

# تأثیر رطوبت در رفتار خاک مسلح با ریزدانه تحت تأثیر سربار با استفاده از سانتریفیوژ

حمیدرضا رازقی\* (دانشیار)

محمدرضا غلامشاهی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

رامین ریاحی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهم‌ترین مشکل در دیوارها و شیروانی‌های خاک مسلح ساخته شده از مخلوط خاک دانه‌بی و ریزدانه، اثر افزایش رطوبت و در مواقعی به وجود آمدن فشار آب حفره‌یی اضافی در بدنه‌ی خاکریز مسلح شده است. به همین دلیل، بیشینه‌ی مقدار ریزدانه در مصالح خاکریز در آیین‌نامه‌ها به ۱۵٪ محدود شده است. در مناطقی که مصالح مناسب برای خاکریز در دسترس نباشد، تأمین آن از مناطق دوردست، هزینه‌های زیادی در بردارد. در مناطق مختلف ایران نیز خاک‌های با درصد ریزدانه‌ی بالا، گستره‌ی زیادی دارند که از لحاظ آیین‌نامه‌یی برای احداث دیوارها و شیروانی‌های خاک مسلح مناسب نیستند. در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر پارامترهای درصد رطوبت خاک و وجود سربار در دیوارهای خاک مسلح قائم و با ۲۰٪ ریزدانه در سطح لغزش احتمالی و رفتار تغییرشکل دیوار با استفاده از سانتریفیوژ پرداخته شده است. آزمایش‌ها نشان می‌دهد افزایش درصد رطوبت در مخلوط، تأثیر قابل ملاحظه‌یی در تغییرشکل‌های خاک و مسلح‌کننده دارد.

واژگان کلیدی: دیوار خاک مسلح، درصد رطوبت، سانتریفیوژ ژئوتکنیکی، روش تحلیل تصاویر، ژئوتکستایل.

## ۱. مقدمه

هزینه‌ی بالای اجرای دیوارهای نگه‌دارنده و به طور کلی روش‌های کلاسیک معمول، مهندسان طراح را به استفاده از روش‌های دیگر پایدارسازی سوق داد. مبحث خاک مسلح به صورت علمی در سال ۱۹۶۹ مطرح شد و خاک مسلح را به عنوان ماده‌یی مرکب از خاک و عنصر تسلیح معرفی کرد.<sup>[۱]</sup>

امروزه برتری ژئوستتیک‌ها<sup>۱</sup> نسبت به سایر مسلح‌کننده‌ها، دیوارهای خاک مسلح ژئوستتیک‌یی را به عنوان یکی از گزینه‌های مهم در طراحی دیوارهای حائل مطرح کرده است. هزینه‌ی کمتر، انعطاف‌پذیری، سرعت در عملیات ساخت و ساز، عملکرد لرزه‌یی خوب، زیبایی، عدم خوردگی و زنگ‌زدگی، از جمله‌ی برتری‌های آن‌هاست.

بیشینه‌ی مقدار ریزدانه در مصالح خاکریز در دستورالعمل AASHTO و FHWA ۲۰۰۱ به ۱۵٪ محدود شده است.<sup>[۲]</sup> وجود آب و رطوبت در خاکریزهای مسلح‌شده که مصالح با نفوذپذیری کم دارد، باعث کاهش مقاومت خاک و همچنین مقاومت تماسی<sup>۲</sup> بین مسلح‌کننده و خاک می‌شود.<sup>[۳]</sup>

در مناطقی که مصالح مناسب برای خاکریز در دسترس نباشد، تأمین آن از

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۹/۶، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱۲/۷، پذیرش ۱۳۹۶/۲/۲۳

DOI:10.24200/J30.2019.1450

مناطق دوردست هزینه‌های زیادی در بر دارد. در حال حاضر 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 نیز خاک‌های با درصد ریزدانه‌ی بالا، که گستره‌ی زیادی دارند، از لحاظ آیین‌نامه‌یی برای احداث دیوارها و شیروانی‌های خاک مسلح مناسب نیستند، بنابراین مطالعه بر روی چنین سازه‌هایی در ایران اهمیت ویژه‌یی دارد. در مناطق مذکور، جایگزینی مصالح متداول خاکریز با مصالح حاوی ریزدانه‌ی زیاد، می‌تواند حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد هزینه‌های احداث دیوار را کاهش دهد. در سال ۱۹۷۹، عملکرد یک دیوار خاک مسلح ساخته شده با یک نوع رس آتشفشانی با مقدار رطوبت بالای ۵۰٪ منتشر شد،<sup>[۴]</sup> و اندازه‌گیری‌های میدانی برای یک شیروانی مسلح‌شده با ژئوگرید و ساخته شده با مصالح رس لای دار نشان داد که به وجود آمدن فشار آب حفره‌یی، تأثیر مهمی در عملکرد سازه‌ی خاک مسلح دارد. در پژوهشی در سال ۲۰۰۷، نیز رفتار دیوارهای خاک مسلح ساخته شده با مصالح ریزدانه‌ی رسی با استفاده از مدل‌های سانتریفیوژی بررسی شد و هدف اصلی از مطالعه‌ی مذکور، بررسی اثر طول و فاصله‌ی مسلح‌کننده‌ها در تغییرشکل‌های دیوار بود. دیوارهای ذکر شده در رطوبت بالا و نزدیک به حد روانی خاک رسی مدل‌سازی شدند.<sup>[۵]</sup>

همچنین برخی پژوهشگران در سال ۲۰۱۳، نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی دو

دیوار خاک مسلح با مصالح نفوذناپذیر و مسلح شده با ژئوتکستایل های بافته نشده منتشر شد.<sup>[۷]</sup> مدل های مذکور در راستای بررسی رفتار یک دیوار خاک مسلح موفق ساخته شده در برزیل در سال ۱۹۸۴ بودند. مصالح استفاده شده در دیوار مورد نظر، ۲۶٪ ریزدانه داشت. پژوهشگران مذکور دلیل اصلی رفتار مناسب دیوار مورد نظر را عملکرد بسیار عالی ژئوتکستایل های بافته نشده در زهکشی داخلی دیوار دانستند و برای بررسی دقیق تر، به مطالعه بر روی رفتار دو دیوار آزمایشگاهی با ارتفاع ۱ متر پرداختند.

در سال ۲۰۱۴، نیز آزمایش های بزرگ مقیاس بر روی دیوار مسلح شده با ژئوگرید و با خاک ریزدانه انجام شده است.<sup>[۸]</sup> همچنین در پژوهشی دیگری در همان سال، نشان داده شده است که کاهش مکش ناشی از افزایش رطوبت، باعث کاهش مقاومت برشی خاک و مقاومت برشی سطح تماس خاک و مسلح کننده می شود.<sup>[۹]</sup> در سال ۲۰۱۵ نیز با استفاده از مطالعات عددی، اثر لایه های هیبرید - ژئوستتیک در یک شیب تحت اثر بارش باران بررسی و نشان داده شد که استفاده از لایه های هیبرید - ژئوستتیک به عنوان مسلح کننده باعث کاهش فشار آب منفذی اضافی در شیب های مسلح می شود.<sup>[۱۰]</sup> همچنین در همان سال، با استفاده از مدل های عددی نشان داده شد که استفاده از لایه ی ماسه یی با نفوذ پذیری بالا در خاکریز مسلح شده با ژئوتکستایل بافته نشده که حاوی خاک ریزدانه است، علاوه بر کمک به زهکشی، اثر موثبتنگی را نیز کاهش می دهد، که در نتیجه باعث افزایش پایداری خاکریز می شود.<sup>[۱۱]</sup> در سال ۲۰۱۶ نیز با استفاده از آزمایش های سانتریفیوژی روی دیوار مسلح شده با ژئوگرید و حاوی خاک ریزدانه در درصد رطوبت بهینه نشان داده شد که دیوار مسلح شده با ژئوگرید با سختی کم، تغییر شکل های بزرگ تری نسبت به ژئوگرید با سختی زیاد دارد و در محل تماس خاک و ژئوگرید، بیرون کشیدگی رخ می دهد.<sup>[۱۲]</sup>

همچنین پژوهش هایی در زمینه ی خاک مسلح با ریزدانه در ایران انجام شده است. با توجه به اینکه بیشتر مطالعات پیشین محدود به خاک های درشت دانه بوده و مطالعات اندکی در خصوص امکان پذیری و مزایای استفاده از مسلح کننده در خاک های چسبنده انجام شده است؛ در سال ۲۰۱۳، پژوهشی در مورد پارامترهای مقاومت برشی خاک مسلح شده با ژئوتکستایل و ژئوگرید با استفاده از آزمایش برش مستقیم با بررسی آزمایشگاهی رفتار خاک های چسبنده مسلح شده انجام شده است.<sup>[۱۳]</sup> همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۱۴ به بررسی مقاومت بیرون کششی دو نوع مسلح کننده در بین لایه یی نازک از خاک درشت دانه که در احاطه ی خاک ریزدانه قرار گرفته است، پرداخته شده و نتایج نشان از بهبود عملکرد این حالت نسبت به خاک ریزدانه و نیز کاهش هزینه ی اجرا نسبت به حالتی که فقط از درشت دانه استفاده شود، داشته است.<sup>[۱۴]</sup>

همان طور که گفته شد، با توجه به استانداردها، بیشینه ی مقدار ریزدانه در مصالح خاکریز به ۱۵٪ محدود شده است و وجود آب و رطوبت در خاکریزهای مسلح شده، که مصالح با نفوذپذیری کم دارند، باعث کاهش مقاومت خاک و همچنین مقاومت تماسی بین مسلح کننده و خاک می شود؛ به همین دلیل در پژوهش حاضر از خاک با ۲۰٪ ریزدانه در درصد رطوبت های مختلف استفاده شده است، تا تأثیر درصد رطوبت در خاک های با بیش از ریزدانه ی مجاز استاندارد بررسی شود.

حساب می آید؛ زیرا مطالعه و تحلیل مسائل را با استفاده از مصالح ژئوتکنیکی<sup>۳</sup> مقدور می سازد و اساساً محیط بارگذاری خاصی را فراهم می کند که در آن نمونه های خاکی تحت آزمایش قرار می گیرند. سانتریفیوژ قادر است به طور مصنوعی رفتاری از مصالح مدل را ایجاد کند که توزیع و میزان تنش در مدل و سازه ی اصلی یکسان باشد و این موضوع، بزرگ ترین مزیت استفاده از آزمایش مدل های سانتریفیوژی است. امروزه روش مدل سازی سانتریفیوژی به طور فزاینده و موفقیت آمیزی در مطالعه ی مسائل ژئوتکنیکی، شامل: گودبرداری، تونل ها، خاکریزها و شیب ها، پی های عمیق و شناور، بهسازی خاک و غیره به کار می رود.

روابط مقیاسی را می توان با تحلیل ابعادی و یا بررسی معادلات دینامیکی حاکم بر مسئله استنتاج کرد. در جدول ۱، روابط مقیاسی برای پارامترهای معمول ژئوتکنیکی در مدل سازی با سانتریفیوژ ارائه شده است. یک مشکل اصلی که در مطالعات مدل سانتریفیوژی به وجود می آید، مسئله ی مصالح ژئوستتیک است. برخلاف خاک، اجازه ی استفاده ی مصالح ژئوستتیک یکسان در مطالعات مدل و واقعیت داده نمی شود. مدل کردن لایه های مسلح کننده مقررانی دارد که باید انجام شود:

۱. مقیاس کردن رفتار مقاومت کششی - کرنش،

۲. مدل کردن رابطه بین خاک و ژئوتکستایل<sup>۴</sup>.

در نظر گرفتن مقیاس برای مدل کردن ژئوستتیک ها با جزئیات در سال ۲۰۰۴ ارائه شده است.<sup>[۱۵]</sup> جدول ۲، ضرایب مقیاس برای مدل کردن سانتریفیوژی دیوارهای مسلح شده ی ژئوتکستایل را ارائه می دهد.

### ۳. برنامه ی آزمایش

#### ۳.۱. تجهیزات آزمایش و سیستم ابزارگذاری

در پژوهش حاضر، از دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی دانشگاه علم و صنعت ایران،<sup>[۱۶]</sup> که توسط تیمی از مهندسان دانشگاه در سال ۱۳۸۲ برای اولین بار در کشور ایران طراحی و ساخته شده، استفاده شده است. به منظور ساخت مدل ها، از یک جعبه ی مقاوم از جنس ورق گالوانیزه استفاده شده است. جعبه ی ساخت مدل با ابعاد داخلی جدول ۱، روابط مقیاسی حاکم بر پارامترهای معمول در مدل سازی سانتریفیوژی.

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

#### ۲. آنالیز ابعادی در مدل سازی سانتریفیوژی

آزمایش بر روی مدل توسط سانتریفیوژ، ابزاری قدرتمند برای مهندسی ژئوتکنیک به

جدول ۲. ضرایب مقیاس مدل کردن سانتریفیوژی.

مدل	سازه‌ی واقعی	کمیت
۱	N	طول (m)
۱	N	مقاومت کششی ژئوتکستایل $T_{ult}$ (KN/m)
۱	N	سختی ژئوتکستایل $J_g$ (KN/m)
۱	۱	رفتار تنش - کرنش سطح مشترک * خاک و المان مسلح‌کننده
۱	۱	مقاومت برشی سطح مشترک خاک و المان مسلح‌کننده

\* Interface

جدول ۳. مشخصات خاک مخلوط.

نوع خاک	$\gamma_d$ max (KN/m <sup>۳</sup> )	$\gamma_d$ min (KN/m <sup>۳</sup> )	$W_{opt}$ (%)
۸۰٪ ماسه‌ی فیروزکوه + ۲۰٪ کائولین	۱۹٫۷۵	۱۲٫۸	۱۱٫۵

جدول ۴. خصوصیات ژئوتکستایل مورد استفاده در مدل سازی. [۱۷]

ژئوتکستایل	خصوصیات
بافته نشده	نوع
۲۴٫۵	جرم در واحد سطح (g/m <sup>۲</sup> )
۰٫۵۹	مقاومت کششی ژئوتکستایل $T_{ult}$ (KN/m) در جهت طولی
۴۵	کرنش نهایی $\epsilon_u$ (%) در جهت طولی
۱٫۰۳	مقاومت کششی نهایی $T_{ult}$ (KN/m) در جهت عرضی
۵۴٫۵	کرنش نهایی $\epsilon_u$ (%) در جهت عرضی



۱. لامپ نصب شده بر روی پایه فلزی ۲. محل قرارگیری دوربین دیجیتال

شکل ۱. پایه‌ی فلزی نصب شده بر روی سبد دستگاه جهت نصب لامپ و دوربین‌ها.

آزمایش تراکم پروکتور اصلاح شده طبق آیین‌نامه‌ی ASTM D۱۵۵۷ روی خاک مخلوط انجام شد و  $\gamma_d$  max و درصد رطوبت بهینه برای خاک مخلوط به دست آمد. همچنین  $\gamma_d$  min طبق آیین‌نامه‌ی ASTM D۴۲۵۴ برای خاک مخلوط اندازه‌گیری شد. جدول ۳، مشخصات خاک مخلوط را نشان می‌دهد.

تراکم نسبی خاک در مدل خاکریز برابر ۶۵٪ بوده است.  $\gamma_d$  خاک مخلوط در این تراکم برابر  $(\frac{KN}{m^3})$  ۱۶٫۶ است. چگالی ویژه‌ی خاک مخلوط با ۲۰٪ کائولین و ۸۰٪ ماسه، ۲٫۶۸ است. درصد رطوبت اشباع خاک مخلوط با ۶۵٪ تراکم، ۲۵٫۲۷ است. در نتیجه، درجه‌ی اشباع خاک مخلوط با درصد رطوبت‌های ۵، ۱۱٫۷۵ و ۱۵ به ترتیب ۰٫۱۹، ۰٫۴۵ و ۰٫۵۹ بوده است.

ژئوتکستایل مورد استفاده در مدل‌سازی مذکور طوری انتخاب شد که رفتار تنش کششی - کرنشی ژئوتکستایل سازه‌ی اصلی و برهم‌کنش خاک - ژئوتکستایل را به درستی مدل کند. المان مسلح‌کننده‌ی مورد استفاده در مدل‌سازی باید مقاومت کششی نهایی  $(T_{ult})$  ژئوتکستایل‌های سازه‌ی اصلی را داشته باشند. برای مدل‌سازی المان مسلح‌کننده، از یک پارچه‌ی بافته‌نشده‌ی ملحفه‌ی یک‌بار مصرف تجاری موجود در بازار استفاده شد. در جدول ۴، خصوصیات ژئوتکستایل مورد استفاده ارائه شده است. [۱۷] در پژوهش حاضر، از ملحفه‌ی یک‌بار مصرف در جهت ضعیف‌تر آن که جهت طولی بود، استفاده شد.

طول ۵۰۰، عرض ۱۸۰ و ارتفاع ۱۷۵ میلی‌متر 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 آنالیز دیجیتال تصاویر، در پایان آزمایش از یک عدد دوربین دیجیتال عکاسی سونی مدل TX۳۰ استفاده شد. این دوربین با قابلیت گرفتن عکس با کیفیت ۱۸٫۲ مگاپیکسل و ضبط فیلم با کیفیت Full HD و ۶۰ فریم در ثانیه بود. این تذکر لازم است که فیلم ضبط‌شده توسط دوربین دیجیتال بر روی حافظه‌ی آن ذخیره شد و در پایان آزمایش قابل دست‌یابی بود. جهت نصب دوربین دیجیتال و لامپ نورپردازی، یک پایه‌ی فلزی با فاصله‌ی افقی ۱۹۰ میلی‌متر از جعبه‌ی ساخت مدل بر روی سبد دستگاه نصب شد. شکل ۱، پایه‌ی فلزی نصب شده بر روی سبد دستگاه را نشان می‌دهد.

### ۲.۳. خاک و مصالح مسلح‌کننده‌ی استفاده شده در مدل

جهت مدل‌سازی خاکریز مسلح‌شده با ژئوتکستایل در پژوهش حاضر از مخلوط ۸۰٪ ماسه‌ی استاندارد ۱۶۱ فیروزکوه (ماسه‌ی سیلیسی شکسته) و ۲۰٪ رس کائولین استفاده شد. رس کائولین استفاده شده در پژوهش حاضر از نوع KZWM<sub>۱</sub> بوده است.

### ۳.۳. طراحی مدل

در پژوهش حاضر، مجموعاً ۶ آزمایش سانتریفیوژی بر روی دیوارهای خاک مسلح ژئوستنتیکی با ریزدانه و رطوبت، به منظور مطالعه و درک بهتری از رفتار آن‌ها قبل از گسیختگی و در لحظه‌ی گسیختگی انجام شده است. اهداف در نظر گرفته شده

در پژوهش حاضر عبارت‌اند از:

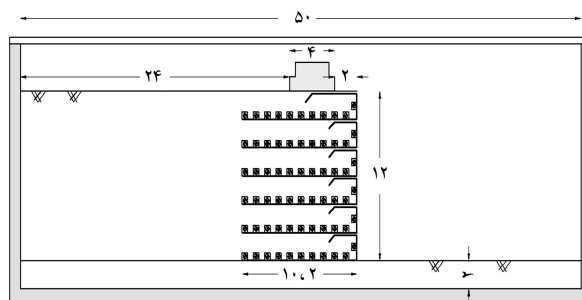
- مطالعه‌ی تأثیر سربار نواری در رفتار دیوار خاک مسلح ژئوستنتیکی (کوله‌ی پل)،
- مطالعه‌ی تأثیر رطوبت در رفتار دیوار خاک مسلح ژئوستنتیکی.

در بررسی رفتار دیوارهای خاک مسلح ژئوستنتیکی به مطالعه‌ی تأثیر عوامل ذکرشده در تغییرشکل‌های بالا و نمای دیوار، توزیع کرنش در لایه‌های مسلح‌کننده، مکانیزم گسیختگی و همچنین محل وقوع سطح لغزش‌های رخ داده‌شده پرداخته شده است. شتاب هدف،  $g$  ۸۰ و یا شتابی که در آن گسیختگی رخ دهد، در نظر گرفته شد و سپس نتایج با یکدیگر مقایسه شدند.

در تمامی آزمایش‌ها، در ساخت مدل خاک مسلح از ۶ لایه‌ی مسلح‌کننده‌ی ژئوتکستایل استفاده شد. نسبت فاصله‌ی عمودی بین لایه‌های مسلح‌کننده ( $S_v$ ) به ارتفاع دیوار ( $H$ ) در مدل‌ها برابر ۰٫۱۶۷ مدلهای برابر است. با توجه به ارتفاع ۱۲۰ میلی‌متری دیوار، فاصله‌ی عمودی لایه‌ها برابر با ۲۰ میلی‌متر به دست آمد. به منظور ایجاد یک نمای انعطاف‌پذیر در دیوار در تمامی مدل‌ها، برای قرار دادن المان‌های مسلح‌کننده از روش برگشتی<sup>۵</sup> استفاده شد که هر لایه‌ی مسلح‌کننده در نمای خاکریز ادامه یافت و بر روی قسمت بالایی لایه‌ی خاک بر می‌گشت. به منظور کمیته‌سازی لغزش المان مسلح‌کننده در خاک، نسبت طول مسلح‌کننده ( $L$ ) به ارتفاع دیوار ( $H$ ) در تمامی مدل‌ها ثابت و برابر ۰٫۸۵ انتخاب شد ( $L/H = 0.85$ ) که با توجه به ارتفاع ۱۲۰ میلی‌متری دیوار خاک مسلح، طول المان مسلح‌کننده برابر با ۱۰۲ میلی‌متر به دست آمد. همچنین نسبت طول مهار المان‌های مسلح‌کننده ( $L_o$ ) به ارتفاع دیوار ( $H$ ) برابر ۰٫۲۲ انتخاب شد که مساوی با ۲۶٫۴ میلی‌متر بود. برای جلوگیری از گسیختگی موضعی در بالاترین لایه، نسبت طول مهار لایه‌ی فوقانی المان مسلح‌کننده ( $L'_o$ ) به ارتفاع دیوار ( $H$ ) برابر با ۰٫۴ انتخاب شد ( $L'_o/H = 0.4$ ) که مساوی با ۴۸ میلی‌متر بوده است. در شکل ۲، نمایی شماتیک از مدل‌های ساخته‌شده‌ی آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.

### ۴.۳. مدل‌های آزمایش

در پژوهش حاضر، پارامترهای متغیر شامل درصد رطوبت خاک ( $w$ ) و وجود سربار ( $q$ ) است و سایر پارامترها نظیر: طول مسلح‌کننده، درصد تراکم خاک، ارتفاع مدل و ... ثابت بوده‌اند. برای اعمال سربار به خاکریز از پی نواری با ابعاد  $16 \times 40$  میلی‌متر و جرم  $2.610$  کیلوگرم استفاده شد. پی نواری مذکور در شتاب  $g$  ۱، تنش ۴ کیلوپاسکال بر سطح خاکریز اعمال می‌کرد. پی‌های نواری اشاره‌شده از جنس ورق‌های فولادی بودند. حالت دیگر مورد بررسی بدون سربار است. در پژوهش حاضر از سه درصد رطوبت مختلف ۵٪، ۱۱٫۵٪ و ۱۵٪ استفاده شده است که ۱۱٫۵٪ رطوبت بهینه‌ی خاک مدل موردنظر است. با توجه به متغیرهای ذکرشده در پژوهش



شکل ۲. نمایی شماتیک از مدل‌های ساخته‌شده‌ی آزمایشگاهی.

حاضر، در مجموع ۶ مدل آزمایش شده است که مشخصات هر کدام در جدول ۵ ارائه شده است.

### ۵.۳. ساخت پی مدل

پس از آماده‌سازی جعبه‌ی ساخت مدل، که شامل چسباندن نشانگر دائمی در سمت خارجی جداره‌ی شفاف جعبه و کاهش اصطکاک در سطوح جانبی مدل و ایجاد شرایط کرنش صفحه‌یی با به‌کار بردن یک لایه‌ی نازک ژل پترولیوم و استفاده از صفحات نازک و صیقلی پلی‌اتیلن با ضخامت ۰٫۱ میلی‌متر می‌شود، این کار سبب کاهش قابل ملاحظه‌ی اصطکاک بین جداره‌ی شفاف با خاک می‌شود و رفتار خاک در جداره را نزدیک به رفتار خاک در مرکز خاکریز خاک مسلح می‌کند. در اولین مرحله، لایه با ارتفاع ۲۰ میلی‌متر و تراکم نسبی ۶۵٪ در سرتاسر کف جعبه ریخته شد. برای رسیدن به ارتفاع و تراکم نسبی موردنظر با داشتن طول، عرض و ضخامت هر لایه‌ی مدل، می‌توان حجم خاک موردنیاز را محاسبه کرد و از آنجا که مدل‌های پژوهش حاضر، درصد‌های رطوبت مختلف دارند، پس از به دست آوردن وزن خاک خشک، هر لایه‌ی خاک با توجه به درصد رطوبت انتخاب‌شده با آب به‌طور یکنواخت مخلوط شده است. مثلاً برای ۵٪ رطوبت، ۵٪ وزن خاک به آن آب اضافه شده است. سپس با توجه به اینکه حجم خاک برای رسیدن به تراکم ۶۵٪ محاسبه شده است، خاک مرطوب که وزن آن مشخص است، به طور یکنواخت داخل جعبه‌ی موردنظر ریخته و قطعه‌ی چوبی که طول و عرض آن با طول و عرض جعبه‌ی دستگاه یکسان است، روی خاک قرار گرفته و به وسیله‌ی عملیات کوبش روی گوه‌ی چوبی به حجم موردنظر رسیده است.

### ۶.۳. ساخت مدل فیزیکی و آماده‌سازی جهت انجام آزمایش

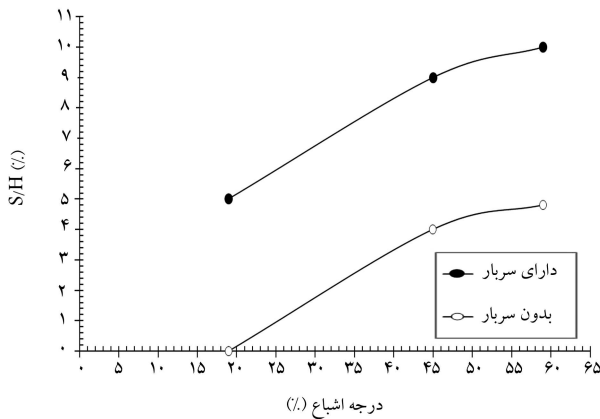
در مرحله‌ی اول، جهت ساخت لایه‌های دیوار، به منظور ایجاد یک صفحه‌ی نگهدارنده جهت ساخت مدل و اجرای دیوار با زاویه‌ی صحیح، تخته چوبی در مقابل دیوار قرار گرفت. در مرحله‌ی دوم، عملیات نصب لایه‌ی ژئوتکستایل که در روی آن نشانگرهایی به فاصله‌ی ۱ سانتی‌متری چسبانده شده است، انجام شد که در شکل ۳ چگونگی استقرار نشانگرها بر روی ژئوتکستایل‌ها مشاهده می‌شود. در مرحله‌ی سوم، بعد از نصب لایه‌ی المان مسلح‌کننده، جهت نمایش کیفی تغییرشکل‌های مدل و مشخص شدن بهتر سطح گسیختگی احتمالی، یک نوار نازک ماسه‌ی قرمز رنگ در مجاورت جداره‌ی شفاف جعبه ریخته شد. در مرحله‌ی چهارم، بعد از نصب لایه‌ی ژئوتکستایل، همان‌طور که در مورد ساخت لایه‌ی پی توضیح داده شد، خاک ریخته و کوبیده شد. طول مهار المان مسلح‌کننده، بر روی سطح لایه‌ی خاک برگشته شد. کلیه‌ی مراحل در ساخت تمامی لایه‌های مدل یکسان بوده و تکرار شده است. با پایان یافتن ساخت تمامی لایه‌های مدل، تخته و قطعات چوبی از مقابل دیوار خاک مسلح برداشته شدند. سپس پی نواری در تمامی مدل‌های تحت اثر سربار در فاصله‌ی



شکل ۳. لایه‌ی ژئوتکستایل آماده‌شده جهت نصب در مدل.

جدول ۵. مشخصات مدل‌های مورد آزمایش.

مدل	ارتفاع مدل (mm)	زاویه‌ی نمای مدل (درجه)	تعداد لایه‌های مسلح‌کننده	طول لایه‌های مسلح‌کننده (mm)	فاصله‌ی عمودی لایه‌ها (mm)	سر بار (Kpa)	درصد رطوبت (%)
GRW۱	۱۲۰	۹۰	۶	۱۰۲	۲۰	-	۵
GRW۲	۱۲۰	۹۰	۶	۱۰۲	۲۰	۴	۵
GRW۳	۱۲۰	۹۰	۶	۱۰۲	۲۰	-	۱۱٫۵
GRW۴	۱۲۰	۹۰	۶	۱۰۲	۲۰	۴	۱۱٫۵
GRW۵	۱۲۰	۹۰	۶	۱۰۲	۲۰	-	۱۵
GRW۶	۱۲۰	۹۰	۶	۱۰۲	۲۰	۴	۱۵



شکل ۴. نشست بالای دیوار بر حسب درجه‌ی اشباع.

۲۰ میلی‌متری از تاج دیوار قرار گرفت ( $D/H = 0,167$ ) که  $D$  فاصله‌ی سربار از تاج و  $H$  ارتفاع دیوار است. پس از آن برای جلوگیری از کاهش رطوبت مدل از درپوش پلاستیکی بر روی جعبه‌ی ساخت مدل استفاده شد.

### ۷.۳. روش انجام آزمایش

در پژوهش حاضر، نحوه‌ی اعمال شتاب به مدل به صورت افزایشی و با گام‌های  $10\text{ g}$  تا شتاب  $40\text{ g}$  و گام‌های  $5\text{ g}$  از شتاب  $40\text{ g}$  به بالا بوده است. به منظور برقراری تعادل نیروها بعد از رسیدن مدل به هر شتاب، دستگاه به مدت  $30$  ثانیه در آن شتاب باقی ماند. شتاب هدف در پژوهش حاضر،  $80\text{ g}$  بود. در پایان آزمایش، لایه‌های ژئوتکستایل از درون مدل بیرون آورده شدند و جهت بررسی‌های بیشتر نظیر پارگی و یا کش آمدگی و مشاهده‌ی کرنش‌های ماندگار در لایه‌ها بازبینی شدند.

### ۱.۴. تأثیر رطوبت و سربار در نشست بالای دیوار

شکل ۴، نتایج نشست بالای دیوار بر حسب درجه‌ی اشباع را نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، می‌توان از طریق درصد رطوبت، درجه‌ی اشباع مدل‌ها را محاسبه کرد. در شکل ۴ که مربوط به ۶ مدل آزمایش شده است (۳ مدل مربوط به حالت‌های با سربار و ۳ مدل حالت بدون سربار)، با افزایش درصد رطوبت، میزان نشست افزایش یافته و شیب نمودار نشست در بین درصد رطوبت‌های ۵ و ۱۱٫۵ بیش از ۲ برابر شیب نمودار بین درصد رطوبت‌های ۱۱٫۵ و ۱۵ بوده است و این نشان می‌دهد که خاک با ریزدانه با درصد رطوبت‌های کم، عملکرد خوبی دارند، چون در درصد رطوبت‌های کم خاک هنوز به مرحله‌ی خمیری نرسیده است و حالتی سفت دارد. این موضوع در هر دو حالت با سربار و بدون سربار اتفاق می‌افتد. در شتاب هدف، در حالتی که سربار بر روی مدل قرار دارد،  $S/H$  تقریباً ۵٪ نسبت به حالت بدون سربار افزایش یافته است، که در آن  $S$  نشست و  $H$  ارتفاع دیوار خاک مسلح است.

### ۲.۴. تأثیر رطوبت و سربار در تغییر شکل نمای دیوار

تغییر شکل افقی نمای دیوار برای هر کدام از ۶ مدل در شکل ۵ نشان داده شده است. از آنجا که شتاب هدف در پژوهش حاضر،  $80\text{ g}$  است، تغییر شکل‌ها بر اساس  $80\text{ g}$  در مقیاس واقعی گزارش شده‌اند. از شکل ۵ می‌توان دریافت که در آزمایش‌هایی که درصد رطوبت مدل ۵٪ است، تغییر شکل‌ها به صورت یکنواخت‌تری در تمام ارتفاع مدل رخ داده است. در مدل GRW۶ تغییر شکل نمای دیوار تقریباً ۳ برابر مدل GRW۲ است. این موضوع روشن می‌کند که در خاک مسلحی که ۲۰٪ ریزدانه

### ۴. تحلیل نتایج

آنالیز دیجیتالی تصاویر، کاربردهای زیادی در مهندسی ژئوتکنیک، همانند: ثبت خصوصیات تغییر شکل استاتیکی و دینامیکی خاک، تعیین سطوح گسیختگی در سازه‌های نگهدارنده، تعیین عملکرد ژئوتکستایل و پاسخ‌های دقیق خاک به شرایط مختلف بارگذاری دارد.

در پژوهش حاضر، نشانگرهای پلاستیکی به حالت I شکل بریده شده و طول هر طرف آن ۶ میلی‌متر بوده و یک دایره‌ی مشکی توپر به قطر  $3/5$  میلی‌متر روی آن چاپ شده است. نشانگرهای مذکور با فواصل مرکز به مرکز  $10$  میلی‌متر بر روی لایه‌ی ژئوتکستایل نصب شد. مختصات نشانگرهای دائمی به‌عنوان مبدأ در نظر گرفته شده است. برای هر آزمایش سانترفیوژ اطمینان حاصل شده است که محور دوربین و مدل عمود بر یکدیگر باشند. فیلم ضبط شده توسط دوربین دیجیتال بر روی حافظه‌ی آن ذخیره شده است. لذا پس از پایان آزمایش، فیلم استخراج و در شتاب‌های مورد نظر، فریم‌های ضبط شده از آن جدا شدند. سپس با استفاده از عکس‌های مذکور، عملیات پردازش تصویر و آنالیز تصاویر انجام شدند. کیفیت عکس‌های دیجیتالی با روش‌های استاندارد افزایش کیفیت، افزایش یافت. برای آنالیز تصاویر دیجیتالی از نرم‌افزار GetData Graph digitizer ۲٫۲۶ استفاده شد. مبدأ مختصات دستگاه دکارتی در تمامی عکس‌ها معین و مختصات تمامی نشانگرها در عکس‌های مورد نظر قرائت شد. سپس مختصات نشانگرها در عکس‌های متوالی تطبیق داده شد.

را در میان مدل‌ها دارد. شکل ۶ الف، تصویر مدل در حین چرخش سانتی‌فیوژ و شکل ۶ ب، تغییرشکل کلی توده‌ی دیوار را نشان می‌دهد. موقعیت اولیه‌ی دیوار و تغییرشکل‌ها در شکل ۶ ب، مربوط به مقیاس واقعی در شتاب هدف است.

### ۳.۴. توزیع کرنش در المان‌های مسلح‌کننده و سطح گسیختگی

احتمالی و مقایسه‌ی آن با سطح لغزش گزارش شده از FHWA ۲۰۰۱ [۲]

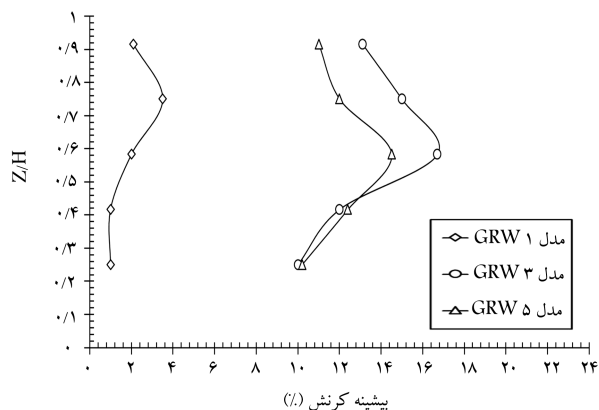
از آنجا که کرنش‌های بزرگ در لایه‌های مسلح‌کننده‌ی موردانتظار است، روش آنالیز تصاویر دیجیتالی، توزیع کرنش در طول لایه‌های مسلح‌کننده را به خوبی ارزیابی می‌کند. برای این روش می‌توان جابه‌جایی تدریجی نشانگرهای پلاستیکی چسبیده‌شده به لایه‌های مسلح‌کننده را محاسبه کرد. این روش استفاده از آنالیز تصاویر دیجیتالی در آزمایش‌های سانتی‌فیوژ، برای به دست آوردن کرنش ژئوتکستایل بدون استفاده از ابزارگذاری‌های داخلی مناسب است.

اگر  $A$  و  $B$  دو نشانگر مجاور یکدیگر باشند و مختصات اولیه‌ی آن‌ها  $A(x_1, y_1)$  و  $B(x_2, y_2)$  و مختصات ثانویه‌ی آن‌ها برابر با  $A'(x'_1, y'_1)$  و  $B'(x'_2, y'_2)$  باشد، کرنش بین آن‌ها 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.

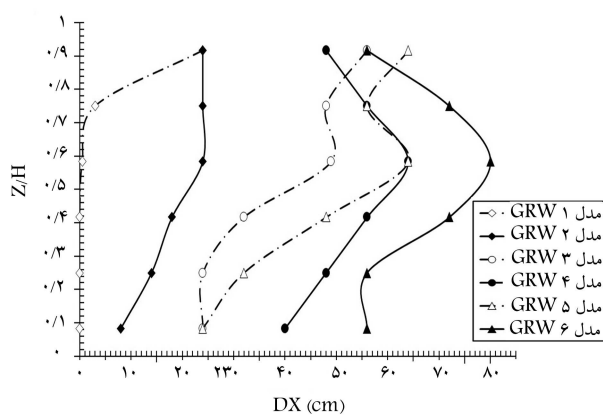
شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب توزیع کرنش بیشینه‌ی لایه‌های مسلح‌کننده در ارتفاع مدل دیوار قائم بدون سربار و تحت اثر سربار را در درصد رطوبت‌های مختلف نشان می‌دهد. از شکل‌های مذکور می‌توان دریافت که در حالت دیوار قائم بدون سربار و با ۵٪ رطوبت، مقدار کم کرنش‌ها به این دلیل است که خاک دارای چسبندگی خوبی است و سرباری هم وجود ندارد که دیوار تحت کشش زیادی قرار گیرد و به همین دلیل خود خاک، پایداری خوبی دارد. در حالت تحت اثر سربار، با اینکه خود خاک مقاومت خوبی دارد، ولی به دلیل وجود سربار و بیشتر شدن نیروهای کششی، مسلح‌کننده به کار می‌افتد. در حالت دیوار قائم تحت اثر سربار با افزایش درصد رطوبت از ۵ به ۱۱٫۵ مقدار کرنش‌ها تقریباً ۲ برابر شده است و لذا خاک از حالت سفتی که در ۵٪ رطوبت داشته است، خارج می‌شود و مسلح‌کننده، مقاومت بیشتری



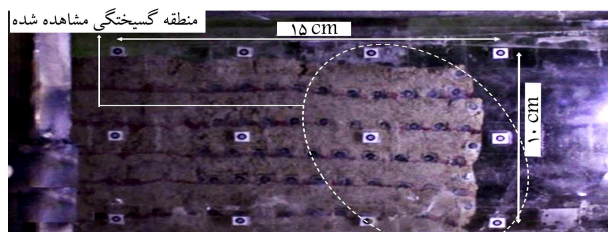
شکل ۷. بیشینه‌ی کرنش در ارتفاع دیوار در درصد رطوبت‌های متفاوت و بدون سربار.

دارد، درصد رطوبت‌های پایین (مثلاً ۵٪) سبب ایجاد چسبندگی زیاد می‌شود و با بالا رفتن سختی خاک، تغییرشکل‌های نمای دیوار کاهش می‌یابد. تفسیر دیگری که می‌توان به آن پرداخت، ایجاد مکش در خاک‌های غیراشباع با نفوذپذیری پایین است، که این امر خود موجب بالا رفتن تنش مؤثر و اضافه شدن مقاومت و سختی خاک می‌شود. در حالی که با زیاد شدن درصد رطوبت، خاک‌های ریزدانه به تدریج حالت خمیری پیدا می‌کنند و موجب تولید تغییرشکل‌های بزرگ‌تر در نمای دیوار می‌شوند. با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که در مدل‌های تحت اثر سربار، به علت مدفون شدن طول مهاری بالاترین لایه در خاک و زیر سربار نواری، حرکت افقی بالاترین لایه کاسته می‌شود و تغییرمکان افقی بیشینه در میانه‌های ارتفاع مدل رخ می‌دهد، در حالی که در مورد مدل‌های بدون سربار به علت نبود تنش قائم کافی روی دیوار، بیشترین تغییرشکل در بالاترین لایه اتفاق می‌افتد.

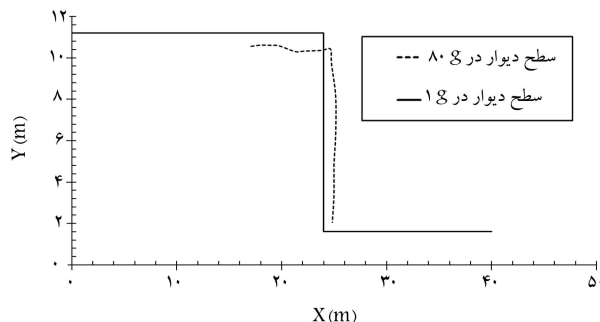
با استفاده از پردازش تصویر، موقعیت نشانگرهای موجود در نما و بالای دیوار در شتاب ۱g و شتاب هدف به دست آمده و سپس تغییرشکل کلی توده‌ی دیوار رسم شد. شکل ۶، مربوط به مدل GRW ۶ در شتاب هدف است، که بیشترین تغییرشکل



شکل ۵. تغییرشکل نمای دیوار برای شتاب هدف در مقیاس واقعی.

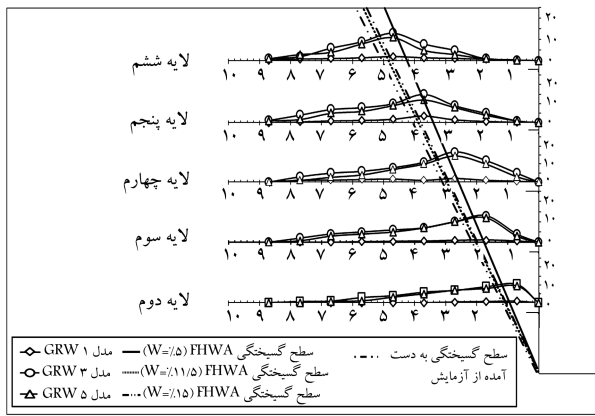


الف) تصویر مدل در حین چرخش سانتی‌فیوژ؛ منطقه گسیختگی مشاهده شده

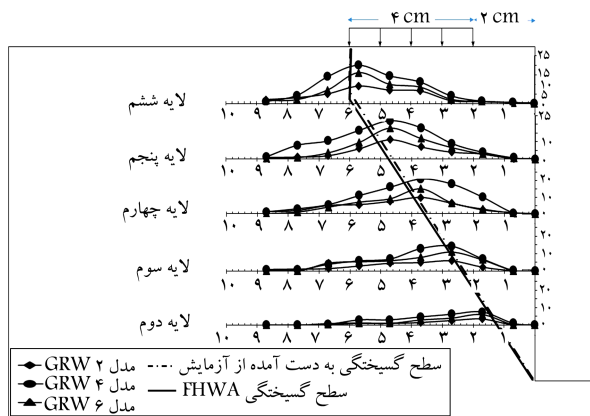


ب) تغییر شکل توده دیوار بر حسب مقیاس واقعی.

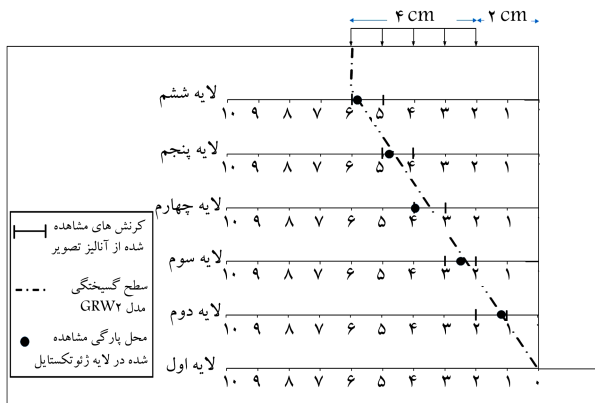
شکل ۶. مدل GRW ۶ در شتاب هدف.



شکل ۹. توزیع کرنش در هر لایه‌ی مسلح‌کننده در درصد رطوبت‌های متفاوت و بدون سربار.

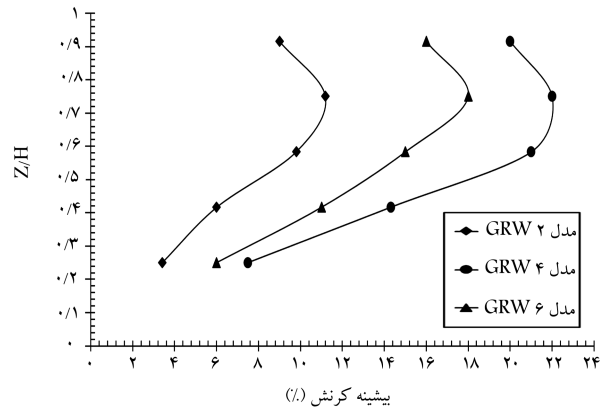


شکل ۱۰. توزیع کرنش در هر لایه‌ی مسلح‌کننده در درصد رطوبت‌های متفاوت و با سربار.



شکل ۱۱. محل کرنش مشاهده‌شده و پارگی لایه‌های ژئوتکستایل برای مدل GRW ۲.

خروج مدل از دستگاه، لایه‌های المان‌های مسلح‌کننده به آرامی از داخل نمونه خارج و بیشتر بررسی 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 است، انجام شده است. در شکل ۱۱، مقایسه‌ی محل پارگی مشاهده‌شده در لایه‌های ژئوتکستایل با سطح گسیختگی احتمالی، که در شتاب هدف با استفاده از آنالیز تصاویر در بازه‌ی ۱



شکل ۸. بیشینه‌ی کرنش در ارتفاع دیوار در درصد رطوبت‌های متفاوت و با سربار.

از خود نشان می‌دهد. در درصد رطوبت ۱۵، با اینکه خاک به اصطلاح شل‌تر شده است و انتظار می‌رود کرنش‌های لایه‌های مسلح‌کننده بیشتر شود، اما این‌گونه نیست؛ چون افزایش رطوبت از ۱۱/۵ به ۱۵ در نمونه، باعث کاهش اصطکاک بین خاک و مسلح‌کننده و در نهایت کاهش کرنش‌ها می‌شود و این در حالی است که تغییر شکل‌ها بیشتر شده است. می‌توان مشاهده کرد که با افزایش درصد رطوبت از ۵ به ۱۱/۵ در حالت بدون سربار، کرنش‌ها در لایه‌های مسلح‌کننده تقریباً ۴ برابر شده است. این افزایش کرنش‌ها نشان می‌دهد که افزایش ۶/۵٪ رطوبت ذکر شده به خاک با ریزدانه، تأثیر زیادی در پایداری خود خاک می‌گذارد.

در تمامی مدل‌های تحت اثر سربار در درصد رطوبت‌های مختلف، مشاهده شد که بیشینه‌ی کرنش بیشینه در لایه‌ی دوم در ۶۷٪ الی ۸۳٪ ارتفاع مدل رخ داده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که در حالت‌های تحت اثر سربار درصد رطوبت تأثیری در محل وقوع ( $Z/H$ ) بیشینه‌ی کرنش بیشینه ندارد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که در مدل‌های تحت اثر سربار، نسبت به حالت بدون سربار، محل وقوع بیشینه‌ی کرنش بیشینه از میانه‌های مدل به نیمه‌ی بالایی مدل منتقل شده است.

با توجه به اینکه مقدار کرنش‌ها در طول هر لایه در فاصله‌های ۱ سانتی‌متری محاسبه شده است و اینکه می‌توان محل بیشینه‌ی کرنش‌ها در هر لایه را در بازه‌ی ۱ سانتی‌متری تشخیص داد، از وصل کردن محل بیشینه‌ی کرنش‌ها به یکدیگر می‌توان محل سطح گسیختگی احتمالی را تعیین کرد. شکل‌های ۹ و ۱۰، توزیع کرنش در طول هر لایه و همچنین سطح گسیختگی احتمالی و سطح لغزش گزارش شده از FHWA را برای مدل‌های با درصد رطوبت مختلف در دو حالت به ترتیب بدون سربار و تحت اثر سربار نشان می‌دهد.

با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰ می‌توان دریافت که درصد رطوبت‌های آزمایش شده، تأثیری در محل سطح گسیختگی ندارد و در مدل‌های تحت اثر سربار، همواره سطح لغزش از سمت بیرونی سربار نواری آغاز شده است. در مدل‌های بدون سربار، سطح لغزش نزدیک‌تر به نما نسبت به مدل‌های تحت اثر سربار قرار می‌گیرند. همچنین مشاهده می‌شود که سطح لغزش به دست‌آمده از آزمایش با سطح لغزش گزارش شده از FHWA ۲۰۰۱ مطابقت خوبی دارد.

لایه‌های مسلح‌کننده‌ی تمامی مدل‌ها در پایان آزمایش از داخل نمونه بیرون آورده شدند و مورد بررسی بیشتر قرار گرفتند. از آنجا که گسیختگی تا قبل و در شتاب هدف در هیچ‌یک از مدل‌های مورد آزمایش رخ نداده است، به منظور صحت‌سنجی سطوح لغزش گزارش شده از آنالیز تصاویر دستگاه در مورد مدل GRW ۲ تا شتاب ۱۰°g افزایش یافت و در شتاب مذکور، گسیختگی رخ داد. بعد از توقف دستگاه و



- است، که نشان‌دهنده‌ی کمتر درگیر شدن مسلح‌کننده‌ها با خاک در این حالت است.
۳. وجود سربار موجب افزایش فشار و در نتیجه بهتر درگیر شدن خاک لایه‌های فوقانی با مسلح‌کننده‌ها می‌شود و از گسیختگی موضعی در قسمت‌های فوقانی جلوگیری می‌کند. در همان حال تغییر شکل افقی و قائم را در لایه‌های بالایی افزایش می‌دهد.
  ۴. بیشینه‌ی کرنش در مسلح‌کننده‌ها در حالت دیوار خاک مسلح بدون سربار با رطوبت ۱۱/۵٪ و ۱۵٪ در ارتفاع حدود ۰/۴۵ تا ۰/۵۵ از تاج دیوار رخ می‌دهد. لکن در حالتی که رطوبت ۵٪ بوده و نیز در هنگامی که سربار اعمال شده است، محل بیشینه‌ی کرنش در حدود ۱/۳ ارتفاع از تاج پدید می‌آید.
  ۵. سطح لغزش به‌دست آمده در دیوار خاک مسلح بدون سربار با درصد رطوبت‌های مختلف تفاوت معناداری ندارند. همین موضوع در مورد دیوار در حالت وجود سربار نیز قابل استناد است. مقایسه‌ی سطح لغزش مشاهده‌شده با آنچه در دستورالعمل FHWA آمده است، نشان‌دهنده‌ی انطباق مناسبی است.
  ۶. نتایج حاصل از بازبینی لایه‌های مسلح‌کننده‌ی بیرون آورده‌شده از مدل در پایان آزمایش نشان می‌دهد سطح لغزش به‌دست آمده از تحلیل تصاویر، تطابق خوبی با محل وقوع پارگی در مسلح‌کننده‌ها دارد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که روش تحلیل تصاویر دیجیتالی، روشی مناسب برای محاسبه‌ی کرنش‌های مسلح‌کننده‌هاست.

سانتی‌متری به‌دست آمده است، مشاهده می‌شود که مطابق آن محل گسیختگی به دست آمده از بازبینی مسلح‌کننده‌ها، در فواصل ۱ سانتی‌متری سطح لغزش به دست آمده از آنالیز تصاویر قرار گرفته است که نشان می‌دهد سطح لغزش به دست آمده از آنالیز تصاویر، تطابق بسیار خوبی با محل وقوع گسیختگی در لایه‌ها دارد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که روش آنالیز تصاویر دیجیتالی، روشی مفید، سودمند، و صحیح برای محاسبه‌ی کرنش‌ها در لایه‌های مسلح‌کننده است و نتایج حاصل از آن، تطابق خوبی با واقعیت دارد.

## ۵. نتیجه‌گیری

- در پژوهش حاضر، دیوار خاک مسلح تشکیل‌شده از ماسه با ۲۰٪ ریزدانه با درصد رطوبت مختلف با سربار و بدون سربار مطالعه شده و این نتایج به‌دست آمده است:
  ۱. در رطوبت‌های کم، سختی و مقاومت خاک زیاد است و چسبندگی بسیج‌شده در مخلوط مانع تغییر شکل‌های افقی زیاد می‌شود. لکن با افزایش درصد رطوبت، مخلوط حالت خمیری پیدا کرده و از مقاومت و سختی آن کاسته شده و تغییر شکل افقی افزایش یافته است.
  ۲. با وجود افزایش قابل ملاحظه‌ی تغییر مکان افقی دیوار خاک مسلح با رطوبت ۱۵٪ نسبت به ۱۱/۵٪، اما کرنش مسلح‌کننده‌ها در حالت اول کاهش یافته

## پانویس‌ها

1. geosynthetic
2. interaction
3. geotechnical
4. geotextile
5. wrap-around

## منابع (References)

- American Geo-synthetics Conference (NAGS2005), Las Vegas, Nevada, USA, GRI-19 (CD-volume) (2005).
5. Mitchell, J.K. and Zornberg, J. "Reinforced soil structures with poorly draining backfills, Part II: Case histories and applications", *Geosynthetics International*, **2**(1), pp. 265-307 (1995).
6. Chen, H-T., Hung, W-Y., Chang, C-C. and et al. "Centrifuge modeling test of a geotextile-reinforced wall with a very wet clayey backfill", *Geotextiles and Geomembranes*, **25**(6), pp. 346-359 (2007).
7. Portelinha, F.H.M., Bueno, B.S. and Zornberg, J.G. "Performance of nonwoven geotextile-reinforced walls under wetting conditions: Laboratory and field investigations", *Geosynthetics International*, **20**(2), pp. 90-104 (2013).
8. 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).
9. Hatami, K. and Esmaili, D. "Unsaturated soil-woven geotextile interface strength properties from small-scale pullout and interface tests", *Geosynthetics International*, **22**(2), pp. 161-172 (2014).
10. Bhattacharjee, D. and Viswanadham, B.V.S. "Numerical studies on the performance of hybrid-geosynthetic-
1. AASHTO, Standard Specifications for Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA (2002).
2. 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).
3. Lee, H. and Bobet, A. "Laboratory evaluation of pull-out capacity of reinforced silty sands in drained and undrained conditions", *Geotechnical Testing Journal*, **28**(4), pp. 1-10 (2005).
4. Sandri, D. "Drainage recommendations for MSE walls constructed with marginal fills", In Proceedings of North



- reinforced soil slopes subjected to rainfall”, *Geosynthetics International*, **22**(6), pp. 411-427 (2015).
11. Thuo, J.N., Yang, K.H. and Huang, C.C. “Infiltration into unsaturated reinforced slopes with nonwoven geotextile drains sandwiched in sand layers”, *Geosynthetics International*, **22**(6), pp. 457-474 (2015).
  12. 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).
  13. Sharifpoor, K., Saba, H.R. and Zamiran, Z. “Experimental study on the effect of geosynthetic-reinforced shear strength fine-grained soil”, Proc. The 1st National Conference of Geotechnic Eng., Ardebil, Iran (2013).
  14. Sohrabi, N. and Hatef, N. “Compare the results of experimental and numerical strength stretch out geogrid and network containment surrounded by a layer of coarse-grained cohesive soil”, *Amirkabir Journal of Science & Research*, **46**(2), pp. 67-78 (2014).
  15. Viswanadham, B.V.S. and Konig, D. “Studies on scaling and instrumentation of geogrid”, *Geotextiles and Geomembranes*, **22**(5), pp. 307-328 (2004).
  16. Salehzade, H., Baziar, M., Moosavi, M. and et al. “Design and construction of a geotechnical centrifuge with radius of 85cm”, *Proc. 2ed National Conference of Civil Eng.*, Tehran, Iran, pp. 174-182 (2005).
  17. Arabi, M. “Centrifuge model test on the behavior of geosynthetic reinforced soil wall under surcharge load”, M.S Thesis, University of Science and Technology, Iran (2014).