

بررسی آزمایشگاهی پایداری گوه شکست خاکریز تحت اثر تعداد و فواصل لایه‌های ژئوتکستایل در دیوار حائل مسلح

امیرمحمد کیانی^۱، مهدی زینی‌وند^{۱*}، جواد احدیان^۱ و ایزابل فالورکا^۲

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۱۳)

چکیده

احداث دیوارهای حائل به میزان فشار محرک وارد از طرف خاکریز پشت دیوار بستگی دارد؛ بنابراین تخمین این فشار یک عامل اساسی در طراحی آن می‌باشد. در این پژوهش با مطالعه آزمایشگاهی روی خاکریز دیوار حائل مسلح شده با ژئوتکستایل طی ۱۰ آزمایش، به بررسی و تحلیل تغییرات شیب شکست و محل تشکیل گوه گسیختگی و کاهش خط شکست در طول و عمق خاکریز پرداخته شد. متغیرهای مورد بررسی در این مقاله، تعداد لایه‌ها و فواصل میانی پوشش ژئوتکستایل هستند. نتایج نشان دادند که وجود لایه‌های ژئوتکستایل تا بیشترین مقدار ۴۱ درصد، میزان طول خط شکست را کاهش داده است. همچنین مقدار زاویه شکست را نیز بهبود بخشیده و در مورد تشکیل گوه گسیختگی در اعماق پایین تا میزان بیشینه‌ای ۱۶ درصد کاسته است. حرکت انتقالی دیوار در حالت محرک، بین نقطه ثابت و ناحیه شکست تمایز بیشتری دارد و لایه‌های مسلح کننده در افزایش ظرفیت باربری و پایداری دیوار حائل نیز مؤثر هستند.

واژه‌های کلیدی: خاک ریزدانه، دیوار نگهبان، ژئوستتیک، فشار جانبی و گوه گسیختگی

۱. گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، ایران.

۲. گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری داخلی، دانشگاه بیرا، پرتغال.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m.zeinivand@scu.ac.ir

مقدمه

امروزه طراحی و اجرای دیوارهای حائل و سازه‌های نگهدارنده پایدار از نظر اقتصادی بسیار ضروری است. استفاده از ایده‌های مناسب و مصالحی با مقاومت زیاد برای بهبود شرایط و حداقل تغییر شکل بدنه دیوار و پایداری خاک‌ریزها برای حفاظت گودبرداری‌ها، نقش مهمی در بهبود نتایج ایفا می‌کند. دیوارهای حائل سازه‌های نگهدارنده هستند که برای ممانعت از ریزش خاک و سنگ یا نفوذ آب به قسمت‌های مهم و پایداری سازه در اماکنی چون سواحل، بنادر و اسکله‌ها، جاده‌ها، گودبرداری و ساختمان‌سازی‌ها و کانال‌های آبرسانی و دیوارهای سیل‌بندها استفاده می‌شوند. مسئله و موضوع اساسی در طراحی این سازه‌ها، شناخت خاک و خصوصیات مربوط به فشار جانبی و گوه گسیختگی می‌باشد تا بتوان ظرفیت باربری و تحمل حجم خاک‌ریز تحت اثر بارگذاری و اعمال نیرو به دیوار را بررسی کرده و با طراحی بهینه و ایمن، سازه را احداث کرد (۱). به دلیل اندرکنش موجود بین سازه یا پی و خاک، وضعیت خاک و فشار وارد بر دیوار بررسی می‌شود (۲). بزرگی نیروی گوه خاک کنار سازه، متناسب با وضعیت حرکت دیوار در ۳ حالت ساکن، مقاوم و محرک بستگی دارد (۷، ۲۲، ۲۶ و ۲۷). جابجایی سازه نگهدارنده به شکل‌هایی چون دوران حول پاشنه یا بالای دیوار، حرکت انتقالی و دوران توأم با جابه‌جایی است (۸).

بررسی نقش خاک ریزدانه و چسبنده بر نیروی محرک وارد بر سازه نگهدارنده نشان داده‌است که با کاهش نیرو، زاویه اصطکاک دیوار و خاک افزایش می‌یابد (۲۳). میزان جابجایی خاک‌های ریز و چسبنده برای ایجاد آستانه حدی همواره مبهم بوده است. اگر حرکت و جابجایی دیوار دائم نباشد، افزایش نیروی جانبی به سبب کاهش نسبت تنش برشی به سطح مقطع گسیختگی همراه خواهد شد. در صورتی که تنش برشی خاک‌ریز بیشتر از مقاومت برشی خاک باشد، پدیده خزش روی می‌دهد که در صورت تثبیت سرعت خزش، مقدار نیروی جانبی ثابت خواهد ماند. حدود ۵۰ درصد

دیوارهای نگهدارنده ساخته شده بر خاک چسبنده و شیب‌ها دارای رفتاری مطلوب نیستند. اگر جابه‌جایی دیوار زیاد باشد، موجب برانگیختگی مقاومت برشی خاک‌ریز می‌شود که در خاک‌ریز تنش‌هایی ایجاد می‌کند (۴، ۱۱، ۲۱ و ۳۰). با بررسی‌های گوناگون عددی و آزمایشگاهی بسیار، دیوارهای فشار جانبی طراحی و سنجش شده‌اند. در پژوهشی با مدل‌سازی عددی بر خاک‌ریز ماسه‌ای و تقویت آن با ژئوستتیک و بررسی طول لایه‌های ژئوگرید، ظرفیت باربری و پایداری دیوار افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد که زاویه دیوار و کاهش فواصل بین لایه‌ها، جابه‌جایی جانبی دیوار را کاهش می‌دهد (۱۳، ۳۳ و ۳۴).

یکی از رایج‌ترین سازه‌های سنتی، دیوارهای خاک مسلح یا تقویت‌شده ژئوستتیک با ژئوتکستایل یا ژئوگرید برای افزایش استحکام کششی است. این گونه دیوارهای حائل به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری، سرعت ساخت‌وساز، مقرون به‌صرفه بودن و پتانسیل برای استفاده از مواد محلی و درجا مورد استقبال هستند (۱۵ و ۱۸)؛ بنابراین برای افزایش ظرفیت باربری دیوارهای نگهدارنده از این مصالح و پوشش‌های ژئوستتیک استفاده می‌شود که با قرارگیری در خاک، اندرکنش خاک و سازه را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد (۵ و ۶). پژوهشگران بسیاری آزمایش‌هایی متعدد درباره خواص مکانیکی دیوارهای نگهدارنده تقویت‌شده با ژئوستتیک‌ها تحت تأثیر بارهای استاتیکی و دینامیکی انجام داده‌اند (۹، ۱۹ و ۲۹).

ارزیابی یک سری آزمایش روی دیوارهای نگهدارنده خاک تقویت‌شده با ژئوستتیک، عوامل گوناگون مؤثری بر نشست، جابه‌جایی و کرنش، فشار جانبی و ظرفیت باربری نهایی سازه را ثبت کرده‌اند که یکی از این موارد، اثر و طول پوشش ژئوستتیک‌هایی مثل ژئوتکستایل و ژئوگرید در محل فونداسیون نواری مجاور دیوار حائل است (۲۰، ۳۱ و ۳۲). در پژوهشی دیگر به بررسی اثر شیب‌دار بودن دیوار و مهار آن با لایه‌های مسلح در یک مدل فیزیکی پرداخته شد. نتایج این بررسی و ارزیابی کارکرد آن در حالت بارگذاری استاتیکی نشان داد که

بنابراین در این مقاله سعی بر آن است تا بتوان ویژگی‌های تغییر شکل دیوار نگهدارنده تقویت شده با ژئوتکستایل را تحت آرایش‌های مختلف و تعداد لایه‌های در محیط خاک ریزدانه که به ندرت در عمل از این روش استفاده شده‌است، نشان داد. بارگذاری روی خاک ریز پشت دیوار نگهدارنده طی این پژوهش، تحلیل و بررسی می‌شود تا بتوان به برآورد فشار جانبی خاک ریز که به ابعاد هندسی گوه گسیختگی خاک ریز وابسته است، دست یافت و از واژگونی دیوار و سازه جلوگیری شود.

مواد و روش‌ها

مشخصات مصالح

در این آزمایش از یک نمونه خاک با ویژگی‌های مشخص و ثابت در خاک ریز استفاده شد. دانه‌بندی این نمونه خاک با استفاده از روش طبقه‌بندی استاندارد خاک با دستگاه لیزری انجام شد و این نمونه، خاک ریزدانه معرفی شد (۳). همچنین با استفاده از آزمایش برش مستقیم، پارامترهای مقاومت برشی یعنی زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی تعیین شدند که همراه مشخصات دیگر نمونه خاک در جدول ۱ مشخصات آن ثبت شده‌اند. این آزمایش در شرایط زهکشی نشده انجام شده‌است. همچنین در شکل ۱ نمودار دانه‌بندی خاک مورد استفاده، نشان‌دهنده ریزدانه بودن آن است.

لایه مسلح‌کننده ژئوستتیک استفاده شده در این پژوهش، ژئوتکستایل بوده‌است که مشخصات آن طبق جدول ۲ است. ژئوتکستایل معمولاً به دو شکل بافته و نبافته تولید می‌شوند که نوع بافته شده آن از در هم تنیدن رشته‌های عمودی و افقی ساخته می‌شوند که موجب پیدایش یک لایه مقاوم است. نوع بافته نشده آن از فیبرهای پلیمری و الیاف هستند که در این آزمایش از آن استفاده شد. این نوع از ژئوتکستایل برای زهکشی مناسب بوده و قدرت باربری خاک را افزایش می‌دهد و به پایداری شیب‌ها کمک می‌کند. مشخصات پوشش ژئوتکستایل استفاده شده در این پژوهش در جدول ۲ آمده است.

اجرای لایه ژئوتکستایل به‌طور مورب سبب کاهش تغییر شکل جانبی و افقی دیوار می‌شود (۲۵).

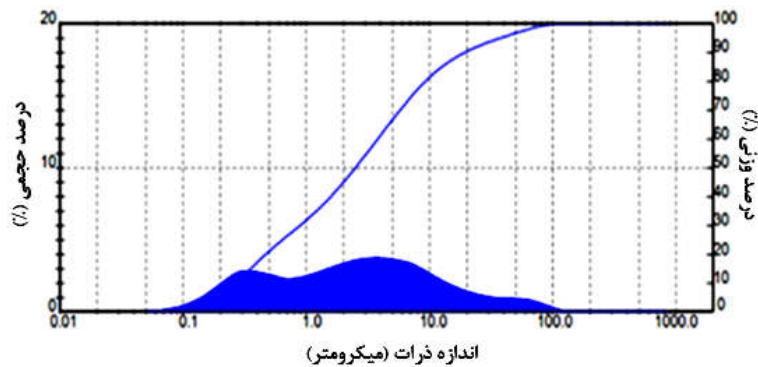
در پژوهشی درباره اثر شرایط بستر و سطح ایستایی بر دیوار مسلح شده با ژئوستتیک، نتایج نشان دادند که کاهش عوامل مقاومتی بستر دیوار منجر به افزایش فشار جانبی وارد بر دیوار شده و جابه‌جایی می‌شود (۱۲). بررسی‌ها روی توزیع فشار جانبی محرک در دو خاک ریز با بارگذاری یکنواخت نشان داد که زاویه شکست، فاصله عمودی بین لایه‌های بکار رفته در خاک ریز پشت دیوار، به شروع حرکت و جابه‌جایی دیوار ارتباط دارند. این موارد در خاک‌های ماسه‌ای شبیه‌سازی شدند و دریافتند که افزایش زاویه دیوار در سازه نگهدارنده مسلح با ژئوستتیک تأثیر زیادی دارد (۲۴).

نتایج بررسی‌ها روی دیوار حائل با سطوح تراکم متفاوت طی یک معادله تعمیم یافته برای پیش‌بینی جابه‌جایی‌های افقی تحت بارهای دینامیکی نشان داده‌است که تراکم لایه‌ها منجر به افزایش قابل توجه تنش‌های افقی در ساختار خاک مسلح می‌شود (۱۰ و ۲۸). نقش بارگذاری بر کرنش پوشش و اثر فاصله و طول آرایش ژئوستتیک بر عملکرد دیوارهای حائل بررسی شدند (۱۴ و ۱۶).

کولمب (۱۷۷۶) برای تعیین نیروی جانبی خاک روی ساختار دیوار حائل بر اساس جابه‌جایی دیوار در حالت محرک و مقاوم، روابطی را ارائه کرد. طبق نظریه کولمب، فشار جانبی خاک در پشت دیوار حائل ناشی از فشار وارده توسط گوه لغزش خاک است. در این نظریه، سطح گسیختگی در بلندای دیوار به‌طور یکپارچه لحاظ می‌شود و گوه لغزش از پایه دیوار تشکیل می‌شود. همچنین رانکین تعیین فشار جانبی خاک در دیوار حائل روابطی با صرف نظر از زاویه دیوار و اصطکاک خاک و دیوار را ارائه کرد که در واقع ساده شده روش کولمب است. در این پژوهش، فرض بر بارگذاری یکسان و عدم یکپارچگی نیروی وارد بر دیوار بوده و باتوجه به قطعه‌بندی افقی می‌توان نیروی وارد بر دیوار را در اعماق مختلف به دست آورد و تحلیل کرد.

جدول ۱. مشخصات خاک مورد استفاده

نوع خاکریز	رده بندی خاک	وزن مخصوص (کیلو نیوتن بر مترمکعب)	چسبندگی (کیلو نیوتن بر مترمربع)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
رس	CL	۱۹	۱۶	۲۶



شکل ۱. نمودار دانه بندی خاک

جدول ۲. مشخصات ژئوتکستایل مورد استفاده در پژوهش (۳)

ویژگی	ضخامت (میلی متر)	جرم (گرم بر متر)	مقاومت نهایی (نیوتن)	مقاومت نفوذ (نیوتن)	نفوذپذیری (سانتی متر بر ثانیه)
GMH 250	۱.۹	۲۵۰	۸۰۰	۵۳۰	۰.۲۴

مدل آزمایشگاهی

برای اجرای اهداف این پژوهش که بررسی تغییر شکل دیوار و نیروی وارد بر آن است، یک مدل آزمایشگاهی فلزی مکعبی که در شکل ۲ آمده است به درازای ۲ متر، پهنای ۵۰ سانتی متر و بلندای ۱/۵ متر در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی دانشگاه شهید چمران اهواز ساخته شد. در این راستا، ۴ بلوک یا کتوهای مجزا که مطابق شکل ۳ هستند، در مدل آزمایشگاهی، تعبیه شده است. خاکریزی با ابعاد یکسان پشت سازه دیوار انجام می‌شود. لایه‌های ژئوتکستایل با طول‌های یکسان و عرض‌های برابر و آرایش ۲، ۳ و ۴ لایه در فواصل مختلف بین لایه‌ها از یکدیگر چیده شده‌اند. همان‌طور که گفته شد، این پژوهش برای بررسی اثر تقویت و تسلیح خاک ریزدانه توسط ژئوتکستایل صورت

گرفته است تا بتوان نیروی وارد بر دیوار حائل را سنجید و بهترین ضریب اطمینان را برای سازه برگزید. در این مدل، یک دیوار حائل در سمت چپ آن طراحی و ساخته شد که از فلز و ورقه ۴ میلی‌متری از سه طرف و از طرف دیگر، یک پلکسی گلاس ۱۰ میلی‌متری برای مشاهده روند تغییرات خاک و دیوار ناشی از اعمال نیرو در حین انجام آزمایش‌ها است. با توجه به میزان نیروی سرباری که دستگاه می‌تواند ایجاد کند، مقیاس هندسی بکار رفته در این مدل ۱:۱۰ است تا بتوان از آن در مدل‌های اصلی و واقعیت نیز استفاده کرد. برای بررسی گوه شکست خاکریز تحت جابه‌جایی محرک بدنه دیوار، پی دیوار به کف مدل ثابت و صلب است. همان‌طور که از شکل ۲ پیداست، اعمال نیرو بر خاکریز توسط



شکل ۲. مدل آزمایشگاهی



شکل ۳. بلوک‌های تعبیه شده در مدل آزمایشگاهی

از رسیدن هر لایه خاک به ارتفاع مورد نظر، لایه بالایی روی لایه زیرین قرار می‌گیرد.

با انجام روند اجرا و ایجاد خاکریز، حرکت بدنه دیوار به‌طور محرک و با اعمال نیرو توسط جک هیدرولیکی روی خاکریز و سرعت کنترل‌شده در مدت‌زمان معین صورت می‌گیرد. این نیرو به میزان نیروی موجود بین خاک و سازه نگهبان افزوده می‌شود که موجب شکست و گسیختگی خاکریز و واژگونی دیوار خواهد شد. اعمال نیرو توسط صفحه بارگذاری سربار روی خاکریز پشت دیوار، موجب افزایش فشار جانبی در توده خاک شده و موجب تنش و لغزش در آن می‌شود؛ پس با سرعت کنترل‌شده و استفاده از ژئوتکستایل به‌عنوان یک

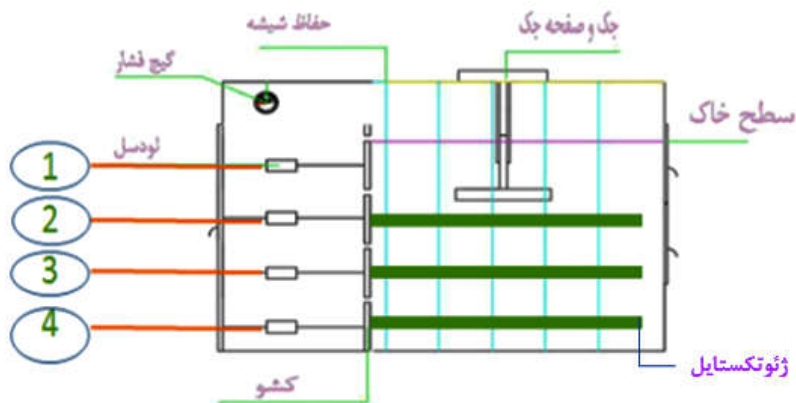
یک جک هیدرولیکی با شکل صفحه بارگذاری معین انجام می‌شود. سطح مقطع صفحه بارگذاری مستطیلی بوده که در شکل ۴ قابل مشاهده است.

روش انجام آزمایش

در این آزمایش، تعداد و فاصله قرارگیری لایه‌های ژئوتکستایل از یکدیگر در خاکریز به‌صورت ۲، ۳ و ۴ لایه است؛ علاوه بر تعداد، فاصله آن‌ها از یکدیگر، ۳ اندازه معین هستند که شکل ۵، حالت ۳ لایه را نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد، بدنه دیوار در مدل به شکل قائم تنظیم شده و لایه‌ها به‌ترتیب روی همدیگر با تراکم ۹۰ درصد قرار می‌گیرند. پس



شکل ۴. نمایی از صفحه بارگذاری مستطیلی



شکل ۵. شمایی از مدل ساخته دیوار حائل

تغییرات جابه‌جایی بلوک‌ها به صورت دستی ثبت می‌شوند که نیروها و عوامل مؤثر بر گوه گسیختگی که در طراحی ایمن دیوار دخیل هستند را تعیین می‌کنند. اساساً برای طراحی سازه نگهبان، گوه گسیختگی خاک‌ریز طبق نظریه‌های کلاسیک در مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک تعیین می‌شود. شکل ۷، شمایی از تئوری کولمب را نشان داده‌است. در این پژوهش و بررسی، شکل منحنی گوه گسیختگی نیز با حالات به دست آمده از آزمایش‌های حاصل از تئوری‌ها مقایسه شده و تفاوت منحنی گوه شکست آزمایش با نظریه‌های کلاسیک همچون رانکین (۱۸۵۷) تحلیل و بررسی می‌شود.

نتایج و بحث

در این پژوهش برای مطالعه نقش لایه‌بندی و تأثیر بهینه وجود ژئوتکستایل و جابه‌جایی و حرکت دیوار حائل بر اساس روش ارائه شده در قیاس با حالت بدون پوشش و نمونه اصل تئوری

مسلح‌کننده، به یافتن اثر طول و تعداد لایه‌های پوششی و فاصله بهینه بین آن‌ها پرداخته می‌شود تا بتوان سازه را از ضریب اطمینان خوبی برخوردار ساخت.

در تمامی آزمایش‌ها پس از آماده‌سازی مدل آزمایشگاهی خاک‌ریز و اعمال نیرو برای دیوار و تشکیل گوه گسیختگی، داده‌برداری میزان جابه‌جایی‌های دیوار و صفحه بارگذاری به صورت دستی انجام می‌شود. برنامه آزمایش‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین میزان نیروهای وارد بر بدنه دیوار و هر بلوک به صورت مجزا به یک نیروسنج متصل و در نهایت میزان نیروی وارد بر هر کدام از آن‌ها به یک دستگاه مبدل داده‌های مربوط به حسگرها و نیروسنج‌ها را به داده‌های عددی تبدیل کرده و روند تغییرات نیروهای جانبی وارد بر بدنه دیوار را ثبت می‌کند. نمایی از لودسل‌ها در شکل ۶ نشان داده شده‌است.

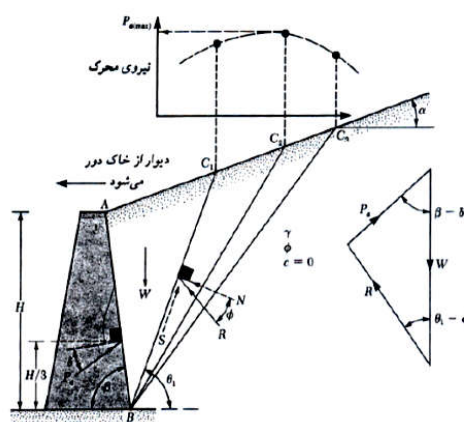
باتوجه به اینکه درون مدل از یک طرف واضح است، این

جدول ۳. مشخصات سناریوهای آزمایش پژوهش

تعداد لایه	فاصله لایه‌ها (سانتی‌متر)
بدون لایه	—
دو لایه	۱۰
	۱۵
	۲۰
سه لایه	۷/۵
	۱۰/۷۵
	۱۵
چهار لایه	۸
	۱۰
	۱۲



شکل ۶. نمایی از لودسل‌ها



شکل ۷. فشار محرک کولمب (ASTM D4595-11، ۲۰۱۱)

همچنین خاک همگن باعث می‌شود که نیروی محرک بیشتر شده و ضریب اطمینان کاهش خواهد داشت؛ پس در ادامه اثر وجود تعداد پوشش‌ها و فواصل بین آن‌ها در خاکریز بررسی شده تا ضریب اطمینان طراحی افزایش یابد.

وجود ۲ لایه پوشش ژئوتکستایل

در حالت وجود ۲ لایه در فاصله متوسط ۲۰ سانتی‌متر از یکدیگر نیز آزمایش‌های بررسی گوه شکست خاکریز ریزدانه انجام شد که شکل ۹، خط شکست در حالت فعال خاک نشان داده شده‌است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، شیب سطح گسیختگی برای لایه فوقانی کمتر شده و شروع خط شکست از فاصله ۲۱ سانتی‌متری از دیوار است. در نزدیکی لایه‌های تقویت‌کننده، مسیر شکست تقریباً با زاویه کمتر از ۵ درجه نسبت به افق حرکت کرده و با ادامه بارگذاری بر خاکریز، این مقدار مجدد بیشتر می‌شود. حال آنکه این میزان شکست، نهایت در عمق ۳۵ سانتی‌متری از روی خاکریز و محل بارگذاری سربار خاتمه می‌یابد. در این سری آزمایش نیز مطابق با شرایط گذشته، سرعت و میزان نیرو و شکل صفحه بارگذاری یکسان در نظر گرفته شد. زاویه شکست نیز در این لایه میانی، همانند لایه بالایی، تقریباً برابر ۴۶ درجه بوده‌است.

وجود ۳ لایه پوشش ژئوتکستایل

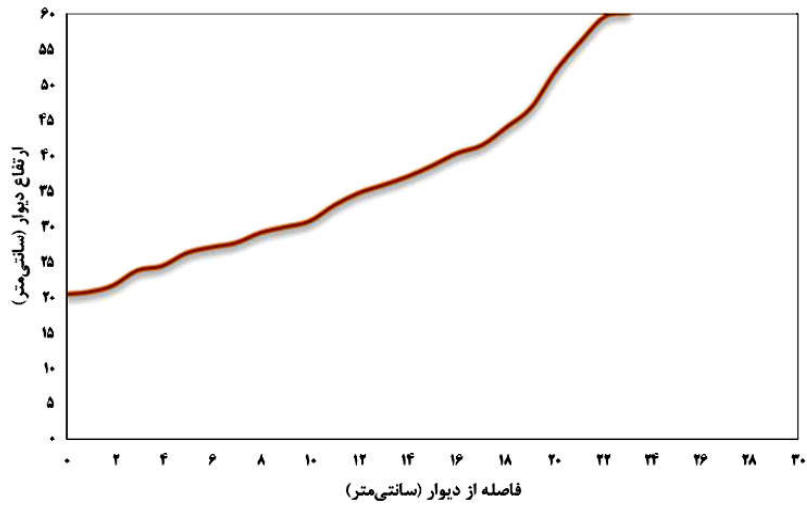
در شکل ۱۰، وجود ۳ لایه ژئوستتیک با فاصله ۱۵ سانتی‌متر از یکدیگر و بررسی مسیر گسیختگی خاکریز پشت دیوار نگهدارنده نشان داد که خط شکست در حالت فعال خاکریز به دیوار نزدیکتر بوده و میزان نشست عمقی در خاکریز به میزان ۲۴ سانتی‌متر بوده‌است. خط شکست در فاصله ۱۷ سانتی‌متری از دیوار پدید آمده‌است. همچنین مقدار زاویه شکست گوه گسیختگی در نزدیکی پوشش بکار رفته برابر با صفر درجه و در حفاصل بین ۲ لایه، تقریباً ۳۸ درجه و در ادامه افقی شده‌است. این مقادیر نشان‌دهنده تأثیر مثبت وجود ۳ لایه مسلح‌کننده نسبت به وجود ۲ لایه نیز است.

کولمب، ترسیم گوه گسیختگی ناشی از اعمال نیروی محرک بر دیوار انجام شد. برای تحلیل و تفسیر نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده در شرایط یکسان لایه‌بندی و تعداد و فاصله آن‌ها که متغیرهای اصلی آن در خاکریز پشت دیوار هستند، پرداخته شد؛ بدین‌صورت که خاکریز بدون پوشش با اعمال نیروی یکسان، جابه‌جایی را به‌صورت نمودار شکل ۷، ثبت کرده‌است. سپس با کارگذاری لایه‌های مسلح به‌ترتیب به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود. تغییر پارامترهای گوه گسیختگی دیوار در نمونه‌های آزمایشگاهی و تئوری الاستوپلاستیک بررسی شده و در پایان نتایج این پژوهش با مشاهدات پیشین مقایسه می‌شود.

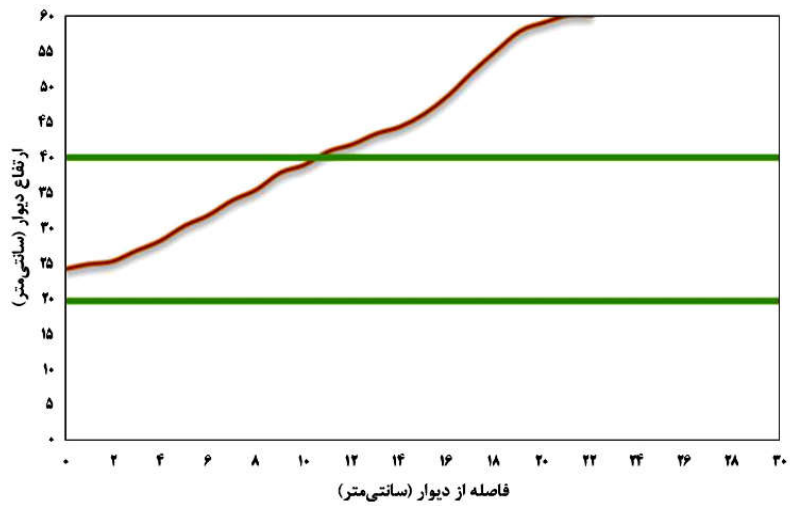
تعداد لایه‌های پوشش ژئوتکستایل

در نخستین حالت قرارگیری، خاکریز بدون هیچ لایه مسلح‌کننده‌ای پشت دیوار نگهدارنده جای گرفته و با اعمال نیرو توسط صفحه بارگذاری، جابه‌جایی به‌صورت عمقی و میزان جابه‌جایی هر صفحه از سازه نگهدارنده که مطابق شکل ۵ است، ثبت شده و نمودار آن در شکل ۸ ترسیم شده‌است.

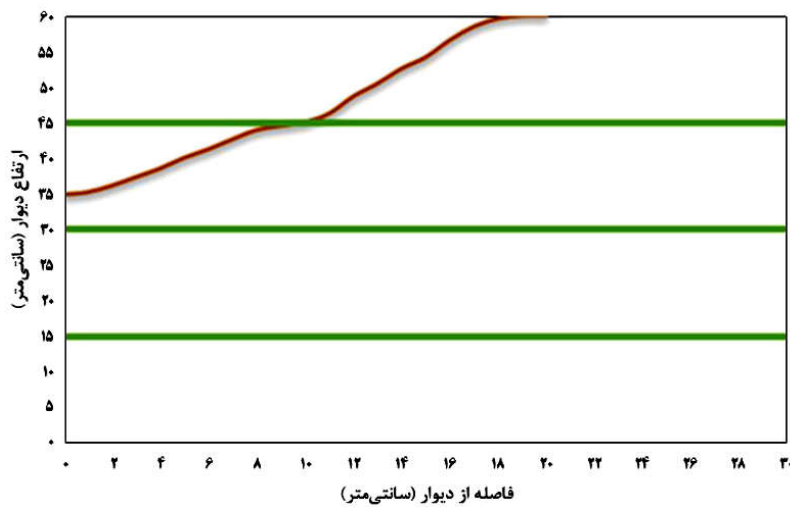
همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، نمودار تغییرات شیب گوه گسیختگی در این خاکریز که از هیچ لایه تقویت‌کننده‌ای در آن استفاده نشده‌است، رسم شده‌است. باتوجه‌به این‌که نوع خاکریز، خشک و ریزدانه رسی است، پس می‌توان طبق معیار موهر-کولمب هم گفت که مقاومت برشی با افزایش تنش نرمال بر صفحه شکست افزایش می‌یابد. در شکل ۶، تشکیل گوه گسیختگی از فاصله ۲۱ سانتی‌متری از دیوار بوده و تا عمق ۴۰ سانتی‌متر از ارتفاع کل دیوار پیشروی کرده‌است. همواره زاویه شکست در خاکریزهای ریزدانه نسبت به درشت‌دانه بیشتر بوده و گوه شکست در خاک‌های رسی، به‌صورت منحنی خم و در نهایت افقی امتداد می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده تغییر شکل پلاستیک در لایه رسی به سبب تنش کششی است، ولی در خاک‌های ماسه‌ای تنش کششی تحمل نمی‌شود.



شکل ۸. گوه گسیختگی خاکریز بدون ژئوتکستایل



شکل ۹. گوه شکست خاکریز با ۲ لایه ژئوتکستایل



شکل ۱۰. گوه شکست خاکریز با ۳ لایه ژئوتکستایل

وجود ۴ لایه پوشش ژئوتکستایل

در شکل ۱۱، تغییرات مسیر خط شکست خاکریز بر اثر وجود ۴ لایه ژئوتکستایل با فاصله ۱۲ سانتی متر از یکدیگر نشان داده شده است. در این شکل گوه شکست دیوار در نزدیکترین فاصله خود از دیوار نگهبان یعنی ۱۳ سانتی متر است. همان طور که اشاره شد، در نزدیکی لایه ژئوستتیک مقدار زاویه شکست کمتر شده و افقی خواهد بود. نشست عمقی با وجود ۴ لایه از پوشش ژئوتکستایل ۱۷ سانتی متر بوده است. زاویه شکست خاکریز در این نمونه تقریباً ۳۵ درجه ثبت و در نهایت افقی شده است. بنابراین می توان گفت که میزان تغییرات در این حالت نسبت به حالات دیگر کمتر بوده و ضریب اطمینان طراحی بالا رفته و پایداری دیوار در برابر نیروی محرک و لنگرهای احتمالی بیشتر خواهد بود.

فواصل بین لایه های پوشش ژئوتکستایل

در این قسمت، میزان تأثیر وجود لایه تقویت کننده و فاصله بین آن ها بررسی شده است. در این مرحله با برداشت میزان نشست عمقی و فاصله پدیدار شدن خط گسیختگی خاکریز، گوه شکست آن ترسیم می شود. همچنین زاویه شکست در خاکریز بررسی خواهد شد.

وجود ۲ لایه پوشش ژئوتکستایل

در این سری از آزمایش های بررسی گوه شکست خاکریز ریزدانه با وجود ۲ لایه ژئوستتیک، نتایج در شکل های ۹، ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده اند. خط شکست در حالت فعال خاک در هر کدام به صورت جداگانه ترسیم شده و تحلیل و تفسیر خواهند شد.

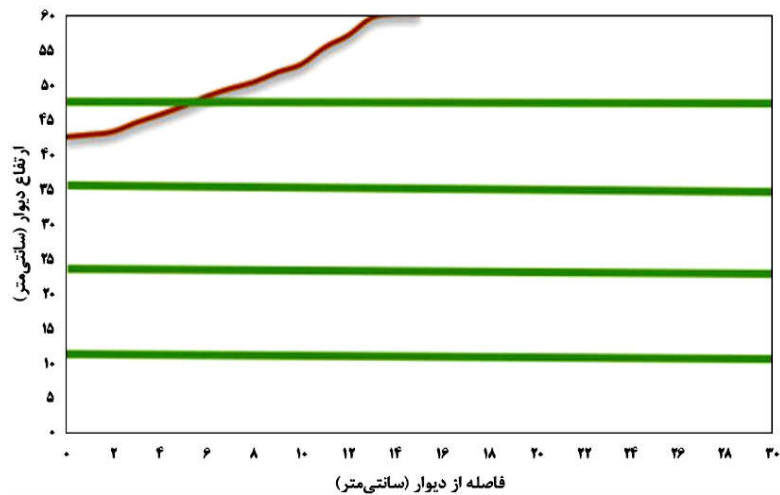
باتوجه به نمودار خط شکست در شکل های ۱۲ و ۱۳، فواصل بین لایه ها در حالت اول ۲۰ سانتی متر و در دو حالت بعدی به ترتیب ۱۵ و ۱۰ سانتی متر لحاظ شده اند. بررسی ها روی خط شکست خاکریز و شیب آن نشان می دهد که هر چه فاصله بین لایه ها کمتر باشد، نشست عمقی و تشکیل گوه گسیختگی در

اعماق بالاتر رخ می دهد. با بررسی زاویه شکست در خاکریز، می توان گفت که در حالت هایی با فواصل کمتر بین لایه های ژئوتکستایل، مقدار آن افزایش می یابد. همچنین در فواصل بین آن ها که کمتر است، فاصله خط شکست از دیوار کمتر اندازه گیری شده است. شکل ۱۴ میزان روند تغییرات نیروی جانبی وارد بر صفحه دیوار را در راستای عمودی نشان می دهد. همان طور که دیده می شود، محور عمودی فشار جانبی بدون بعد و محور افقی ارتفاع دیوار در عرض آن است که بدون بعد نیز است. ابعاد و متغیرهای محورهای این شکل عبارت اند از: ارتفاع دیوار (H)، عرض دیوار (B)، وزن مخصوص خاک (γ)، تنش وارد بر سطح خاک (σ). طبق این شکل، میزان نیروی جانبی وارد بر دیوار در صورت نصب لایه های ژئوتکستایل نسبت به عدم وجود آن ها، بیشتر شده و پایداری بدنه آن افزایش داشته است. در قیاس با روش رانکین (۲۲) بهتر بوده و نزدیک به مشاهدات خسروی و همکاران (۱۷) است.

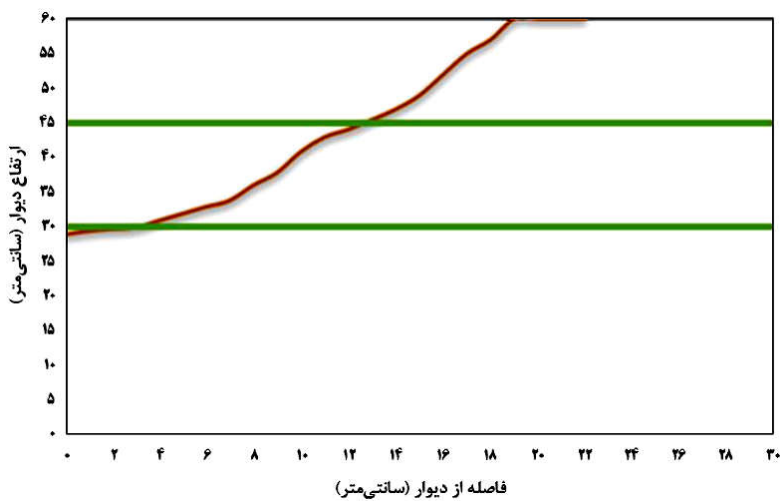
وجود ۳ لایه پوشش ژئوتکستایل

در این بخش به بررسی نقش و تأثیر وجود ۳ لایه ژئوتکستایل پرداخته خواهد شد و نتایج در اشکال ۱۰، ۱۵ و ۱۶ نشان داده خواهد شد. شکست در خاکریز در نمودارها رسم شده و بررسی خواهند شد.

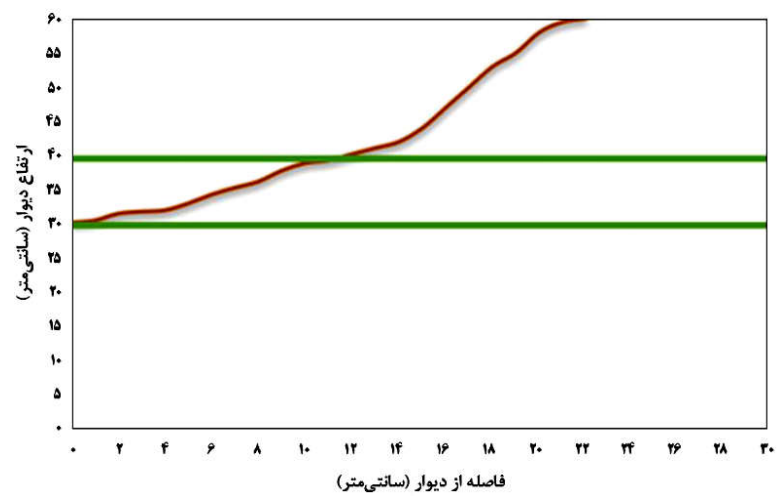
باتوجه به نمودار گسیختگی در اشکال (۱۵) و (۱۶)، فواصل بین لایه ها در حالت نخست، ۱۵ سانتی متر و در دو حالت بعدی به ترتیب ۱۰/۷۵ و ۷/۵ سانتی متر لحاظ شده اند. بررسی ها روی مسیر پیموده شده در شکست خاکریز نشان می دهد که در فاصله کمتر، نشست عمقی کمتر شده است. تشکیل خط شکست در اعماق بالاتر سبب زاویه شکست بیشتر در خاکریز با فاصله های بیشتر می شود؛ پس این میزان، نشانگر تأثیر زیاد این ترکیب آرایش است که در این خاکریز نسبت به حالت قبل است. شکل ۱۷، توزیع فشار جانبی در ارتفاع دیوار را با ۳ لایه کارگذاری شده ژئوتکستایل نشان می دهد. طبق این نمودار، روند نیروی جانبی دیوار نسبت به حالت رانکین تغییرات غیرخطی داشته و روند پایداری آن بهبود یافته است.



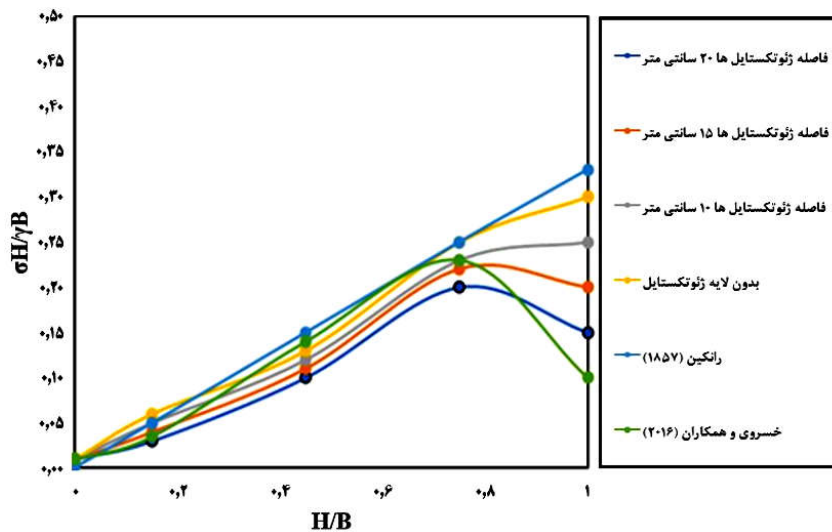
شکل ۱۱. گوه شکست خاکریز با ۴ لایه ژئوتکستایل



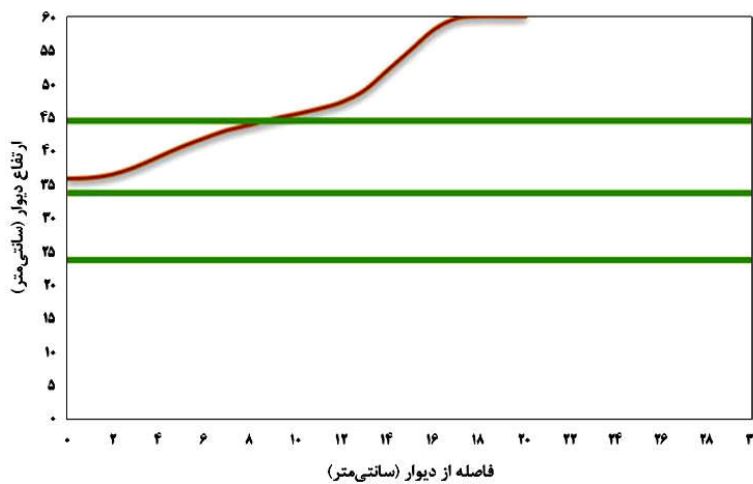
شکل ۱۲. گوه شکست خاکریز با ۲ لایه ژئوتکستایل



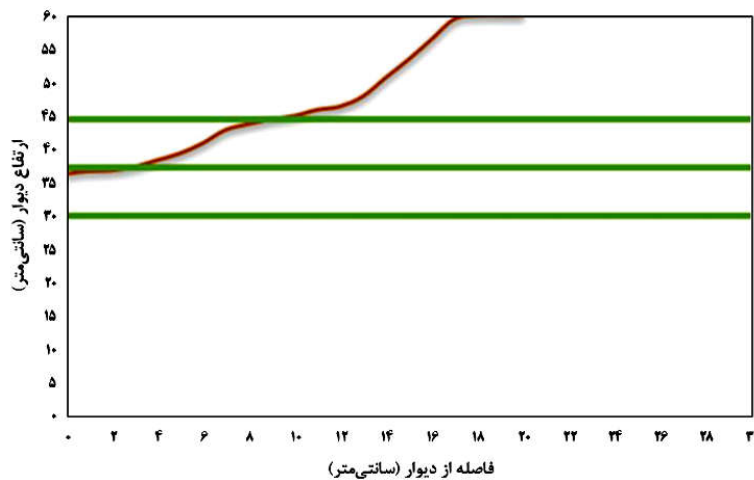
شکل ۱۳. گوه شکست خاکریز با ۲ لایه ژئوتکستایل



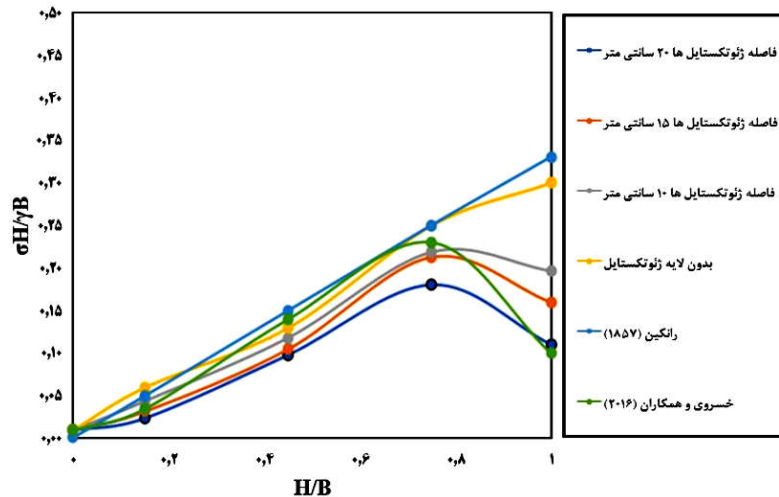
شکل ۱۴. پروفیل توزیع فشار جانبی بدون بعد در ارتفاع دیوار تحت اثر وجود ۲ لایه ژئوتکستایل و مقایسه آن با پژوهش‌های گذشته



شکل ۱۵. گوه شکست خاکریز با ۳ لایه ژئوتکستایل



شکل ۱۶. گوه شکست خاکریز با ۳ لایه ژئوتکستایل



شکل ۱۷. پروفیل توزیع فشار جانبی بدون بعد در ارتفاع دیوار تحت اثر وجود ۳ لایه ژئوتکستایل و مقایسه آن با پژوهش‌های گذشته

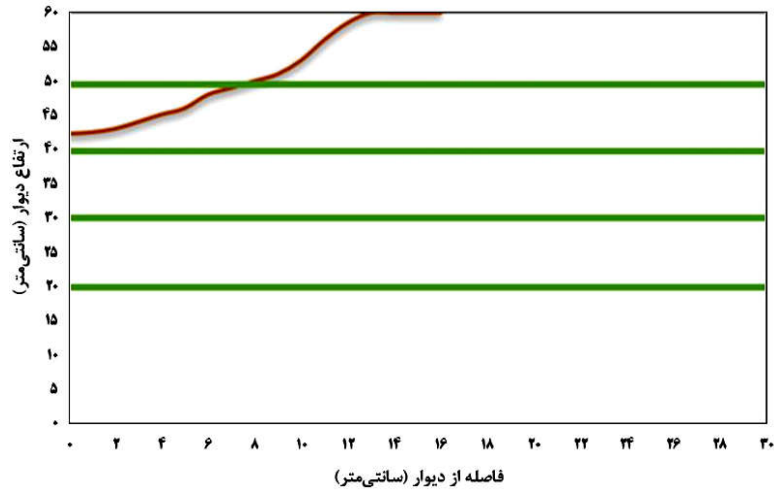
همکاران (۱۷) که در پژوهش‌های خود بررسی داشته‌اند، مقایسه شدند. شکل ۲۱، وجود ۴ لایه ژئوتکستایل را به‌عنوان لایه مسلح‌کننده در خاکریز نشان می‌دهد که طبق آن تغییرات فشار جانبی کمتر شده‌است و پایداری دیوار افزایش داشته‌است. نرخ این تغییرات در قیاس با نصب ۲ لایه و ۳ لایه تسلیح، ۱۰ الی ۱۵ درصد بهبود داشته‌اند.

شکل ۲۱ برای نمایش بهتر اثر قرارگیری بر ویژگی هندسی گوه شکست، مرز آن را در ترکیب لایه‌های مختلف نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، میزان خط گسیختگی خاکریزها با استفاده از تعداد بیشتر لایه‌های ژئوتکستایل، کاهش یافته و همچنین شیب زاویه شکست نیز کمتر شده است. نکته دیگر، میزان عمق گوه گسیختگی است که با افزایش تعداد لایه مسلح‌کننده، کمتر شده و خاکریز را پایدار ساخته است. میزان تغییرات گوه گسیختگی و تغییر شکل آن متاثر از وجود پوشش مسلح ژئوتکستایل نشان داد که بر دو عامل زاویه و عمق تشکیل گوه شکست تأثیرگذار است و در صورت تعدد بیشتر این لایه‌های مسلح، مقدار جابه‌جایی و تشکیل خط شکست حدود ۲۲ الی ۴۱ درصد نسبت به حالت شاهد کوتاه‌تر شده و پایداری سازه بیشتر می‌شود. جدول ۳، میزان زاویه شکست را برای هر ترکیب لایه‌ها بیان کرده‌است.

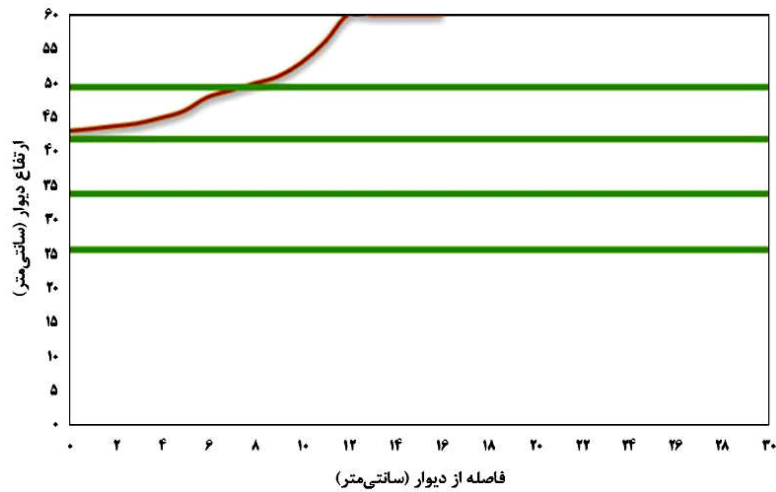
وجود ۴ لایه پوشش ژئوتکستایل

در این قسمت نتایج و بررسی ۴ لایه ژئوتکستایل در شکل‌های ۱۱، ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده‌است. مطابق با نمودارهای رسم‌شده، فواصل بین لایه‌ها در حالت ابتدایی در شکل ۱۱، ۱۲ سانتی‌متر و در اشکال ۱۸ و ۱۹، حالات بعدی به ترتیب ۱۰ و ۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. نمودار شکست خاکریز در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان می‌دهد که در اندازه کمتر بین ژئوتکستایل‌ها، نشست عمقی کمتری تجربه کرده‌است. پدید آمدن گوه گسیختگی در نزدیکی دیوار با کمتر شدن فاصله لایه‌ها نشان می‌دهد که مقاومت خاکریز و پایداری آن نیز بیشتر شده‌است. زاویه شکست بیشتر نیز در خاکریز با فاصله‌های قرارگیری بیشتر هر لایه ژئوتکستایل، نشانگر تأثیر زیاد این ترکیب کارگذاری می‌شود. مقادیر مربوط به زاویه شکست هر نمونه خاکریز به ترتیب در جدول ۳ آمده‌اند. همچنین در شکل ۲۰، گوه شکست هر خاکریز متناسب با تعداد لایه‌های موجود در آن با حالت بدون مسلح‌کننده و همین‌طور خط شکست ناشی از اختلاف فواصل هر خاکریز مقایسه شده است.

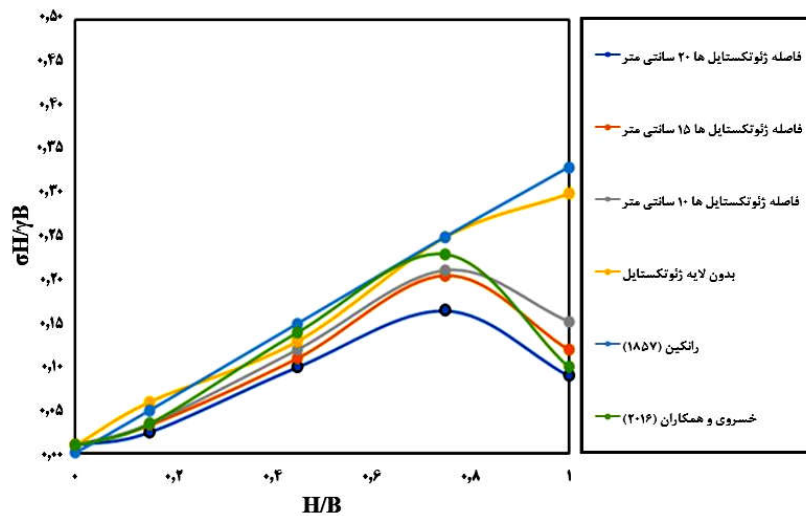
برای اعتبارسنجی نتایج آزمایشگاهی حاضر، به سبب میزان اهمیت فشار جانبی در طرح سازه‌های نگهبان و استفاده از شیوه‌های کلاسیک در طرح، نتایج به‌دست‌آمده با نتایج حاصل از روش کلاسیک رانکین (۲۲) و روش جدید خسروی و



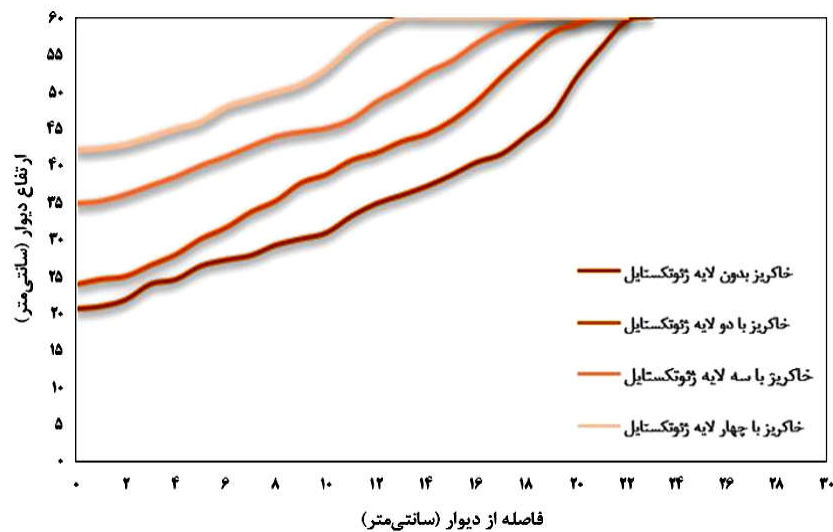
شکل ۱۸. گوه شکست خاکریز با ۴ لایه ژئوتکستایل



شکل ۱۹. گوه شکست خاکریز با ۴ لایه ژئوتکستایل



شکل ۲۰. پروفیل توزیع فشار جانبی بدون بعد در ارتفاع دیوار تحت اثر وجود ۴ لایه ژئوتکستایل و مقایسه آن با پژوهش‌های گذشته



شکل ۲۱. مقایسه گوه شکست خاکریزها

مسلح‌کننده در خاکریز نشان از تغییرات کمتر فشار جانبی و افزایش پایداری دیوار می‌دهد.

به‌طور کلی، تشکیل گوه شکست در خاک ریزدانه مسلح با ژئوتکستایل، با تعداد بیشتر و فاصله‌های نزدیکتر به یکدیگر موجب شد تا طول خط گسیختگی کاهش یابد، عمق تشکیل آن کمتر شود و همچنین محل تشکیل آن برخلاف نظریه‌های کلاسیک متعدد بسیاری از محل پای دیوار نیست. باید توجه داشت که میزان زاویه شکست در جهت ضریب اطمینان بررسی شده‌است؛ در نتیجه پایداری و استحکام دیوار حائل با کاهش نیروهای محرک افزایش می‌یابد. باتوجه به ضریب اطمینان زیاد این پژوهش، می‌توان ضمن برآورد اقتصادی به طرح و ساخت سازه پرداخت.

تقدیر و تشکر

به پاس تهیه امکانات و تجهیزات آزمایشگاهی و حمایت و تأمین منابع برای انجام این پژوهش، از دانشگاه شهیدچمران اهواز قدردانی می‌شود. مقاله حاضر برگرفته از پایان‌نامه نویسنده اول است که توسط پژوهانه نویسنده سوم این مقاله مورد حمایت قرار گرفت و بابت حمایت مالی از این پژوهش، تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

بر اساس نتایج جدول ۳، می‌توان دریافت که در هر حالت آرایش و چیدمان لایه‌ها در خاکریز ریزدانه، تغییر شکل پلاستیک گوه شکست تا چه اندازه بوده‌است و می‌توان گفت که در هیچ حالتی گوه از پای دیوار رخ نداده و همواره با زاویه بالای ۳۵ درجه رخ داده‌است که در راستای ضریب اطمینان پیشرفته است.

نتیجه‌گیری

پژوهش انجام‌شده به بررسی ویژگی گوه گسیختگی خاکریز ریزدانه ناشی از نیروی فعال و محرک دیوار مسلح‌شده با ژئوتکستایل پرداخته است. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین عمق گوه گسیختگی در حالتی اتفاق افتاده‌است که خاکریز از لایه تقویت‌کننده‌ای بهره نمی‌برد و با کارگذاری لایه‌های ژئوتکستایل، این مهم برطرف می‌شود. همچنین با بکارگیری تعداد لایه‌های بیشتری در خاکریز، این گوه گسیختگی در اعماق کمتری تشکیل می‌شود.

میزان عمق گوه شکست با افزایش تعداد لایه تسلیح، کمتر شده و خاکریز پایدار شده‌است. تغییرات عمقی در گوه شکست و تغییر شکل آن نشان داد که وجود پوشش ژئوتکستایل بر پارامترهای زاویه و عمق تشکیل گوه شکست مؤثر است. وجود ۴ لایه ژئوتکستایل را به‌عنوان پوشش

منابع مورد استفاده

1. Ahadiyan, J. and H. Mazarei. 2018. Effect of unsaturated soil texture and compaction in experimental Analysis and River retaining wall failure wedge elastoplasticity. *Irrigation Sciences and Engineering* 40(4): 197-212. doi: 10.22055/jise.2018.13431
2. Aouria, S. S. A. 2014. The study of lateral earth pressures acting on retaining walls due to the displacement modes. 1th National Congress on Civil Engineering, Tehran.
3. ASTM D4595-11. 2011. Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method, American society for testing materials.
4. Bakhtiar, M. and J. Ahadiyan. 2018. Estimation of Lateral Forces on Retaining Walls Adjacent to Layered Embankments in Saturated and non-Saturated Conditions. *Amirkabir Journal Civil Engineering*. 50(1): 19-30.
5. Barani, O.R., M. Bahrami and S.A. Sadrnejad. 2017. A new finite element for back analysis of a geogrid reinforced soil retaining wall failure. *International Journal of Civil Engineering* 16: 435-441.
6. Berg, R.B., J.G. Collin, T.P. Taylor and C.F. Watts. 2020. Case history on failure of a 67 m tall reinforced soil slope. *Geotextile and Geomembrane* 48: 802-811.
7. Benmebarek, N., H. Labdi and S.A. Benmebarek. 2016. Numerical Study of the active earth pressure on a Rigid Retaining Wall for Various modes of Movements. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 53(1): 39-45.
8. Chen, L. 2014. Active earth pressure of retaining wall considering wall movement. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 18(8): 910- 926.
9. Collin, J.G., T.D. Stark, A. Lucarelli. T.R. Taylor and R.R. Berg. 2021. Stability and stress-deformation analyses of reinforced slope failure at Yeager Airport. *Journal of Geotechnic and Geoenvironmental Engineering* 147: 04020179.
10. Ehrlich, M., S.H. Mirmoradi and R.P. Saramago. 2012. Evaluation of the effect of compaction on the behavior of geosynthetic-reinforced soil walls. *Geotextile and Geomembrane* 34: 108-115.
11. Fang, Y.-S., T.-J. Chen and B.-F Wu. 1994. Passive earth pressures with various wall movements. *Journal of Geotechnical Engineering* 120(8): 1307-1323.
12. Ghiasi, V. and A. Farzan. 2020. Numerical Study of The Effects of Groundwater and Bed Resistance Conditions On The Behavior of Geosynthetic Soil Walls. *Sharif Journal of Civil Engineering* 35.2(4.2): 141-148. doi: 10.24200/j30.2018.5273.2246.
13. Ghiasi, V. and A. Farzan. 2019. Parametric Investigation of Geosynthetics Reinforced Soil Wall Seated on Compressible Bed. *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 51(2): 231-242. doi: 10.22060/ceej.2018.13337.5383.
14. Hore. R., S. Chakraborty and A.M. Shuvon, M. Bari and M.A. 2021. Ansary. Dynamic response of reinforced soil retaining wall resting on soft clay. *Transport Infrastructures of Geotechnol* 8: 607-628.
15. Hoseini, M.H., A. Noorzad and M. Zamanian. 2021. Physical modelling of a strip footing on a geosynthetic reinforced soil wall containing tire shred subjected to monotonic and cyclic loading. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 34(10): 2266-2279.
16. Jha, V. A., J. B. Patel, V. A. Sawant and Y. K. Tandel. 2023. Flood Hazard Assessment of Water-front Geosynthetic Reinforced Soil Wall for Dam Regulation Rule Level. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics* 36(4): 640-648.
17. Khosravi, MH., T. 2016. Pipatpongsa and J. Takemura. Theoretical analysis of earth pressure against rigid retaining walls under translation mode. *Soils and Foundations* 56 (4): 664-675.
18. Koerner, R.M. and G.R. Koerner. 2018. An extended data base and recommendations regarding 320 failed geosynthetic reinforced mechanically stabilized earth (MSE) walls. *Geotextile and Geomembrane* 46: 904-912.
19. Li, L.H., C.D. Yu, H.L. Xiao, W.Q. Feng, Q. Ma and J.H. Yin. 2020. Experimental study on the reinforced fly ash and sand retaining wall under static load. *Construction and Building Material* 248: 118678.
20. Liu, F.Y., C. Zhu, G.H. Yuan and J. Wang. 2021. Behavior evaluation of a gravelly soil geogrid interface under normal cyclic loading. *Geosynthetic International* 28: 508-520.
21. Memarian, S., J. Ahadiyan and H. Reza Karimi. 2023. Assessment of vertical pile reinforcement effect on behavior of foundations placed on Slopes: An experimental and numerical study. *Ain Shams Engineering Journal* 14(12): 102233. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102233>.
22. Peck, R. B. 1969. Deep excavations and tunneling in soft ground. *Proc. 7th ICSMFE* 4: 225-290.
23. Rao, P., Q. Chen, Y. Zhou, S. Nimbalkar and G. Chiaro. 2015. Determination of active earth pressure on rigid retaining wall considering arching effect in cohesive backfill soil. *International Journal of Geomechanics* 16(3): 04015082.
24. Salehi Alamdari, N., H. Katebi and M. H. Khosravi. 2022. Investigation of Lateral Earth Pressure Distribution Against a Rigid Retaining Wall Under Uniform Surcharge in Single and Two-Layer Soil Through Small- Scale Physical Modeling. *Journal of Civil and Environmental Engineering* 52.2(107): 89-105. doi:

- 10.22034/jcee.2022.31007.1741.
25. Shabani, M., M. Rowshanzamir and A. Eslami. 2016. Evaluation of Performance Reinforced Soil Retaining Wall with Oblique Reinforcements, Slope Facing and Reinforcements Anchor. *Modares Civil Engineering journal* 16 (1): 55-68.
 26. Sivakumar Babu, G., V. Singh and B. Srinivasa Murthy. 2011. Soil nailing for rehabilitation of reinforced earth wall distress. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement* 164(4): 235-244.
 27. Terzaghi, K., R. B. Peck and G. Mesri. 1967. Soil mechanics in engineering practice. John Wiley and Sons, Canada.
 28. Udomchai, A., S. Horpibulsuk, C. Suksiripattanapong, N. Mavong, R. Rachan and A. Arulrajah. 2017. Performance of the bearing reinforcement earth wall as a retaining structure in the Mae Moh mine. *Geotextile and Geomembrane* 45(4): 350-360.
 29. Wang, H., G. Yang, Z. Wang and W. Liu. 2020. Static structural behavior of geogrid reinforced soil retaining walls with a deformation buffer zone. *Geotextile and Geomembrane* 48: 374-379.
 30. Wang, J.Q., L.J. Xu, J.F. Xue and Y. Tang. 2020. Laboratory study on geogrid reinforced soil wall with modular facing under cyclic strip loading. *Arabian Journal of Geosciences* 13: 398.
 31. Xiao, C.Z., Q.J. Chen and J. Han. 2013. Experimental study of performance of geogrid-reinforced retaining wall subjected to load from strip foundation at the top surface of wall. *Rock Soil Mechanics* 34: 1586-1592.
 32. Xiao, C.Z., J. Han and Z. Zhang. 2016. Experimental study on performance of geosynthetic-reinforced soil model walls on rigid foundations subjected to static footing loading. *Geotextile and Geomembrane* 44(1): 81-94.
 33. Zhang, W., Z. Hou, A. T. C. Goh and R. Zhang. Estimation of strut forces for braced excavation in granular soils from numerical analysis and case histories. *Computers and Geotechnics* 106: 286-295.
 34. Zhang, R., A. Teck, C. Goh, Y. Li, L. Hong and W. 2021. Zhang. Assessment of apparent earth pressure for braced excavations in anisotropic clay. *Acta Geotechnica* 16(5): 1615-1626.

Experimental Investigation of Embankment Wedge Failure's Stability under the Effect of the Number and Spacing of Geotextile Layers in the Reinforced Retaining Wall

A.M. Kiyani¹, M. Zeinivand^{1*}, J. Ahadiyan¹ and I. Falorca²

(Received: April 27-2024 ; Accepted: August 3-2024)

Abstract

The design of retaining walls depends on the amount of driving pressure from the backfill of the wall. Therefore, estimating this pressure is an essential factor in its design. In this research, the changes in the slope of failure, the place of the failure wedge, and the reduction of the failure line along the length and depth of the embankment were investigated on the retaining wall embankment reinforced with geotextile during ten tests in a laboratory study. The parameters under investigation in this article are the number of layers and the distances between the geotextile layers. The results showed that the presence of geotextile layers reduced the length of the fracture line up to 41%. It has also improved the value of the fracture angle and reduced the formation of the rupture wedge in the lower depths up to a maximum of 16%. The translational movement of the wall in the actuation state has a greater distinction between the fixed point and the failure zone, and the reinforcing layers are also effective in increasing the bearing capacity and stability of the retaining wall.

Keywords: Fine-grained soil, Retaining wall, Geosynthetics, Lateral pressure, Failure wedge

1. Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2. Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Interior Architecture, University of Beira, Portugal.

*: Corresponding author, Email: m.zeinivand@scu.ac.ir