی آزمایش	ریزدانه (درصد)	ارتفاع مدل (mm)	زاویه‌ی نمای مدل (درجه)	تعداد لایه‌های مسلح‌کننده	کل طول لایه‌های مسلح‌کننده (mm)	فاصله‌ی عمودی مسلح‌کننده‌ها (mm)	سربار (kPa)
GRW۱	۱۰	۱۲۰	۹۰	۶	بالاترین لایه	۲۰	۳/۵
					بقیه‌ی لایه‌ها		
GRW۲	۱۰	۱۲۰	۹۰	۶	بالاترین لایه	۲۰	۴
					بقیه‌ی لایه‌ها		
GRW۳	۲۰	۱۲۰	۹۰	۶	بالاترین لایه	۲۰	۳/۵
					بقیه‌ی لایه‌ها		
GRW۴	۲۰	۱۲۰	۹۰	۶	بالاترین لایه	۲۰	۴
					بقیه‌ی لایه‌ها		
GRW۵	۱۰	۱۲۰	۷۶	۶	بالاترین لایه	۲۰	۳/۵
					بقیه‌ی لایه‌ها		
GRW۶	۱۰	۱۲۰	۷۶	۶	بالاترین لایه	۲۰	۴
					بقیه‌ی لایه‌ها		
GRW۷	۲۰	۱۲۰	۷۶	۶	بالاترین لایه	۲۰	۳/۵
					بقیه‌ی لایه‌ها		
GRW۸	۲۰	۱۲۰	۷۶	۶	بالاترین لایه	۲۰	۴
					بقیه‌ی لایه‌ها		

کیفیت عکس‌های دیجیتالی با روش‌های استاندارد ارتقاء کیفیت تصویر افزایش می‌یابد. برای تحلیل تصاویر دیجیتالی از نرم‌افزار ۲/۲۶ GetData Graph digitizer استفاده شد. مبدأ مختصات دستگاه دکارتی در تمامی عکس‌ها تعیین و مختصات تمامی نشانگرها در عکس‌های موردنظر قرائت شد. سپس مختصات نشانگرها در عکس‌های متوالی دنبال شده است. اگر A و B دو نشانگر مجاور یکدیگر باشند و مختصات اولیه آن‌ها $A(x_1, y_1)$ و $B(x_2, y_2)$ و مختصات ثانویه آن‌ها برابر با $A'(x'_1, y'_1)$ و $B'(x'_2, y'_2)$ باشد، کرنش بین دو نشانگر A و B ، از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$\varepsilon = \left[\sqrt{\frac{(x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} - 1 \right] \times 100 \quad (1)$$

با استفاده از رابطه‌ی ۱، می‌توان توزیع کرنش در لایه‌های مختلف ژئوتکستایل را به دست آورد.

۴. تحلیل نتایج

در پژوهش حاضر، مجموعاً ۸ آزمایش سانتریفیوژی برای بررسی رفتار دیوارهای خاکی مسلح شده با ژئوتکستایل انجام و در آزمایش‌های مذکور، میزان نشست قائم سربار وارده بر سطح فوقانی دیوار، تغییرشکل افقی نمای دیوار، میزان کرنش‌های ایجاد شده در لایه‌های مسلح‌کننده، و سطح گسیختگی بالقوه‌ی تشکیل شده در بدنه‌ی خاک مسلح ثبت شده است.

در سال ۲۰۱۴^[۱۷] نیز با استفاده از مدل‌سازی سانتریفیوژی، رفتار دیوارهای خاک مسلح ژئوسینتتیکی بررسی شده و در آن از ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه در حالت خشک به‌عنوان خاک مدل‌های آزمایش استفاده شده و سایر پارامترها مانند نوع مسلح‌کننده، فاصله‌ی عمودی مسلح‌کننده‌ها، درصد تراکم خاک، هندسه‌ی مدل‌ها، سربار نواری و شتاب مینا مشابه با پژوهش حاضر بوده است. نتایج برخی از مدل‌های آزمایش‌شده‌ی پژوهش اخیر^[۱۷] به‌عنوان مدل استاندارد جهت مقایسه با نتایج به‌دست آمده در پژوهش حاضر در نظر گرفته شده است.

۱.۴. نشست قائم سربار

در تمامی آزمایش‌ها، نشست قائم سربار با استفاده از نشانگر قرار داده شده در بالای دیوار و پردازش تصاویر اندازه‌گیری شده است. در شکل ۲، نشست قائم نسبی سربار (نسبت نشست قائم سربار به ارتفاع دیوار) برحسب درصد ریزدانه در شتاب مینای $5g$ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش میزان ریزدانه از 10% به 20% ، میزان نشست سربار در تمامی مدل‌ها با نرخ تقریباً یکسانی افزایش پیدا کرده و میزان نشست‌ها در دیوار قائم بیشتر از دیوار مایل است. با افزایش میزان سربار نواری از $37.5(kPa)$ به $4(kPa)$ نیز میزان نشست‌های دیوارها افزایش یافته است، لیکن میزان تأثیر سربار نواری با افزایش درصد ریزدانه از 10% به 20% ، در نشست قائم سربار افزایش می‌یابد، که البته در دیوارهای قائم بیشتر از دیوارهای مایل است. در دیوارهای قائم با 10% ریزدانه با افزایش میزان سربار نواری، نشست قائم سربار به ترتیب از 3% به 6% افزایش پیدا کرده است، در حالی که در مورد دیوارهای قائم با 20% ریزدانه، میزان نشست مذکور با افزایش سربار نواری، به ترتیب از 12% به 18% افزایش یافته است. در دیوارهای مایل با 10% ریزدانه، میزان نشست‌های قائم سربار با افزایش سربار نواری، افزایش قابل توجهی نداشته و از 1% به 2% افزایش یافته است.

تغییرشکل‌های مدل و مشخص شدن بهتر سطح گسیختگی احتمالی، یک نوار نازک ماسه‌ی رنگی در مجاورت جداره‌ی شفاف جعبه ریخته شد. در مرحله‌ی چهارم با توجه به ابعاد هر لایه و درصد تراکم در نظر گرفته شده، به همان ترتیب که در ساخت لایه‌ی پی عنوان شد، ساخت لایه‌های دیوار انجام شد. در مرحله‌ی آخر نیز طول برگشتی المان مسلح‌کننده بر روی سطح لایه‌ی خاک برگشت و در خاک همان لایه مدفون شد. این عملیات تا رسیدن ارتفاع مدل به ارتفاع موردنظر تکرار شد.

۵.۳. آماده‌سازی مدل‌ها جهت انجام آزمایش

در پژوهش حاضر، دیوار ساخته شده در جعبه‌ی دستگاه باید در حالت اشباع آزمایش شود. به منظور تعیین مدت زمان موردنیاز جهت اشباع شدن دیوارهای ساخته شده با ابعاد و شرایط موردنظر، مانند طول و نوع مسلح‌کننده‌ی مورد استفاده، برای هر کدام از خاک‌ها (10% و 20% ریزدانه) نمونه‌هایی با تمامی شرایط مدل‌های مورد آزمایش ساخته و در داخل آب قرار داده شدند.

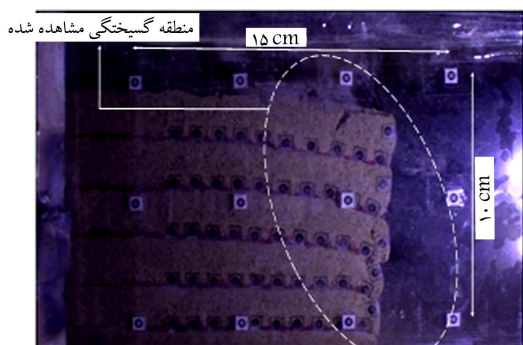
پس از اینکه نمونه‌ی دیوار ساخته شده با خاک 10% ریزدانه پس از گذشت ۳۶ ساعت از داخل آب بیرون آورده شد، ۳ نمونه از بخش‌های بالا، وسط و پایین نمونه گرفته و پس از تعیین درصد رطوبت مشاهده شد که درصد رطوبت هر ۳ نمونه به درصد رطوبت اشباع خاک 10% ریزدانه رسیده است. از این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که دیوار مذکور پس از گذشت مدت زمان ۳۶ ساعت اشباع شده است. در مورد خاک 20% ریزدانه نیز عملیات مشابهی بر روی نمونه‌ی دیوارهای قرارگرفته در داخل آب انجام و مشخص شد که مدت زمان موردنیاز جهت رسیدن دیوار مذکور با شرایط ذکر شده به حالت اشباع، ۴۸ ساعت است. پس از اشباع ساختن مدل‌ها و خارج کردن آن‌ها از داخل آب، آب جمع شده در جلو و بالای نمونه تخلیه و سپس مدل جهت انجام آزمایش آماده شد.

۶.۳. روش انجام آزمایش

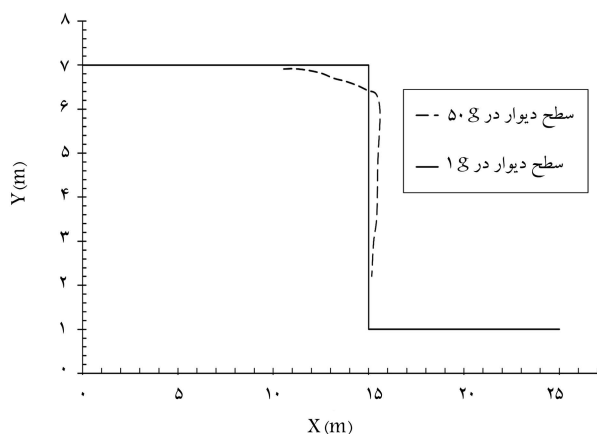
در پژوهش حاضر، نحوه‌ی اعمال شتاب به مدل به‌صورت افزایشی و با گام‌های $5g$ بوده است. به منظور برقراری تعادل نیروها بعد از رسیدن مدل به هر گام شتابی، دستگاه به مدت 30 ثانیه در آن شتاب ثابت نگه داشته شد. شتاب مینا در پژوهش حاضر $5g$ در نظر گرفته شد تا بتوان در شتاب و مدت زمان اعمال بار یکسان، نتایج به‌دست آمده را با یکدیگر مقایسه کرد. علاوه بر آن، برای مشاهده‌ی گسیختگی‌های احتمالی و تغییرشکل‌های بزرگ‌تر، شتاب دستگاه تا شتاب هدف $8g$ افزایش یافت. بعد از پایان عملیات شتاب‌دهی به مدل، جعبه‌ی ساخت مدل از دستگاه بیرون آورده شد و در پایان آزمایش، لایه‌های ژئوتکستایل از درون مدل بیرون آورده شدند. همچنین جهت بررسی‌های بیشتر نظیر بررسی محل‌های پارگی و یا کش آمدگی‌های احتمالی و مشاهده‌ی کرنش‌های ماندگار در لایه‌ها، بازبینی شدند.

۷.۳. پردازش تصاویر

نتایج حاصل از آزمایش‌ها با استفاده از روش پردازش تصاویر دیجیتالی، تحلیل شدند. پردازش تصاویر دیجیتالی، کاربردهای زیادی در مهندسی ژئوتکنیک، همانند: ثبت خصوصیات تغییرشکل استاتیکی و دینامیکی خاک، تعیین سطوح گسیختگی در سازه‌های نگهبان، تعیین عملکرد ژئوتکستایل و پاسخ‌های دقیق خاک به شرایط مختلف بارگذاری است. پس از پایان آزمایش، در شتاب‌های موردنظر، فریم‌های ضبط شده از فیلم جدا و سپس با استفاده از فریم‌های مذکور عملیات پردازش تصاویر انجام شد.



الف) تصویر در حین آزمایش؛



ب) پروفیل تغییر شکل (ابعاد محورها بر حسب مدل واقعی).

شکل ۴. مدل GRW۴ در شتاب (g) ۵۰.

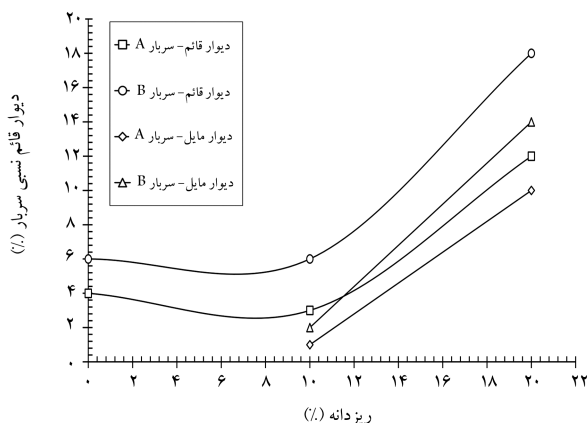
همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در مدل‌های تحت اثر سربار، به علت مدفون شدن طول مهاري بالاترين لایه در خاک و زیر سربار نواری، میزان تنش قائم و به دنبال آن اصطکاک سطح مشترک خاک و مسلح‌کننده افزایش یافته و حرکت افقی بالاترين لایه محدود شده است و تغییر مکان افقی بیشینه در فاصله $\frac{1}{2}$ ارتفاع از تاج دیوار رخ می‌دهد.

عربی بیشینه میزان تغییر شکل افقی نمای دیوار با خاک ماسه‌پی را ۴۵ سانتی‌متر اعلام کرد.^[۱۷] در حالی که میزان این تغییر شکل در دیوار با ۱۰٪ ریزدانه در حالت اشباع به ۱۶ سانتی‌متر محدود شده است، که نشان‌دهنده بهبود تغییر شکل‌های نما در اثر بسیج چسبندگی ناشی از حضور ریزدانه در خاک دیوار است. لیکن این بهبود در دیوارهای با خاکریز ۲۰٪ ریزدانه مشاهده نمی‌شود، زیرا تغییر شکل‌های افقی نمای دیوارهای مذکور به ۴۷ سانتی‌متر رسیده است که مشابه با دیوار با خاک ماسه‌پی و گزارش شده در پژوهش اخیر، است.^[۱۷]

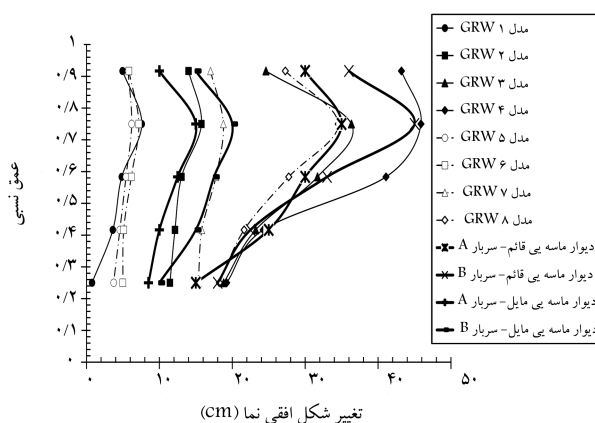
در شکل (الف و ب)، تصویر مدل GRW۴ همراه با پروفیل تغییر شکل مذکور در شتاب (g) ۵۰ مشاهده می‌شود که مطابق آن تغییر شکل‌های به وجود آمده در نیمه بالایی مدل بیشتر از سایر نواحی بوده و منطقه گسیختگی بالقوه مشاهده شده در شتاب مذکور از قسمت پشت سربار نواری آغاز و به سمت پنجه‌ی شیب ادامه پیدا کرده است.

۳.۴. کرنش المان‌های مسلح‌کننده

شکل (الف و ب)، توزیع کرنش بیشینه لایه‌های مسلح‌کننده در ارتفاع مدل‌های دیوارهای به ترتیب قائم و مایل را نشان می‌دهد. از شکل (الف و ب) می‌توان



شکل ۲. نشست قائم نسبی سربار بر حسب درصد ریزدانه در شتاب (g) ۵۰.



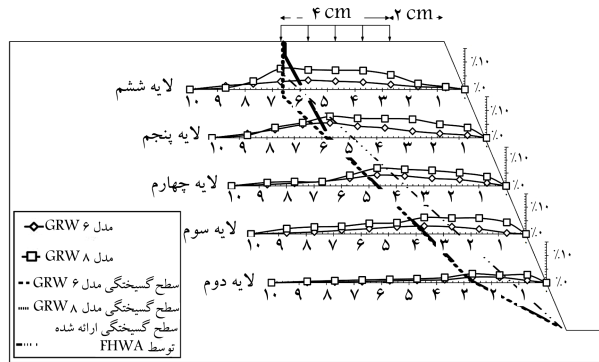
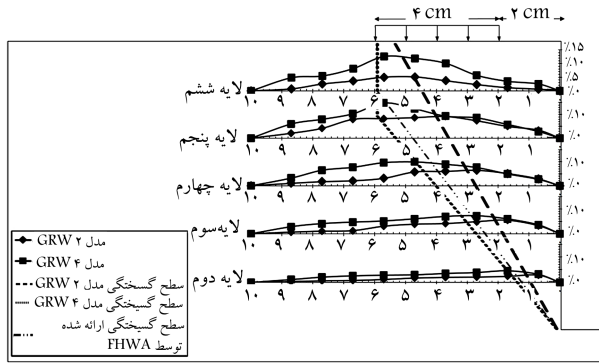
شکل ۳. پروفیل تغییر شکل افقی نمای مدل‌ها بر حسب عمق نسبی در شتاب (g) ۵۰.

عربی بیشینه میزان نشست قائم نسبی سربار را ۶٪ اعلام کرده است.^[۱۷] که پارامتر ذکر شده در دیوارهای با خاک ۱۰٪ ریزدانه و در حالت اشباع نیز به ۶٪ محدود شده است که نشان می‌دهد عملکرد دیوار در این زمینه چندان نسبت به خاک ماسه‌پی خشک تغییر نکرده است، در حالی که افزایش درصد ریزدانه به ۲۰٪ باعث شده است میزان نشست قائم سربار به ۱۸٪ در حالت اشباع افزایش پیدا کند که نشان می‌دهد افزایش ریزدانه از ۱۰٪ به ۲۰٪، باعث تضعیف قابل توجه عملکرد دیوار می‌شود.

۲.۴. تغییر شکل افقی نمای دیوارها

شکل ۳، پروفیل تغییر شکل افقی نمای دیوارها بر حسب عمق نسبی (بر حسب مدل واقعی) را در شتاب (g) ۵۰ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، میزان تغییر شکل‌های افقی نمای دیوار با افزایش درصد ریزدانه از ۱۰٪ به ۲۰٪ و افزایش سربار افزایش پیدا کرده است، لیکن میزان آن‌ها در دیوار با ۲۰٪ ریزدانه، بین ۳ تا ۶ برابر دیوار با ۱۰٪ ریزدانه است که نشان‌دهنده کاهش پایداری دیوار در اثر افزایش درصد ریزدانه از ۱۰٪ به ۲۰٪ است. از طرف دیگر، همان‌طور که انتظار می‌رفت، تغییر شکل‌های نمای دیوار در دیوارهای مایل کمتر از دیوارهای قائم بوده است.

تغییر شکل‌ها در نواحی نزدیک به پنجه دیوارها نسبت به سایر نواحی کوچک‌تر بوده است که این موضوع می‌تواند به دلیل تأثیر پی‌خاکی قرار گرفته در زیر دیوار باشد که باعث محدود کردن تغییر شکل‌های افقی نمای دیوار در نواحی نزدیک به پنجه شده است.



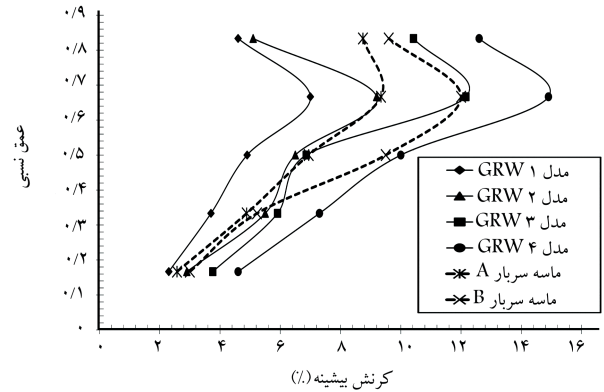
ب) مایل .

شکل ۶. توزیع کرنش در طول المان‌های مسلح‌کننده و سطوح گسیختگی بالقوه و ارائه‌شده در FHWA, ۲۰۰۱ تحت اثر سربار B در درصد‌های مختلف ریزدانه در شتاب (g) ۵۰ در دیوارها.

۴.۴. توزیع کرنش در طول المان‌های مسلح‌کننده و سطح لغزش

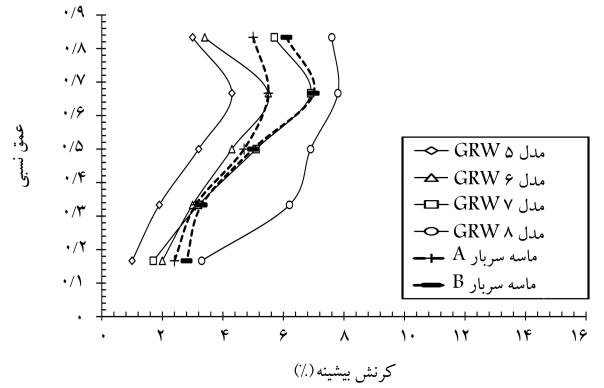
با استفاده از نشانگرهای قرار داده‌شده در طول المان‌های مسلح‌کننده می‌توان توزیع کرنش در طول المان مسلح‌کننده را به دست آورد و با اتصال محل وقوع کرنش‌های بیشینه در هر کدام از لایه‌ها، سطح لغزش احتمالی را مشخص کرد. در شکل (۶ الف و ب)، توزیع کرنش در طول المان‌های مسلح‌کننده در دیوارهای به ترتیب قائم و مایل تحت اثر سربار B در درصد‌های مختلف ریزدانه همراه با سطوح لغزش بالقوه و سطح لغزش ارائه‌شده در دستورالعمل FHWA, ۲۰۰۱ مشاهده می‌شود، که مطابق آن با افزایش درصد ریزدانه، سطح گسیختگی بالقوه‌ی عمیق‌تری تشکیل می‌شود. علاوه بر آن، در دیوارهای با ۲۰٪ ریزدانه، سطح لغزش از پشت سربار نواری شروع و به دلیل نشست مشاهده‌شده در نمونه‌های خارج‌شده از دستگاه پس از انجام آزمایش، موازی با نما ادامه و سپس به سمت پنجه‌ی دیوار گسترش یافته است. همان‌طور که در شکل (۶ الف) می‌توان مشاهده کرد، سطح لغزش به دست آمده برای دیوار با ۲۰٪ ریزدانه نسبت به ۱۰٪ ریزدانه به سطح لغزش ارائه‌شده توسط FHWA, ۲۰۰۱ نزدیک‌تر است.

در تمامی مدل‌های دیوار مایل، کرنش‌های تحمیلی به لایه‌ها کمتر از مدل‌های دیوار قائم است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که سطوح لغزش بالقوه در دیوارهای مایل نسبت به دیوارهای قائم عمیق‌تر است. فاصله‌ی سطوح لغزش در درصد‌های ۱۰٪ و ۲۰٪ ریزدانه در نواحی میانی و پایینی دیوارهای مایل، ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است و می‌توان گفت در نواحی مذکور، سطوح لغزش بالقوه در درصد‌های ۱۰٪ و ۲۰٪ ریزدانه مشابه یکدیگر است.



کرنش بیشینه (%)

الف) قائم؛



کرنش بیشینه (%)

ب) مایل .

شکل ۵. توزیع کرنش بیشینه‌ی لایه‌های مسلح‌کننده در ارتفاع مدل‌ها.

نتیجه گرفت در تمامی مدل‌ها و در درصد ریزدانه‌های مختلف، کرنش بیشینه در فاصله‌ی ۱/۳ ارتفاع از تاج دیوار رخ می‌دهد و می‌توان گفت ریزدانه تأثیری در محل وقوع کرنش بیشینه در ارتفاع دیوار ندارد.

با افزایش درصد ریزدانه از ۱۰٪ به ۲۰٪، میزان کرنش‌ها در لایه‌های مسلح‌کننده بین ۱/۳ تا ۲/۳ برابر شده است که این افزایش در میزان کرنش‌ها در لایه‌های پایینی دیوار کمتر و در لایه‌های بالایی بیشتر شده است. این افزایش نرخ رشد کرنش‌ها در اثر افزایش درصد ریزدانه، نشان‌دهنده‌ی کوچک شدن ضریب اطمینان مدل و نزدیک شدن به گسیختگی است. علاوه بر آن، افزایش سربار نواری باعث افزایش میزان کرنش‌های بیشینه در لایه‌های مسلح‌کننده شده است و در دیوار با ۱۰٪ ریزدانه، کرنش‌های بیشینه در لایه‌های مسلح‌کننده بین ۱/۸ تا ۱/۸ برابر و در دیوارهای با ۲۰٪ ریزدانه بین ۱/۳ تا ۲ برابر شده و در حالت قائم نسبت به مایل تأثیر افزایش سربار نواری بیشتر بوده است.

عربی بیشینه‌ی کرنش مسلح‌کننده در ارتفاع دیوار ماسه‌ی ۱۲٪ و در فاصله‌ی ۰٫۳۳ ارتفاع از تاج دیوار اعلام کرد^[۱۷] در حالی که بیشینه‌ی کرنش مسلح‌کننده در ارتفاع دیوارهای با ۱۰٪ ریزدانه‌ی ۹٪ و در ۲۰٪ ریزدانه‌ی ۱۶٪ در حالت اشباع به دست آمده است، که این موضوع با تغییر شکل نما تطابق داشته و وجود ریزدانه تا میزان ۱۰٪ به دلیل بسیج چسبندگی در دیوار تا حدودی باعث بهبود میزان کرنش مسلح‌کننده‌ها و عملکرد دیوار شده است، لیکن با افزایش ریزدانه به ۲۰٪، میزان کرنش‌های به وجود آمده افزایش یافته و در مقایسه با خاک ماسه‌ی و خاک با ۱۰٪ ریزدانه، عملکرد دیوار تضعیف شده است.

و تحلیل تصاویر صورت‌گرفته درباره‌ی تأثیر درصد ریزدانه در خاک اشباع می‌توان این نتایج را استنباط کرد:

۱. با افزایش میزان سربار نواری، میزان نشست قائم سربار دیوارها افزایش می‌یابد و تأثیر مذکور در دیوارهای قائم بیشتر از دیوارهای مایل است. میزان نشست قائم نسبی برای دیواری با خاک ماسه‌ای خشک ۶٪ بوده و در دیوارهای با خاک ۱۰٪ ریزدانه و در حالت اشباع نیز به ۶٪ محدود شده است که نشان می‌دهد عملکرد دیوار با ۱۰٪ ریزدانه در این زمینه چندان نسبت به ماسه‌ی خالص تغییر نکرده است، در حالی که در دیوار با ۲۰٪ ریزدانه، میزان نشست قائم نسبی دیوار به ۱۸٪ افزایش پیدا کرده است که نشان می‌دهد نیل به ریزدانه‌ی ۲۰٪، باعث تضعیف قابل توجه عملکرد دیوار می‌شود.

۲. میزان تغییرشکل‌های افقی نمای دیوار، وابسته به درصد ریزدانه و مقدار سربار است. تغییرشکل‌های افقی نمای دیوار در مدل‌های با ۱۰٪ ریزدانه‌ی اشباع نسبت به ماسه‌ی خشک کمتر شد که نشان‌دهنده‌ی بهبود تغییرشکل‌های نما در اثر بسیج چسبندگی ناشی از حضور ریزدانه در خاک پرکننده‌ی دیوار خاک مسلح است. لیکن این بهبود در دیوارهای با ۲۰٪ ریزدانه در حالت اشباع مشاهده نشد. البته همان‌طور که انتظار می‌رود، تغییرشکل‌های افقی نمای دیوار در حالت مایل کمتر از حالت قائم است.

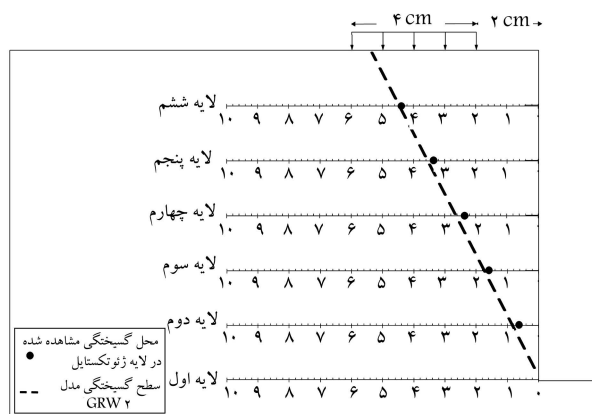
۳. کرنش‌های به‌وجود آمده در مسلح‌کننده‌ها نیز در دیوار خاک مسلح با ۱۰٪ ریزدانه نسبت به خاک ماسه‌ای کاهش یافته و با افزایش درصد ریزدانه به ۲۰٪، مقدار آن افزایش قابل توجهی پیدا کرده است. این موضوع تطابق با تغییرشکل نما دارد و اثر بسیج چسبندگی در حالت اشباع را تا حد معینی نشان می‌دهد.

۴. بیشینه‌ی کرنش مسلح‌کننده در حالت وجود سربار با درصد ریزدانه‌ی مختلف در فاصله‌ی حدود $\frac{1}{3}$ ارتفاع از تاج دیوار خاک مسلح رخ می‌دهد و تفاوت محسوسی با خاک ماسه‌ای خالص ندارد.

۵. سطح لغزش دیوار با ۱۰٪ ریزدانه، سطحی‌تر از سطح لغزش ارائه‌شده در دستورالعمل FHWA, ۲۰۰۱ در دیوارهای قائم است و در دیوار با ۲۰٪ ریزدانه، سطح لغزش به‌دست آمده عمیق‌تر از سطح لغزش ارائه‌شده در دستورالعمل مذکور است. این موضوع نشان می‌دهد که درصد ریزدانه در محل سطح لغزش تأثیر می‌گذارد. با مقایسه‌ی سطح لغزش به‌دست‌آمده برای دیوارهای مایل و مقایسه‌ی آن با دستورالعمل FHWA, ۲۰۰۱ مشاهده می‌شود که سطح لغزش در دیوارهای مایل عمیق‌تر از مقدار ارائه‌شده در دستورالعمل مذکور است. به عبارت دیگر، شیب دیوار نیز موجب جابه‌جایی سطح لغزش می‌شود.

۶. مقایسه‌ی محل‌های گسیختگی مسلح‌کننده‌ها با سطح لغزش به‌دست آمده از تحلیل تصاویر دیجیتالی تطابق خوبی نشان می‌دهد. لذا ترکیب مدل‌سازی سانتریفیوژی با روش تحلیل تصاویر دیجیتالی روش مناسبی است.

با توجه به موارد ذکرشده می‌توان نتیجه گرفت که وجود ۱۰٪ ریزدانه در خاک ماسه‌ای در حالت اشباع به دلیل بسیج چسبندگی در کنار مقاومت اصطکاکی به بهبود عملکرد دیوار خاک مسلح ژئوسینتیکی منجر می‌شود. ولی افزایش درصد ریزدانه به ۲۰٪، موجب تضعیف عملکرد آن می‌شود.



شکل ۷. سطح گسیختگی بالقوه و محل‌های گسیختگی و کرنش‌های ماندگار مشاهده شده در لایه‌های ژئوتکتایل در مدل GRW2 در شتاب $g(0.75)$.

سطوح لغزش به‌دست آمده از تحلیل تصاویر دیجیتالی در دیوارهای مایل عمیق‌تر از سطح لغزش ارائه‌شده در دستورالعمل FHWA, ۲۰۰۱ به‌دست آمده و در آن شیب‌های تندتر از ۷۰ درجه به‌عنوان دیوار طبقه‌بندی شده است؛ و از طرف دیگر، در دستورالعمل مذکور، در مورد سطح لغزش شیب‌ها آمده است که سطوح لغزش به‌صورت دایره‌ای و یا چندخطی است. [۷] همان‌طور که در شکل (۶ب) مشاهده می‌شود، سطح لغزش به‌دست آمده از آزمایش به‌صورت چندخطی بوده و دورتر از نما نسبت به سطح لغزش گزارش‌شده در FHWA, ۲۰۰۱ است و این موضوع نشان می‌دهد که سطح لغزش در دیوارهای با شیب ۷۶ درجه، حالتی میان دیوار قائم و شیب است.

۵. بررسی صحت سطوح لغزش

لایه‌های مسلح‌کننده‌ی تمامی مدل‌ها در پایان آزمایش‌ها از داخل نمونه خارج و بررسی بیشتر شدند. به‌عنوان نمونه، مدل GRW2 در شتاب $g(0.75)$ دچار گسیختگی ناگهانی شد. بعد از توقف دستگاه و خارج کردن مدل مذکور از دستگاه، لایه‌های المان‌های مسلح‌کننده به آرامی از داخل نمونه خارج و بررسی بیشتر شدند. در بررسی لایه‌های المان‌های مسلح‌کننده، پارگی‌های رخ داده در لایه‌ها، بازبینی شدند. این کار با استفاده از شبکه‌ی خطوط افقی با فواصل ۱۰ میلی‌متر که قبلاً بر روی لایه‌های مسلح‌کننده ترسیم شده بود، انجام شد. شکل ۷، نتایج حاصل از بازبینی لایه‌های مسلح‌کننده‌ی مدل GRW2 را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، محل گسیختگی به‌دست آمده از بازبینی مسلح‌کننده‌ها، تطابق خوبی با سطح لغزش به‌دست آمده از تحلیل تصاویر دیجیتالی دارد. لذا استفاده از مدل‌سازی سانتریفیوژی همراه با روش تحلیل تصاویر دیجیتالی، روش مناسبی برای بررسی عملکرد دیوارهای خاک مسلح ژئوسینتیکی است.

۶. خلاصه و نتیجه‌گیری

براساس آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی صورت‌گرفته با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ

پانوشتها

1. geogrid
2. geotextile
3. hybrid-geosynthetic
4. centrifuge
5. geotechnical
6. wrap-around
7. prototype

منابع (References)

1. Vidal, H. "The principle of reinforced earth", *Highway Research record*, **282**, pp. 1-16 (1969).
2. Mirilatifi, A., Fakher, A. and Ghalandarzadeh, A. "The deformation study of reinforced earth walls against earthquake", *Journal of Civil and Surveying Engineering.*, **44**(5), pp. 705-717 (2010).
3. Shahgholi, M., Fakher, A. and Jones, C.J.F.P. "Horizontal slice method of analysis", *Geotechnique.*, **51**(10), pp. 881-885 (2001).
4. Nouri, H.; Fakher, A. and Jones, C.J.F.P. "Development of horizontal slice method for seismic stability analysis of reinforced slopes and walls", *Geotextiles and Geomembranes*, **24**(3), pp. 175-187 (2006).
5. Zornberg, J.G. and Leshchinsky, D. "Comparison of international design criteria for geosynthetic-reinforced soil structures", *Landmarks in Earth Reinforcement*, **2**, pp. 1-1095 (2003).
6. AASHTO, "Standard specifications for highway bridges", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA (2002).
7. Elias, V.C., Barry, P.E. and Christopher, R. "Mechanically stabilized earth walls and reinforced slopes design and construction guidelines", Report FHWA-NHI-00-043, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., Submitted to Fed. Highway Admin (2001).
8. Collin, J.G. (Editor) "Design manual for segmental retaining walls", National Concrete Masonry Association, Va. Herndon, Ed., 2nd Edn. (1997).
9. Riccio, M., Ehrlich, M. and Dias, D. "Field monitoring and analyses of the response of a blockfaced geogrid wall using fine-grained tropical soils", *Geotextiles and Geomembranes*, **42**(2), pp. 127-138 (2014).
10. Balakrishnan, S. and Viswanadham, B.V.S. "Performance evaluation of geogrid reinforced soil walls with marginal backfills through centrifuge model tests", *Geotextiles and Geomembranes*, **44**(1), pp. 95-108 (2016).
11. Santos, E.C.G., Palmeira, E.M. and Bathurst, R.J. "Performance of two geosynthetic reinforced walls with recycled construction waste backfill and constructed on collapsible ground", *Geosynthetics International*, **21**(4), pp. 256-269 (2014).
12. Bhattacharjee, D. and Viswanadham, B.V.S. "Numerical studies on the performance of hybrid-geosynthetic-reinforced soil slopes subjected to rainfall", *Geosynthetics International*, **22**(6), pp. 411-427 (2015).
13. Hajjalilue-Bonab, M., Ahmadi, H. and Katebi, H. "Experimental and Numerical study of soil-reinforcement effects on the bearing capacity of shallow foundations near the retaining wall", *Civil Engineering Sharif Journal*, **29-2**(1), pp. 15-25 (2013).
14. Salehzade, H., Baziar, M., Moosavi, M. and et al. "Design and construction of a geotechnical centrifuge with radius of 85cm", Proc. Second National Conference of Civil Eng., Tehran, Iran, pp. 174-182 (2005).
15. Sommers, A.N. and Viswanadham, B.V.S. "Centrifuge model tests on the behavior of strip footing on geotextile-reinforced slopes", *Geotextiles and Geomembranes*, **27**(6), pp. 497-505 (2009).
16. Abu-Hejleh, N., Outcalt, S. and Wang, T. "Performance of geosynthetic-reinforced walls supporting the founders/meadows bridge and approaching roadway structures, report 2: Assessment of the performance and design of the front GRS walls and recommendations for future GRS abutments", Report No. CDOT-DTD-R-2001-12, Colorado, Department of Transportation (2001).
17. Arabi, M. "Centrifuge model test on the behavior of geosynthetic reinforced soil wall under surcharge load", M.S Thesis, Iran University of Science and Technology, supervised by Dr. Razeghi, H. and Dr. Salehzadeh, H. (2014).