

تاثیر محصورسازی در لایه ماسه و ایجاد خمیدگی انتهایی بر بهبود مقاومت بیرون کشش تسمه پلیمری در رس

مازیار غلامی شولی¹، سید محمد بینش^{2*}، پیلتن طباطبایی شوریجه²

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز

² دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز

دریافت: 1403/9/19، بازنگری: 1403/12/26، پذیرش: 1404/2/29، نشر آنلاین: /././.

چکیده

طراحی و ساخت دیوارهای حائل خاک مسلح با توجه به ویژگی‌های ژئوتکنیکی مناسب و مقرون به صرفه بودن، در سال‌های اخیر مورد توجه مهندسان و پژوهشگران قرار گرفته است. تسلیح خاک با استفاده از تسمه پلیمری روشی ساده، مؤثر و ارزان برای بهبود رفتارهای مقاومتی و تغییرشکلی دیوارهای حائل خاک مسلح می‌باشد. در این پژوهش به منظور افزایش مقاومت بیرون کشش تسمه‌های پلیمری در خاک رس از ترکیب دو راهکار محصورسازی تسمه پلیمری در لایه نازکی از ماسه و ایجاد ناحیه‌ای خمیده در انتهای تسمه استفاده شده است. آزمایش‌های بیرون کشش بزرگ مقیاس تحت فشارهای سربار مختلف برای تسمه ساده و تسمه با انتهای خمیده (U-شکل) انجام شده و مقاومت بیرون کشش تسمه U-شکل با مقاومت بیرون کشش تسمه ساده در ماسه و همچنین در خاک رس مقایسه شده است. سپس تاثیر محصورسازی تسمه U-شکل در لایه‌های نازکی از ماسه با ضخامت‌های مختلف، در محیط رسی بررسی گردیده است. نتایج نشان داد که ایجاد خمیدگی U-شکل در انتهای تسمه که همراه با افزایش 30% در طول تسمه مصرفی است، مقاومت بیرون کشش را نسبت به تسمه ساده بیش از سه برابر افزایش می‌دهد. همچنین محصورسازی تسمه U-شکل در لایه نازک ماسه، مقاومت بیرون کشش را تا حدود پنج برابر نسبت به تسمه ساده در خاک رسی افزایش می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: بهسازی خاک، ماسه، رس، تسمه پلیمری، آزمون بیرون کشش.

1- مقدمه

های پلیمری به عنوان مسلح کننده بسیار اقتصادی‌تر از تسمه‌های فولادی است. علاوه بر این، ممکن است مقاومت تسمه‌ها یا شبکه‌های فولادی با گذشت زمان به علت خوردگی کاهش یابد، که این امر به نوبه خود می‌تواند باعث زوال مسلح کننده، بیرون کشیده شدن مسلح کننده یا جابجایی‌های بیش از حد مجاز دیوار گردد. امروزه، تسمه‌های پلیمری به علت اجرای ساده، مقاومت کششی بالا، ارزان بودن، ویژگی‌های خزشی کمتر، دوام در برابر مواد شیمیایی و اشعه فرابنفش، مقاومت در مقابل حمله ریزجانداران⁴ و آسیبهای مکانیکی از محبوب‌ترین مسلح کننده‌ها برای احداث دیوارهای حائل خاک مسلح می‌باشند (Panah و Eftekhari, 2021؛ Yünkül و Gürbüz, 2022). اصلی‌ترین ضعف تسمه‌های پلیمری نسبت به ژئوگریدها به منظور کاربرد در دیوار حائل خاک

دیوارهای حائل خاک مسلح به دلیل هزینه کمتر، ظرافتهای ظاهری بیشتر و روشهای اجرای ساده‌تر و سریع‌تر نسبت به سایر انواع دیوارهای حائل مرسوم از محبوبیت بیشتری برخوردار می‌باشند. تعداد زیادی از انواع مسلح کننده‌های فلزی (نظیر شبکه فولادی یا تسمه فولادی) و ژئوسینتتیکها¹ (نظیر ژئوتکستایل²، ژئوگرید³ و تسمه‌های پلیمری) در ساخت دیوارهای حائل مسلح مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی از پژوهش‌های پیشین (Yako و Christopher, 1988؛ Durukan و Tezcan, 1992؛ Koerner, 2012) به مقایسه هزینه احداث دیوارهای حائل خاک مسلح با استفاده از انواع مسلح کننده‌ها نظیر تسمه‌های فولادی، ژئوگرید و تسمه‌های پلیمری پرداخته‌اند و گزارش نموده‌اند که کاربرد تسمه -

³ Geogrid

⁴ Microorganisms

¹ Geosynthetics

² Geotextile

مسلح، مقاومت کمتر آنها در مقابل بیرون کشش از داخل خاک می‌باشد. دلیل بسیج مقاومت کمتر در تسمه‌ها، آن است که مقاومت در مقابل بیرون کشیده شدن از داخل خاک تنها ناشی از اصطکاک سطوح بدنه تسمه و خاک است (که البته در صورت چسبندگی سطح تماس مسلح کننده و خاک نیز در مقاومت اصطکاکی موثر خواهد بود)، در حالیکه در ژئوگرید-ها علاوه بر مقاومت اصطکاکی، یک نیروی مقاوم اضافی در مقابل اعضای عرضی ژئوگرید شکل می‌گیرد. از اینرو، برخی از پژوهش‌ها در رابطه با بیرون کشش تسمه‌ها بر ابداع راهکارهایی برای افزایش مقاومت بیرون کشش با ایجاد عناصری برای بسیج نیروی مقاوم اضافی متمرکز بوده‌اند. به عنوان نمونه، Esfandiari و Selamat (2012) با استفاده از عناصر عرضی تحت عنوان عناصر لنگر بر روی تسمه‌های فلزی، سعی در افزایش نیروی بیرون کشش تسمه-های فلزی از داخل خاک با ایجاد نواحی فشار مقاوم در برابر بیرون کشش داشتند. نتایج آزمایشهای این پژوهشگران نشان داد که رویکرد استفاده شده موثر می‌باشد و بسته به تعداد و عمق عناصر لنگر، مقاومت بیرون کشش تسمه می‌تواند تا حدود 4 الی 5 برابر نسبت به مقاومت بیرون کشش تسمه صاف بدون عناصر لنگر افزایش یابد. Razzazan و همکاران (2018) نشان دادند که کاربرد ناحیه U-شکل انتهایی برای تسمه موجب ایجاد ناحیه‌ای مقاوم در خاک شده که باعث سه برابر شدن بیشینه نیروی بیرون کشش نسبت به تسمه با انتهای آزاد می‌شود. Tajabadipour و Lajevardi (2021) با بهره‌گیری از بخش‌هایی از تایر کامیون به عنوان اعضای عرضی بر روی تسمه سعی در بسیج نیروی مقاوم خاک در برابر بیرون کشش تسمه داشته‌اند. نتایج نشان داد که استفاده از سه عنصر عرضی در طول مورد آزمایش تسمه می‌تواند مقاومت بیرون کشش تسمه پلیمری را تا حدود دو برابر افزایش دهد. Razzazan و همکاران (2022) به منظور بسیج نیروی مقاوم خاک در زمان بیرون کشش تسمه از نصب تعدادی نبشی به عنوان عناصر عرضی بر روی تسمه پلیمری استفاده کردند. نتایج آزمایشها افزایش حدود سه برابر را برای مقاومت بیرون کشش تسمه‌های پلیمری اصلاح شده نسبت به تسمه‌های پلیمری معمولی نشان داد.

یکی از مسائل چالش برانگیز در مورد ساخت دیوارهای خاک مسلح، انتخاب مصالح مناسب به عنوان خاکریز پشت دیوار می‌باشد. معیارهای طراحی موجود به منظور عملکرد بهینه دیوارهای حائل خاک مسلح (Berg و همکاران، 2009a؛ Berg و همکاران، 2009b؛ AASHTO، 2010؛ NCMA، 2010)، بر استفاده از خاکهای دانه‌ای و پرهیز از استفاده از خاکهای ریزدانه برای خاکریز پشت دیوار تاکید دارند. از طرفی مهندسين مجری اغلب به دليل

دسترسی محدود به مصالح دانه‌ای و برای کاهش هزینه‌های مربوط به تامین و حمل و نقل مصالح، تمایل دارند که از خاکهای ریزدانه محلی به عنوان خاکریز پشت دیوار استفاده کنند. اما داده‌های مربوط به مطالعات Koerner و Koerner (2018) نشان می‌دهد که 72% از خرابی‌های مربوط به دیوارهای حائل خاک مسلح ساخته شده در سالهای قبل از 2018 مربوط به دیوارهای حائلی است، که خاکریز آنها از خاک ریزدانه تشکیل شده است. این خرابی‌ها در درجه اول مربوط به زهکشی نامناسب خاک پشت دیوار و سپس مربوط به مقاومت اصطکاکی ضعیف بین خاک ریزدانه و مسلح کننده می‌باشند. به منظور برطرف نمودن نقاط ضعف مربوط به کاربرد خاکهای ریزدانه به عنوان خاکریز دیوار حائل خاک مسلح، راهکارهای مختلفی نظیر استفاده از ژئوتکستایل‌های نفوذپذیر (Mitchell و Zornberg، 1995؛ Chen و همکاران، 2007؛ Portelinha و همکاران، 2014) و کاربرد توام مصالح نظیر ترکیب ژئوتکستایل و ژئوگرید (Raisinghani و Viswanadham، 2011؛ Mamaghanian و همکاران، 2019) ارائه شده است. یکی از روشهای کارآمد در این زمینه استفاده از لایه نازکی از مصالح دانه‌ای در اطراف مسلح کننده است، که تحت عنوان روش ساندویچ⁵ مطرح می‌باشد (Sridharan و همکاران، 1991؛ Abdi و همکاران، 2009؛ Arjomand و Abdi، 2011؛ Abdi و Zandieh، 2014؛ Balakrishnan و Viswanadham، 2019؛ Yang و همکاران، 2023؛ Malek Ghasemi و همکاران، 2024). مزیت‌های اصلی روش ساندویچ عبارتند از: اول، لایه‌های خاک دانه‌ای در خاکریز ریزدانه، به عنوان زهکش عمل کرده و از افزایش فشار آب منفذی در خاکریز پشت دیوار جلوگیری می‌نمایند. دوم، موجب افزایش مقاومت بیرون کشش مسلح کننده در مقایسه با حالتی که مسلح کننده تنها در خاک ریزدانه اجرا شده، می‌گردد. علت افزایش مقاومت بیرون کشش آن است که تنش‌های برشی ایجاد شده بین خاک و مسلح کننده، بیشتر در ناحیه نازکی از لایه تماس خاک و مسلح کننده متمرکز هستند و با دور شدن از مسلح کننده این تنش‌ها به شدت کاهش می‌یابند. بنابراین، استفاده از لایه نازکی از مصالح دانه‌ای در اطراف مسلح کننده، باعث می‌شود که مقاومت اصطکاکی در سطح تماس و محدوده‌ای که تنشهای برشی بالایی وجود دارد، تقویت شود و مقاومت در برابر بیرون کشش افزایش یابد. پژوهشهای متعددی کارآمدی روش ساندویچ را در آزمایشهای مختلف نظیر آزمایش بیرون کشش (Abdi و همکاران، 2009؛ Abdi و Arjomand، 2011؛ Abdi و Zandieh، 2014؛ Malek Ghasemi و همکاران، 2024)، آزمایش سه محوری (Unnikrishnan و همکاران، 2002؛ Yang

⁵ Sandwich technique

به نحوی که تسمه بین این دو صفحه قرار گرفته و توسط پیچ‌ها محکم می‌گردد. یک موتور الکتریکی با قابلیت جابجایی محوری 80 میلیمتر، نیروی بیرون کشش را به صورت تکسویه و مبتنی بر کنترل جابجایی به مسلح کننده اعمال می‌کند. همچنین برای اندازه‌گیری نیرو یک نیروسنج⁹ با ظرفیت 50 کیلونیوتن و خطای 0/5٪ بین محور موتور و گیره نصب شده‌است. میزان جابجایی گیره (که در حقیقت مبین جابجایی پیشانی تسمه است) توسط یک جابجایی‌سنج (LVDT)¹⁰ اندازه‌گیری می‌شود. ظرفیت جابجایی‌سنج 100 میلیمتر و دقت اندازه‌گیری آن 0/01 میلیمتر می‌باشد. یک سامانه فرمانیار حلقه بسته خودکار¹¹، کنترل تمام بارگذاری‌های تنظیم شده از طرف کاربر و نیز اندازه‌گیری و برداشت بارها و جابجایی‌ها را انجام می‌دهد. شکل (2) نمای کلی دستگاه، نیروسنج، جابجایی‌سنج و کیسه هوا را نشان می‌دهد.

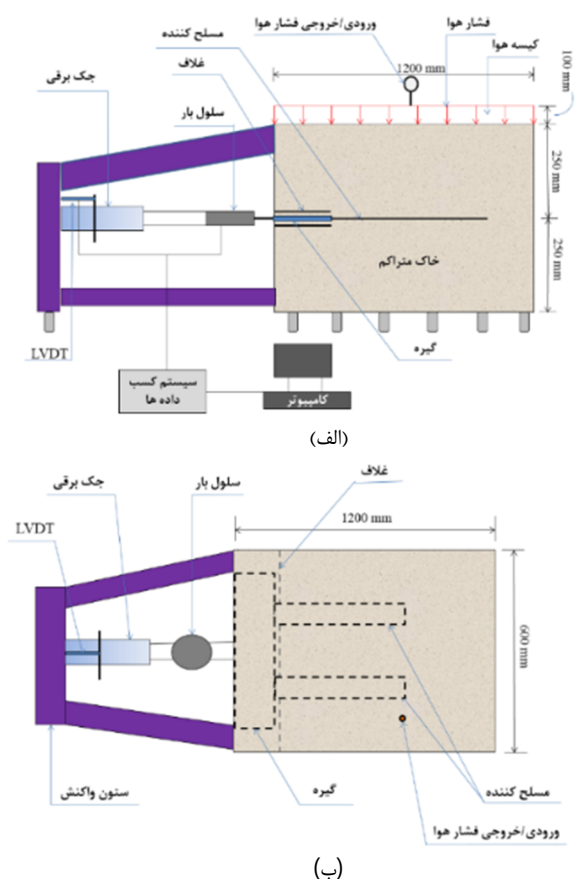
و همکاران، 2016) و آزمایش برش مستقیم (Abdi و همکاران، 2023؛ Razeghi و Ensani، 2023) به اثبات رسانده‌اند.

بررسی پژوهشهای مرتبط نشان می‌دهد که عملکرد تسمه‌های پلیمری در داخل خاکی‌های رسی تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است. از اینرو در پژوهش حاضر تلاش شده است با انجام آزمایش‌های بیرون کشش بزرگ مقیاس بر روی تسمه‌های پلیمری با انتهای آزاد و خمیده (U-شکل) در خاک رس و ماسه تاثیر خاک در برگیرنده تسمه و نیز ایجاد ناحیه خمیده انتهایی بر رفتار بیرون کشش تسمه‌های پلیمری مورد ارزیابی قرار گیرد. علاوه بر این، با بهره‌گیری از روش ساندویچ در خاکریز رسی و ایجاد خمیدگی انتهایی در تسمه، به مطالعه اثر استفاده همزمان از روش ساندویچ و ایجاد ناحیه U-شکل در انتهای تسمه بر مقاومت بیرون کشش آن پرداخته شده است.

2- روشهای آزمایشگاهی و ویژگی‌های مصالح

2-1- دستگاه آزمایش

به منظور انجام آزمایشهای بیرون کشش از یک دستگاه بیرون کشش بزرگ مقیاس منطبق با استاندارد ASTM D6706 استفاده شده است. این دستگاه مطابق شکل (1) شامل یک جعبه فولادی با ابعاد 1200×600×600 میلیمتر است، که در داخل آن نمونه آزمایش ساخته می‌شود و پس از پر شدن جعبه، درب فولادی فوقانی آن بسته می‌گردد. یک کیسه هوای⁶ لاستیکی در تماس با سطح فوقانی نمونه خاک آماده‌سازی شده و در زیر درب جعبه دستگاه قرار می‌گیرد. با اتصال کیسه هوا به کمپرسور هوای فشرده مجهز به شیر الکتروپنوماتیک⁷ (برای تنظیم فشار هوا و ثابت نگهداشتن فشار اعمال شده به بالای نمونه)، امکان ایجاد فشار سربار از طریق ایجاد نیروی عکس العمل با درب فوقانی جعبه فراهم می‌شود. همچنین استفاده از این سازوکار برای اعمال فشار سربار، به دلیل انعطاف پذیر بودن کیسه هوای لاستیکی امکان اعمال فشار عمودی یکنواخت را در هنگام آزمایش فراهم می‌آورد و نوسانات فشار ناشی از اتساع یا تراکم خاک را خنثی می‌نماید. به منظور کاهش اثر اصطکاک مرزی و نیز پدیده قوس‌زدگی (Palmeira، 2009)، در دیواره جلویی دستگاه و محل کشیده شدن مسلح کننده، دو غلاف 200 میلیمتری در سمت داخلی جعبه آزمایش نصب شده‌اند و در دیواره‌های جانبی، ورقهای پلکسی-گل⁸ به ضخامت 5 میلیمتر چسبانده شده‌اند. برای بیرون کشیدن تسمه‌ها از داخل خاک از گیره‌ای استفاده شده‌است که شامل دو صفحه فولادی رزوه شده و پیچ‌های متناسب می‌باشد،



شکل 1- طرحواره دستگاه آزمایش بیرون کشش؛ الف) نمای جانبی، ب) نمای بالا

2-2- خاک رس

⁹ Load-cell

¹⁰ Linear Variable Differential Transformer

¹¹ Automatic closed-loop control system

⁶ Airbag

⁷ Electro-pneumatic

⁸ Plexiglass

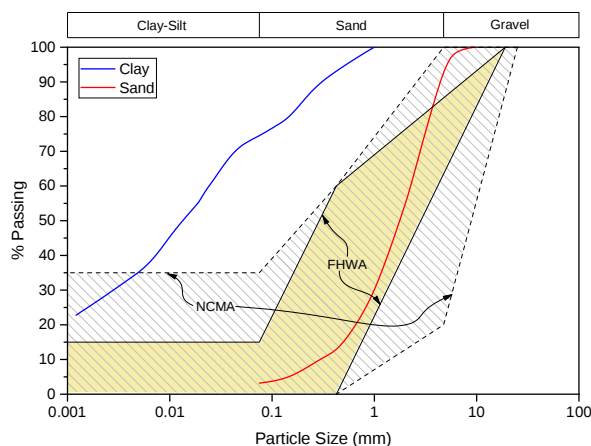


(ج)

شکل 2- تصاویر دستگاه آزمایش بیرون کشش؛ (الف) نمای کلی دستگاه، (ب) نیروسنج و جابجایی سنج و (ج) کیسه هوا

2-4- تسمه پلیمری

در این پژوهش از تسمه‌های پلیمری ساخته شده از الیاف ویژه پلی‌استری¹⁵ بسیار مقاوم با پوشش مستحکمی از پلی‌اتیلن¹⁶ استفاده شده است. این تسمه‌ها دارای چگالی بالا و مقاومت زیاد در برابر عوامل محیطی (شیمیایی و مکانیکی و) هستند. با توجه به عدم وجود مشکل خوردگی در اینگونه تسمه‌ها و نیز تولید آنها در مقاومت‌های متنوع، جایگزین مناسب و اقتصادی برای تسمه‌های فولادی در پروژه‌های خاک مسلح به حساب می‌آیند. خلاصه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی تسمه پلیمری در جدول (2) ارائه شده است.



شکل 3- منحنی دانه‌بندی رس و ماسه مورد مطالعه

جدول 1- ویژگی‌های خاکهای رس و ماسه

مشخصه	رس	ماسه
اندازه بیشینه دانه‌ها (D _{max}) mm	1/0	9/52
مقدار ریزدانه (عبوری 0/075 mm) %	74/4	3/2
مقدار ماسه (بین 0/075 تا 4/75 mm) %	25/6	91/8

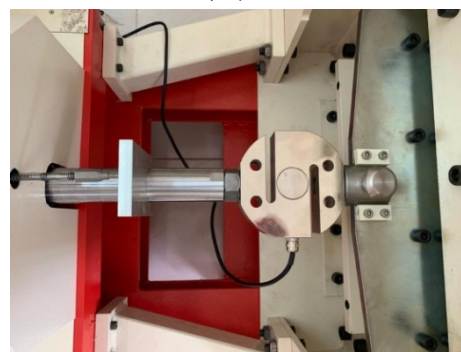
خاک رس (به عنوان خاکریز پشت دیوار حائل) از یک نهشته طبیعی رس در شهر شیراز نمونه‌برداری شده است. منحنی دانه‌بندی رس در شکل (3) و خلاصه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی و پایه مکانیک خاک رس در جدول (1) ارائه شده است. همچنین در شکل (4-الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM)¹² از ذرات خاک رس نشان داده شده است.

2-3- خاک ماسه

ماسه مورد آزمایش دارای دانه‌های به نسبت تیز گوشه با منشأ آهکی بوده و منحنی دانه‌بندی آن در شکل (3) نشان داده شده است. بعلاوه در شکل (4-ب) تصویری از دانه‌های ماسه قابل مشاهده است. شایان ذکر است که دانه‌بندی ماسه در محدوده دانه‌بندی توصیه شده توسط FHWA¹³ (2010) و NCMA¹⁴ (2010) برای خاکریز دیوارهای مسلح شده توسط ژئوسینتتیک‌ها قرار دارد. در جدول (1) مشخصات فیزیکی و پایه مکانیک خاک ماسه ارائه شده است.



(الف)



(ب)

¹⁵ Polyester

¹⁶ Polyethylene

¹² Scanning Electron Microscope

¹³ Federal High-Way Administration

¹⁴ National Concrete Masonry Association

خاک، تعداد ضربات لازم برای هر لایه براساس روش پیشنهادی تراکم کاهش یافته (Ladd, 1978) تعیین گردید. البته به دلیل اندازه بزرگ دستگاه، تعداد ضربات لازم برای هر لایه به صورت آزمون و خطا تعیین شدند. لایه‌های خاک ماسه نیز از طریق ریختن خاک و کوبیدن آنها تا دانسیته نسبی²² (Dr) 70% متراکم گردیدند. پس از پر شدن نیمه پایینی جعبه، در نمونه‌های مسلح شده به تسمه با انتهای آزاد، مطابق شکل (5-الف) از دو تسمه موازی به طول 500 میلیمتر و عرض 50 میلیمتر که در فاصله 300 میلیمتر نسبت به هم قرار دارند، استفاده شد. دلیل در نظر گرفتن فاصله 300 میلیمتر بین تسمه‌های مجاور آن بود که هر یک از تسمه‌ها به صورت مستقل عمل نماید. در رابطه با شعاع تاثیر مسلح کننده‌های مختلف مطالعات متعددی صورت پذیرفته است. به عنوان نمونه می‌توان به مطالعه Aminfar و Tavakoli (2022) در مورد شعاع تاثیر میخ‌ها²³ و مطالعات Wu و همکاران (2013) و (2018) و Fei و همکاران (2020) در خصوص شعاع تاثیر ژئوتکستایل‌ها و ژئوگریدها اشاره کرد. پیرامون ناحیه اثر تسمه‌های مجاور بر یکدیگر تعداد پژوهش‌های انجام شده محدود است. یکی از جامع‌ترین پژوهش‌ها در این مورد مربوط به مطالعه Damians و همکاران (2021) می‌باشد که یک دیوار حائل 6 متری خاکی مسلح شده با تسمه‌ها را به صورت سه بعدی توسط روش اجزای محدود شبیه‌سازی نموده اند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که در گستره جانبی حدود 200 میلیمتر از اطراف تسمه تغییرات تنش قائم قابل توجه است و پس از این فاصله تسمه‌های مجاور اثر قابل ملاحظه‌ای بر یکدیگر ندارند. از اینرو در پژوهش حاضر فاصله 300 میلیمتر بین تسمه‌ها در نظر گرفته شد. در نمونه‌های مسلح به تسمه با انتهای U-شکل، مطابق شکل (5-ب) بدون قطع کردن تسمه، یک ناحیه U-شکل به طول 50 سانتیمتر در انتهای تسمه ایجاد شد. پس از استقرار تسمه‌ها، نیمه بالایی جعبه در سه لایه مطابق لایه پایینی پر شد.

به منظور آماده‌سازی نمونه‌های C-ts-UPS، نیمی از ضخامت t لایه ماسه‌ای در بر گیرنده تسمه از تراز ارتفاعی محل استقرار تسمه کم شد و نیمه پایینی جعبه تا تراز بدست آمده مشابه قبل، از رس پر گردید. سپس نیمی از ضخامت t لایه ماسه اجرا شد و بر روی آن تسمه با انتهای U-شکل قرار گرفت و در ادامه، نیمه بالایی لایه نازک ماسه اجرا شد و روی آن مشابه قبل با خاک رس پر گردید. پس از ساخت نمونه‌ها و پر شدن نیمه بالایی جعبه آزمایش، درپوش جعبه بسته شد و فشار سربار (σ_v) مورد نظر از طریق کیسه هوا اعمال گردید. در نهایت نیروی بیرون کشش به صورت

مقدار شن (بزرگتر از 4/75 mm) %	-	5
ضریب یکنواختی (Cu)	-	7/75
ضریب خمیدگی (Cc)	-	1/5
حد روانی (LL) %	34	-
شاخص خمیری (PI) %	14	-
طبقه‌بندی متحد خاک (USCS)	CL	SW
توده ویژه دانه‌ها (Gs)	2/67	2/64
بیشینه چگالی خشک (ρ_{dmax}) gr/cm ³	1/7	-
رطوبت بهینه (W_{opt}) %	19/2	-
¹ بیشینه نسبت تخلخل (e_{max})	-	0/71
² کمینه نسبت تخلخل (e_{min})	-	0/26

¹ براساس استاندارد ASTM D 4253 (2001)، ² براساس استاندارد ASTM D4254 (2016)

جدول 2- مشخصات تسمه پلیمری

مشخصه	مقدار
وزن	27/4 kg/100m
عرض	50 mm
ضخامت	5 mm
مقاومت کششی نهایی	36/6 kN/m

2-4- روش آزمایش و آماده‌سازی نمونه

در این پژوهش پنج نوع مختلف از نمونه‌های خاک مسلح برای انجام آزمایش بیرون کشش مورد بررسی قرار گرفتند، که به قرار زیر هستند:

- رس با تسمه با انتهای آزاد (C-DPS)¹⁷
- رس با تسمه با انتهای U-شکل (C-UPS)¹⁸
- ماسه با تسمه با انتهای آزاد (S-DPS)¹⁹
- ماسه با تسمه با انتهای U-شکل (S-UPS)²⁰
- رس با تسمه با انتهای U-شکل محصور در ماسه (C-ts-UPS)²¹ به ضخامت t میلیمتر

علائم اختصاری بدین شرح است که C برای خاک رس، S برای ماسه، DPS برای تسمه پلیمری با انتهای آزاد و UPS برای تسمه پلیمری با انتهای U-شکل استفاده شده است. به جز در نمونه‌های C-ts-UPS در سایر نمونه‌ها، خاک یکنواخت در 6 لایه با ضخامتهای مساوی اجرا شد. روند نمونه‌سازی به نحوی بود که ابتدا نیمه پایین جعبه با سه لایه 85 میلیمتری پر شد و هر لایه بوسیله کوبه دستی متراکم گردید. برای تمامی آزمایشهای دارای رس، خاک رس در مقدار رطوبت بهینه (W_{opt}) تا رسیدن به 90% بیشینه چگالی خشک (ρ_{dmax}) (0.9) متراکم گردید. به منظور دستیابی به چگالی یکنواخت در ارتفاع

²¹ Clay with Sand encapsulating U-shaped Polymeric Strap

²² Relative Density

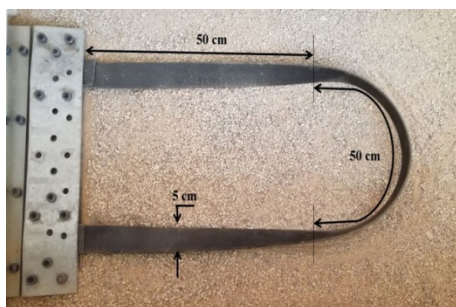
²³ Nails

¹⁷ Clay with Direct Polymeric Strap

¹⁸ Clay with U-shaped Polymeric Strap

¹⁹ Sand with Direct Polymeric Strap

²⁰ Sand with U-shaped Polymeric Strap



(ب)

شکل 5- آرایش قرارگیری تسمه؛ (الف) حالت DPS و (ب) حالت UPS

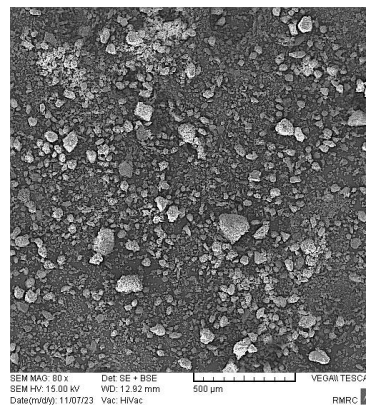
3- یافته‌های آزمایشگاهی

در مجموع تعداد 24 آزمایش بیرون کشش بزرگ مقیاس بر روی تسمه‌های پلیمری با انتهای آزاد و انتهای U-شکل در خاکهای رس و ماسه و روش ساندویچ (خاکریز رس به همراه لایه نازک ماسه در اطراف تسمه) انجام شد.

3-1- تسمه در محیط خاکی یکنواخت

شکل (6) نتایج مربوط به آزمایشهای بیرون کشش تسمه‌های DPS و UPS را برای رس و ماسه تحت فشارهای سربار (σ_v) 20، 40 و 70 کیلوپاسکال نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، منحنی تغییرات نیروی بیرون کشش $(PF)^{24}$ برحسب جابجایی گیره $(FD)^{25}$ برای تسمه DPS در هر دو نوع خاک (رس و ماسه) دارای یک نقطه اوج مشخص است که ناشی از بسیج زاویه اصطکاک اوج در سطح تماس خاک-مسلح کننده می‌باشد. این نقطه اوج در خاک رسی برای تمامی فشارهای سربار (σ_v) ، در یک محدوده جابجایی بیرون کشش مشخص (در حدود 17 میلیمتر) رخ می‌دهد، اما در خاک ماسه‌ای موقعیت نقطه اوج منحنی با افزایش فشار سربار (σ_v) تغییر می‌کند. در این رابطه در سربار 20 کیلوپاسکال نقطه اوج منحنی در جابجایی بیرون کشش حدود 30 میلیمتر رخ می‌دهد، در حالی که در سربارهای 40 و 70 کیلوپاسکال نقطه اوج نیرو در جابجایی بیرون کششی حدود 27 میلیمتر ظاهر می‌شود و اوج نیرو در جابجایی‌های بیرون کشش کمتری رخ می‌دهد. علت وابسته بودن مقدار جابجایی بیرون کشش در نقطه اوج نیرو به فشار سربار (σ_v) در خاک ماسه‌ای را می‌توان با تاثیر فشار محدود کننده بر سختی خاک دانه‌ای مرتبط دانست.

کنترل جابجایی با نرخ جابجایی ثابت یک میلیمتر بر دقیقه (توصیه شده در ASTM D6706) به تسمه وارد شد. در طول آزمایش نیروی بیرون کشش اعمالی و جابجایی گیره متناظر با آن توسط سیستم برداشت داده‌ها ثبت گردید.

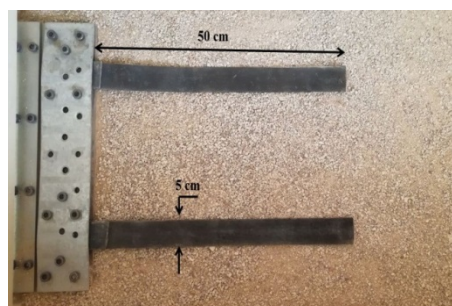


(الف)



(ب)

شکل 4- (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی رس و (ب) تصویر ماسه

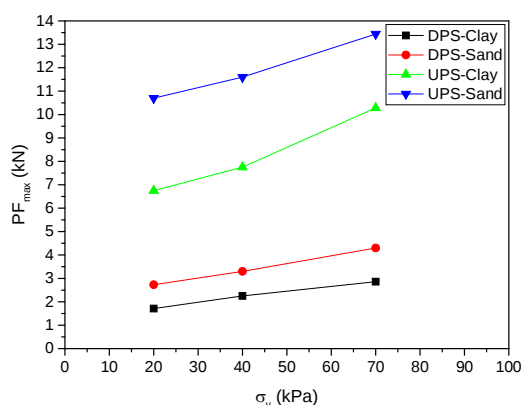


(الف)

²⁵ Frontal Displacement

²⁴ Pullout Force

مقاوم در جلو قسمت U-شکل نیز ایجاد مقاومت می‌نماید و با افزایش σ_v این نیروی مقاوم رشد سریعتری خواهد داشت و باعث افزایش نرخ رشد مقاومت بیرون کشش می‌شود. شایان ذکر است که در ایجاد مقاومت توسط ناحیه مقاوم در تسمه U-شکل در خاک رس، علاوه بر اصطکاک خاک، چسبندگی خاک نیز تاثیرگذار است. برای بررسی تاثیر چسبندگی خاک رس در ایجاد مقاومت در برابر بیرون کشش مسلح کننده‌ها می‌توان به پژوهشهای Tatlisoz و همکاران (1998) و Abu Farsakh و همکاران (2005) مراجعه نمود.

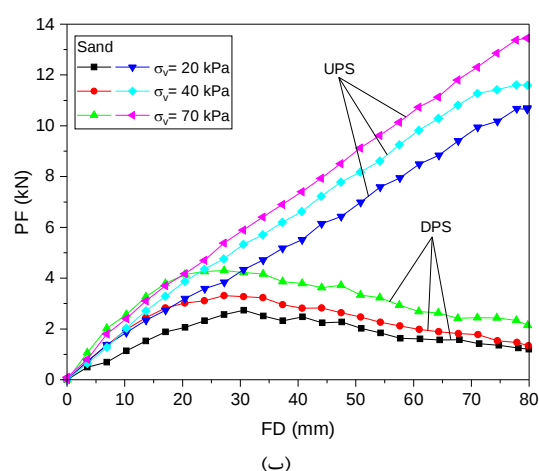
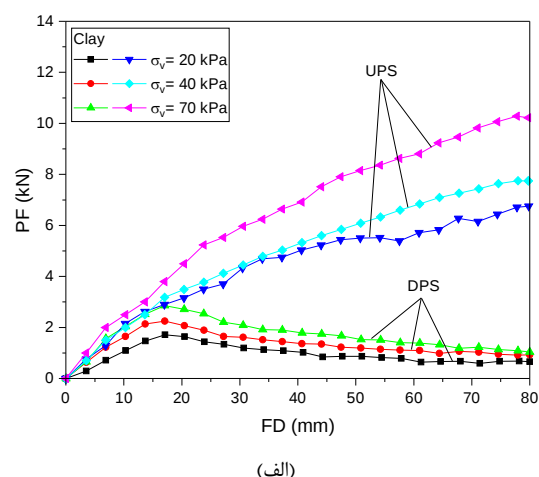


شکل 7- تغییرات مقاومت بیرون کشش (PF_{max}) بر حسب سربار (σ_v) در رس و ماسه برای تسمه‌های DPS و UPS

به منظور بررسی تاثیر U-شکل نمودن انتهای تسمه پلیمری بر افزایش مقاومت بیرون کشش، متغیر RR به صورت نسبت مقاومت بیرون کشش در حالت UPS ($PF_{max-UPS}$) به مقاومت بیرون کشش در حالت DPS ($PF_{max-DPS}$) مطابق رابطه (1) تعریف می‌شود، که برای هر کدام از خاکها (رس یا ماسه) به صورت جداگانه محاسبه می‌شود.

$$RR = \frac{PF_{max-UPS}}{PF_{max-DPS}} \quad (1)$$

در شکل (8) تغییرات مقدار RR برای خاکهای رس و ماسه در سربارهای مختلف (20، 40 و 70 کیلوپاسکال) ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که مقدار RR در تمامی سربارها بیشتر از 3 است که نشاندهنده رشد بیش از 200% مقاومت بیرون کشش تسمه در تمامی مقدارهای σ_v و در هر دو نوع خاک ناشی از U-شکل شدن انتهای تسمه می‌باشد. نکته قابل توجه در شکل (8) آن است که در σ_v برابر 20 و 40 کیلوپاسکال، نوع خاک (ماسه یا رس) اثر قابل توجهی بر نسبت RR بدست آمده نداشته و نسبت RR در هر یک از فشارهای سربار برای هر دو نوع خاک تقریباً یکسان است. همچنین از فشار سربار 20 کیلوپاسکال به 40 کیلوپاسکال نسبت



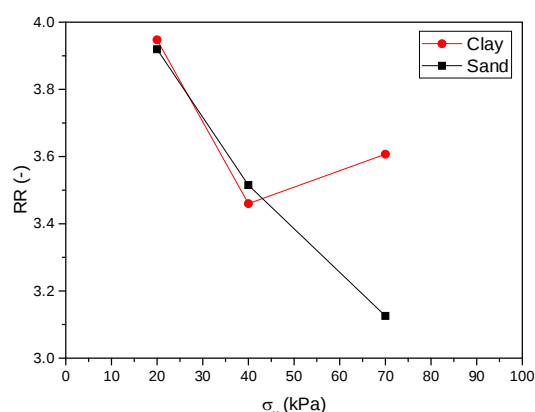
شکل 6- مقایسه نیروی بیرون کشش در خاک یکنواخت برای تسمه‌های DPS و UPS برای؛ (الف) رس و (ب) ماسه

از طرفی برای تسمه UPS، در هر دو نوع خاک (رس و ماسه) نقطه اوج نیرو مشاهده نمی‌شود و نیروی بیرون کشش با افزایش جابجایی، به طور مداوم افزایش می‌یابد. دلیل افزایش پیوسته نیروی بیرون کشش در تسمه UPS، ایجاد ناحیه مقاوم در جلو قسمت U-شکل می‌باشد. شکل (7) تغییرات مقاومت بیرون کشش یا همان بیشینه نیروی بیرون کشش (PF_{max}) برای تسمه‌های DPS و UPS در رس و ماسه را در فشارهای سربار (σ_v) مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، برای هر دو نوع خاک، با افزایش σ_v ، برای تسمه‌های DPS و UPS، بیشینه نیروی بیرون کشش (PF_{max}) افزایش می‌یابد. این افزایش برای تسمه DPS روندی خطی دارد اما برای تسمه UPS روندی غیر خطی دارد و با افزایش سربار، نرخ افزایش PF_{max} نیز افزایش می‌یابد. علت این رفتار را می‌توان چنین توجیه کرد که در تسمه DPS تنها عامل ایجاد مقاومت بیرون کشش نیروی اصطکاک بین تسمه و خاک می‌باشد که با افزایش سربار، افزایش می‌یابد اما روند آن یکنواخت است. اما برای تسمه UPS علاوه بر اصطکاک خاک و تسمه، نیروی

بدین ترتیب مقدار PR معرف نسبت نیروهای بیرون کشش در یک جابجایی مشخص است، در حالی که در نسبت RR به میزان جابجایی توجهی نشده و تنها مقادیر بیشینه نیروی بیرون کشش یا مقاومت بیرون کشش در نظر گرفته می‌شوند. با محاسبه مقادیر PR در هر جابجایی مشخص و ترسیم تغییرات PR بر حسب جابجایی‌های اندازه‌گیری شده برای خاکهای ماسه و رس برای هر مقدار σ_v ، شکل (9) بدست می‌آید. همانگونه که مشاهده می‌شود در جابجایی‌های کمتر از حدود 15 میلیمتر، هم برای ماسه و هم برای رس، فشار مقاوم قابل ملاحظه‌ای در برابر بیرون کشش بسیج نمی‌شود و نسبت PR به عدد 1 نزدیک می‌باشد، که نشان‌دهنده مقاومت بیرون کشش یکسان در حالت‌های DPS و UPS است. اما با افزایش جابجایی، تاثیر U-شکل شدن انتهای تسمه نمایان شده و نسبت PR شروع به رشد می‌نماید و به صورت پیوسته به سیر صعودی خود ادامه می‌دهد، بگونه‌ای که در جابجایی 80 میلیمتر، بیشترین نسبت‌های PR بدست می‌آیند. دلیل این امر را می‌توان در لزوم ایجاد جابجایی زیاد برای بسیج شدن حالت مقاوم خاک در جلو قسمت U-شکل تسمه ارزیابی نمود. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان دریافت که تاثیر U-شکل نمودن انتهای تسمه در ارتفاع‌هایی از دیوار خاک مسلح مشهود می‌شود که امکان ایجاد جابجایی کافی برای بسیج شدن فشار مقاوم خاک فراهم باشد. با توجه به پژوهشهای پیشین (Abdelouhab و همکاران، 2010؛ Koerner و Koerner، 2018)، این جابجایی‌ها بیشتر در یک سوم میانی دیوارهای حائل خاک مسلح رخ می‌دهد. همچنین شکل (9) نشان می‌دهد که مقاومت بیرون کشش تسمه UPS در خاک رس با نرخ بیشتری نسبت به ماسه افزایش می‌یابد که علت آن را می‌توان با عدم امکان تراکم مناسب ماسه در قسمت جلوی ناحیه U-شکل و نیازمندی به جابجایی زیاد برای بسیج نیروی مقاوم مرتبط دانست.

به منظور بررسی اثر نوع خاک بر رفتار بیرون کشش تسمه‌ها، نتایج مربوط به آزمونهای بیرون کشش برای تسمه‌های DPS و UPS برای خاکهای رس و ماسه در شکل (10) نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود برای هر دو تسمه DPS و UPS در هر فشار سربار (σ_v) مشخص، نیروی بیرون کشش تسمه‌ها در ماسه بیشتر از رس می‌باشد. در تسمه DPS با افزایش سربار، اختلاف نیروی بیرون کشش در ماسه نسبت به رس در جابجایی‌های کوچکتری ظاهر می‌شود، به نحوی که در سربار 20 کیلوپاسکال تا جابجایی اولیه حدود 15 میلیمتر اختلاف بین نیروی بیرون کشش در ماسه و رس مشاهده نشده، اما برای سربار 70 کیلوپاسکال این اختلاف نیرو در جابجایی‌های اولیه حدود 2 میلیمتر نمایان می‌شود. این روند برای تسمه‌های UPS مشاهده نمی‌شود.

RR در هر دو خاک کاهش یافته است. علت کاهش مقاومت با افزایش فشار سربار را می‌توان چنین توضیح داد که با افزایش فشار سربار، مقاومت بیرون کشش برای تسمه DPS که ناشی از مقاومت اصطکاکی است افزایش می‌یابد، اما همزمان، با افزایش σ_v نیروی مقاوم ناشی از ناحیه U-شکل در تسمه UPS نیز افزایش می‌یابد. اما افزایش نیروی مقاوم، به دلیل تراکم کمتر خاک در جلو ناحیه U-شکل (شایان ذکر است که به دلیل قائم بودن قسمت U-شکل امکان تراکم خاک به اندازه سایر نواحی وجود ندارد)، به میزان افزایش ناشی از اصطکاک نیست و بنابراین طبق رابطه (1) نرخ افزایش مخرج کسر بیشتر از نرخ افزایش صورت کسر شده و در نتیجه با افزایش فشار سربار، نسبت RR کاهش می‌یابد. این در حالی است که از سربار 40 به 70 کیلو پاسکال این روند کاهشی برای ماسه ادامه می‌یابد، ولی در رس به دلیل بازیابی توان خاک در ناحیه U-شکل جلو تسمه و نیز وجود چسبندگی در خاک، اندکی افزایش نیز مشاهده می‌شود، که نشان‌دهنده اثر نیروی مقاوم در جلو ناحیه U-شکل با بالا رفتن فشار سربار می‌باشد.

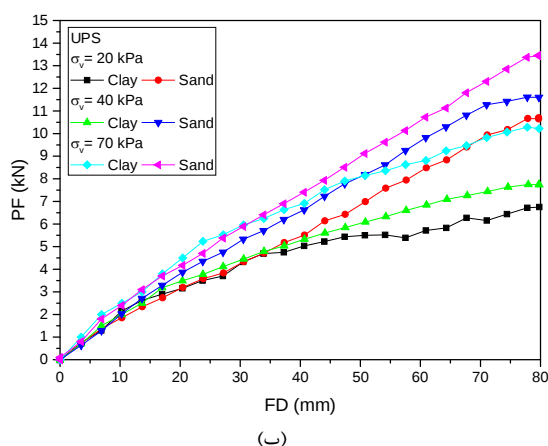
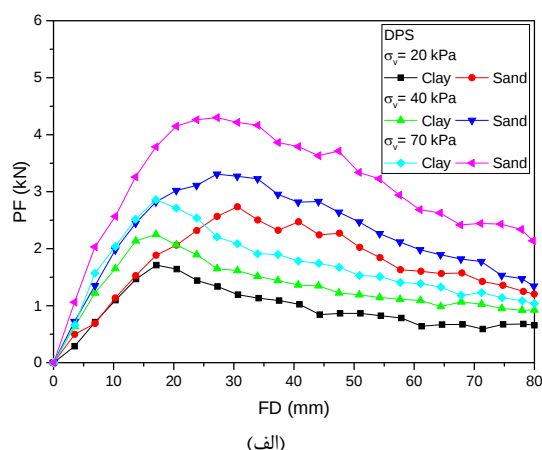


شکل 8- تغییرات نسبت RR در خاک رس و ماسه برای سربارهای مختلف

نکته دیگری که می‌تواند در بررسی رفتار قسمت U-شکل مورد توجه قرار گیرد، میزان جابجایی مورد نیاز برای بسیج نیروی مقاوم و شروع مشارکت قسمت U-شکل در مقاومت برابر بیرون کشش است. برای بررسی این موضوع در هر کدام از خاکها، مقدار PR برای هر مقدار جابجایی معین $FD=i$ به صورت نسبت نیروی بیرون کشش برای تسمه UPS در مقدار جابجایی $FD=i$ ($PF_{FD=i}$) به نیروی بیرون کشش برای تسمه DPS در مقدار جابجایی $FD=i$ ($PF_{FD=i-DPS}$) مطابق رابطه (2) محاسبه شده‌است.

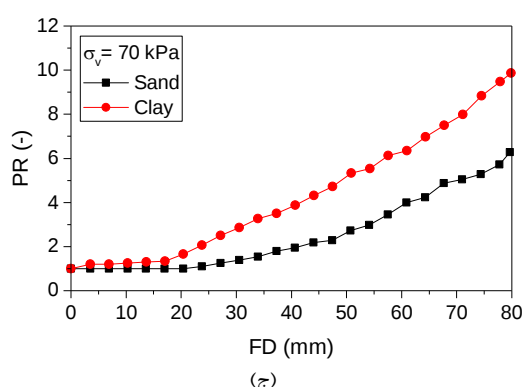
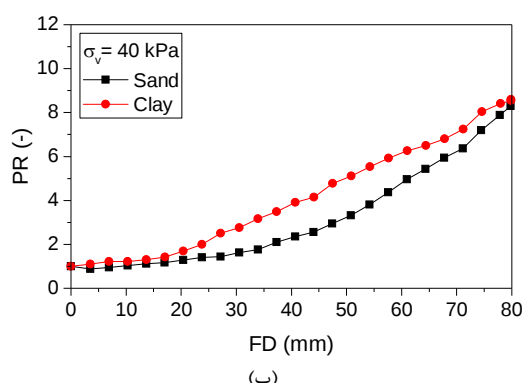
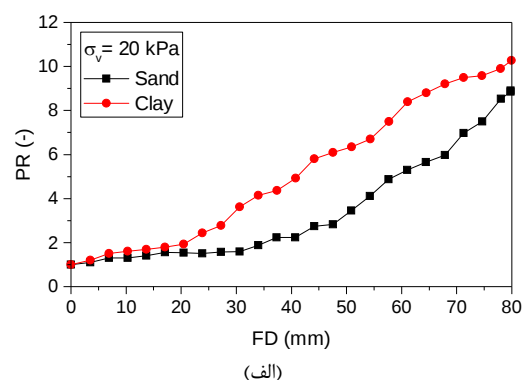
$$PR = \frac{PF_{FD=i} - UPS}{PF_{FD=i} - DPS} \quad (2)$$

نزدیکی نمودارهای مربوط به تسمه‌های DPS و UPS در فشارهای سربار 20 و 40 کیلوپاسکال نشان می‌دهد که تاثیر استفاده از ماسه بجای رس، در افزایش مقاومت بیرون کشش، در هر دو تسمه DPS و UPS تقریباً یکسان است. با اینحال با افزایش σ_v به 70 کیلوپاسکال استفاده از ماسه برای تسمه DPS اثر بهبود دهنده بیشتری را نسبت به تسمه UPS نشان می‌دهد.



شکل 10- مقایسه مقاومت بیرون کشش در خاک یکنواخت ماسه و رس برای حالت‌های: (الف) DPS و (ب) UPS

دلیل کاهش نسبت SR از سربار 20 به 40 کیلوپاسکال برای تسمه‌های DPS و UPS آن است که در σ_v کمتر، به دلیل بسیج زاویه اتساع، زاویه اصطکاک اوج ماسه بیشتر است و بنابراین PF_{max} تسمه‌ها در ماسه نسبت به رس با افزایش σ_v کاهش می‌یابد. قابل ذکر است که در سربارهای 20 و 40 کیلوپاسکال و در جابجایی مرتبط با اوج نیروی بیرون کشش، مقاومت ناحیه مقاوم بسیج نشده و بنابراین نسبت SR برای تسمه‌های DPS و UPS نزدیک به هم می‌باشد. از طرفی با افزایش σ_v از 40 به 70 کیلوپاسکال با وجود کاهش زاویه اصطکاک اوج ماسه به دلیل کاهش زاویه اتساع، بر اثر افزایش تنش عمودی در سطح تماس ماسه و تسمه، مقاومت



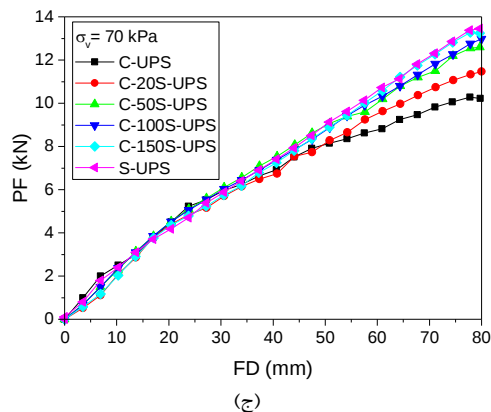
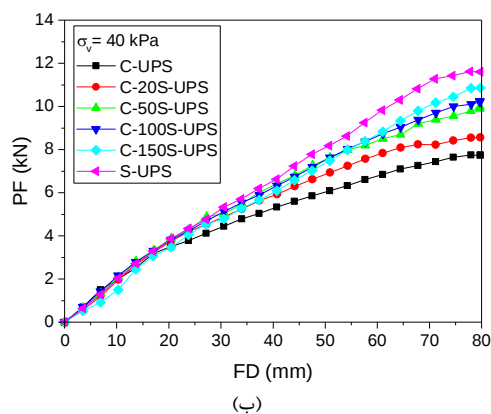
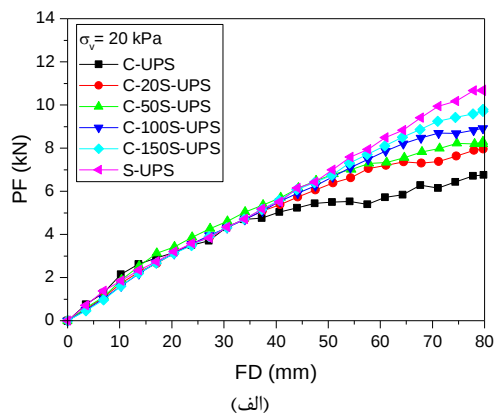
شکل 9- تغییرات نسبت PR در مقابل جابجایی برای فشار سربار (الف) 10 (ب) 40 و (ج) 70 کیلوپاسکال

با هدف کمی‌سازی اثر نوع خاک بر مقاومت بیرون کشش (PF_{max}) تسمه‌ها، متغیر SR به صورت نسبت مقاومت بیرون کشش تسمه در خاک ماسه‌ای ($PF_{max-sand}$) به خاک رسی ($PF_{max-clay}$) برای هر کدام از حالت‌های UPS یا DPS، طبق رابطه (3) تعریف می‌شود:

$$SR = \frac{PF_{max-sand}}{PF_{max-clay}} \quad (3)$$

شکل (11) تغییرات نسبت SR را برای تسمه‌های DPS و UPS، در فشارهای سربار مختلف نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است در σ_v برابر 20 کیلوپاسکال، محیط دانه‌ای ماسه می‌تواند مقاومت بیرون کشش تسمه پلیمری را تا حدود 60% (1/6 برابر) نسبت به مقاومت بیرون کشش آن در محیط رس افزایش دهد.

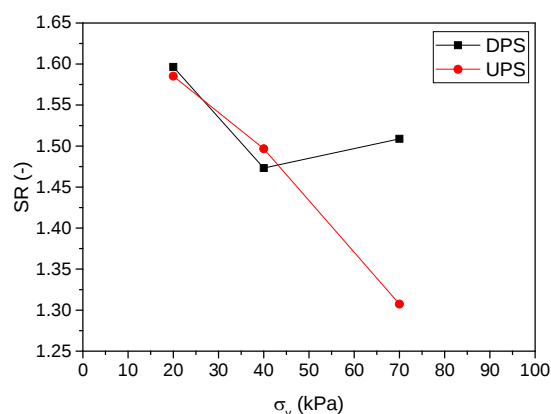
تمامی نمونه‌ها با ضخامت‌های مختلف ماسه محصور کننده تقریباً یکسان است و با افزایش جابجایی‌ها اختلاف نیروهای بیرون کشش برای ضخامت‌های مختلف لایه ماسه بیشتر نمایان می‌شود.



شکل 12- مقایسه نیروی بیرون کشش تسمه های U-شکل در روش ساندویچ با ضخامت‌های مختلف برای سربارهای؛ (الف) 20، (ب) 40 و (ج) 70 کیلوپاسکال

شکل (13) روند تغییرات مقاومت بیرون کشش (PF_{max}) تسمه UPS در ضخامت‌های مختلف لایه ماسه محصور کننده را نشان می‌دهد. در این شکل t برابر با 500 میلیمتر مبین آزمایش در ماسه یکنواخت (S-UPS) و مقدار $t=0$ نشاندهنده آزمایش در رس یکنواخت (C-UPS) می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود با

بیرون کشش برای تسمه DPS نسبت به مقاومت بیرون کشش در رس افزایش می‌یابد و در نتیجه نسبت SR اندکی رشد می‌کند. از سوی دیگر برای تسمه UPS به دلیل تراکم بهتر رس نسبت به ماسه در جلو ناحیه U-شکل، نیروی فشار مقاوم در رس در جابجایی مربوط به مقاومت بیرون کشش، بیشتر بسیج شده و در نتیجه نسبت SR با وجود افزایش σ_v کاهش می‌یابد.

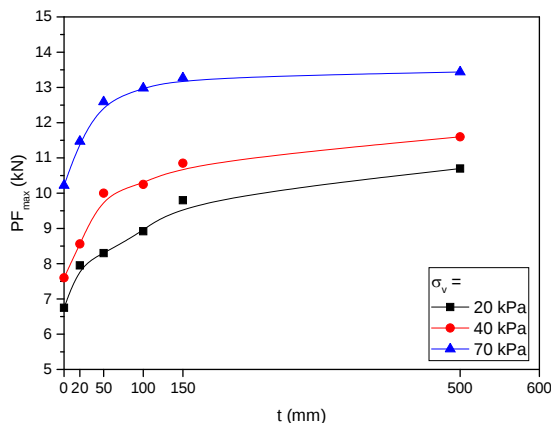


شکل 11- تغییرات نسبت SR برای حالت‌های DPS و UPS

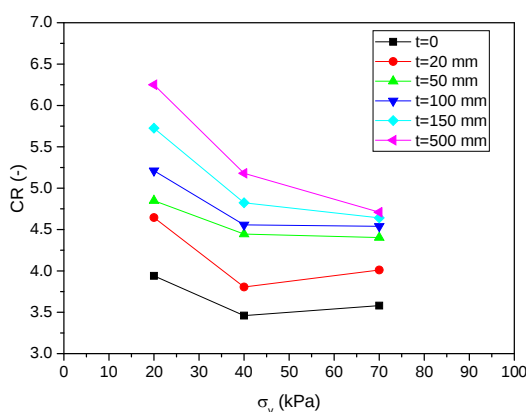
3-2- تسمه در روش ساندویچ

آزمایش‌هایی به منظور مطالعه رفتار بیرون کشش تسمه UPS محصور در لایه نازک ماسه در خاکریز رس (روش ساندویچ) برای ضخامت‌های (t) 20، 50، 100 و 150 میلیمتر لایه ماسه‌ای محصور کننده و در فشارهای سربار (σ_v) 20، 40 و 70 کیلوپاسکال انجام شدند و نتایج آنها در شکل (12) ارائه شده‌است. همانگونه که مشاهده می‌شود تعبیه UPS در یک لایه نازک ماسه‌ای باعث افزایش نیروی مقاوم در مقابل بیرون کشیدگی و همچنین افزایش اصطکاک ناشی از تغییر جنس خاک اطراف تسمه می‌باشد. با توجه به اینکه عمده تمرکز تنش‌های برشی مقاوم در نزدیکی مسلح کننده رخ می‌دهد و با فاصله گرفتن از سطح تماس، این تنش‌ها به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابند (Sridharan و همکاران، 1991)، استفاده از لایه ماسه‌ای نازک که مقاومت برشی آن بیشتر از رس است، باعث افزایش نیروی بیرون کشش شده‌است. همچنین با افزایش ضخامت لایه ماسه اطراف تسمه، افزایش نیروی بیرون کشش رخ داده است که دلیل آن افزایش محدوده بسیج تنش برشی مقاوم در اطراف مسلح کننده است. به عبارت دیگر، با افزایش ضخامت لایه ماسه‌ای اطراف تسمه، نمونه از حالت رس یکنواخت به سمت ماسه یکنواخت نزدیک می‌شود و تنش‌های برشی مقاوم قبل از رسیدن به رس، در ضخامت بیشتری از ماسه بسیج می‌شوند. با توجه به شکل (12) مشاهده می‌شود که در جابجایی بیرون کشش کوچکتر از 20 میلیمتر، نیروی بیرون کشش

شده با خاکریز چسبنده (خاکریز با قابلیت زهکشی پایین) توسط روش ساندویچ که جنبه بهره‌برداری عملی/اجرایی پیدا کرده باشند، بسیار نادر است.



شکل 13- تغییرات مقاومت بیرون کشش (PF_{max}) در مقابل ضخامت لایه ماسه در روش ساندویچ



شکل 14- تغییرات نسبت CR در مقابل فشار سربار برای ضخامتهای مختلف لایه ماسه

مروری بر پژوهش‌های پیشین تنها یک مورد (Thuo و همکاران، 2015) احداث دیوار حائل خاک مسلح با استفاده از روش ساندویچ در مقیاس بهره‌برداری عملی را مشخص می‌کند. این مورد در کشور تایوان اجرا شده و از لایه نازک 200 میلیمتری ماسه در اطراف ژئوتکستایل به عنوان زهکش استفاده شده است. هیچگونه اطلاعات فنی یا نکات اجرایی نیز در مورد این دیوار حائل عنوان نشده است. از اینرو با توجه به فقدان وجود اطلاعات در مورد نحوه اجرا و عملکرد اینگونه دیوارهای حائل خاک مسلح در پروژه‌های واقعی، اهمیت توجه به دیدگاه‌های اجرایی براساس مطالعات آزمایشگاهی و عددی مورد تاکید قرار می‌گیرد. در این راستا، علاوه بر توصیه‌هایی که توسط FHWA برای ساخت دیوارهای حائل خاک مسلح با استفاده از خاک محلی (Naresh و Edwards، 2021) مطرح شده است، نکات اجرایی ذیل که

افزایش ضخامت لایه ماسه، مقاومت بیرون کشش تسمه پلیمری افزایش می‌یابد و بسته به سربار اعمالی (σ_v)، نرخ افزایش مقاومت از یک ضخامت مشخص به بعد کاهش چشمگیری دارد. این ضخامت برای سربار 20 کیلوپاسکال 20 میلیمتر و برای سربارهای 40 و 70 کیلوپاسکال 50 میلیمتر است. همچنین، برای تمامی سربارهای اعمال شده، اختلاف معناداری بین مقاومت بیرون کشش تسمه زمانی که کل جعبه آزمایش از ماسه پر شده است (ضخامت 500 میلیمتر) و زمانی که یک لایه 150 میلیمتری از ماسه اطراف تسمه را گرفته باشد، وجود ندارد.

برای بررسی میزان تاثیر اجرای همزمان روش ساندویچ و U- شکل نمودن انتهای تسمه بر مقاومت بیرون کشش تسمه از داخل رس، نسبت مقاومت بیرون کشش تسمه UPS در روش ساندویچ ($PF_{max-C-tS-UPS}$) به مقاومت بیرون کشش تسمه DPS در رس ($PF_{max-C-DPS}$) به صورت رابطه (4) تعریف می‌شود.

$$CR = \frac{PF_{max-C-tS-UPS}}{PF_{max-C-DPS}} \quad (4)$$

شکل (14) نشان‌دهنده تغییرات CR بر حسب فشار سربار (σ_v) در ضخامت‌های (t) مختلف لایه ماسه است. مشاهده می‌شود، کمینه مقدار CR برای روش ساندویچ برابر 3/80 است، که مربوط به لایه ماسه 20 میلیمتر در فشار سربار 40 کیلوپاسکال می‌باشد و بیشینه مقدار CR برای روش ساندویچ مربوط به لایه 150 میلیمتر ماسه در فشار سربار 20 کیلوپاسکال و برابر 5/72 است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بر مبنای آزمایشهای انجام شده و در محدوده‌ای که پارامترهای مدل فیزیکی تغییر داده شده‌اند، استفاده همزمان از روش ساندویچ و تسمه U- شکل می‌تواند مقاومت بیرون کشش تسمه از داخل خاک رسی را به طور متوسط تا حدود 5 برابر افزایش دهد. این در حالی است که با اجرای تسمه UPS حدود 30% به طول تسمه افزوده می‌شود و استفاده از روش ساندویچ با جایگزینی حداکثر 30% حجم خاک رس همراه است.

4- ملاحظات در کاربردهای عملی

اداره کل بزرگراه‌های آمریکا (FHWA) در سال 2021 نشریه- ای (Naresh و Edwards، 2021) را برای بهره‌گیری از خاکهای محلی در ساخت دیوارهای حائل خاک مسلح ارائه کرده است. هدف اصلی در مستند ارائه شده، مشخص نمودن یک چارچوب کلی برای طراحی دیوارهای حائل خاک مسلح با استفاده از خاکهای محلی می‌باشد و کمتر به جزئیات اجرایی پرداخته شده است. همچنین در نشریه مذکور، مبحثی در خصوص استفاده از روش ساندویچ برای احداث دیوارهای حائل خاک مسلح توسط خاکریز محلی وجود ندارد. علاوه بر این، موارد دیوارهای حائل اجرا

باعث پایداری بلند مدت دیوار و جلوگیری از زوال زهکشهای تعبیه شده می‌شود (Koerner و Koerner، 2011). بعلاوه براساس پیشنهاد Yang و همکاران (2023) در دیوارهایی که خاکریز آنها از خاکی با زهکشی نامناسب تشکیل شده، باید از سیستمهای زهکش تحتانی نیز استفاده شود.

- مقدار خاک محلی جایگزین شده با مصالح دانه‌ای مناسب: بر اساس پژوهشهایی که بر روی روش ساندویچ انجام شده است (Abdi و Zandieh، 2014؛ Yang و همکاران، 2018؛ Malek و Ghasemi و همکاران، 2024) و همچنین بر اساس پژوهش حاضر، مقدار ایده‌آل جایگزینی خاک محلی با مصالح دانه‌ای مناسب بستگی به عواملی نظیر نوع مسلح کننده، ویژگی‌های مکانیکی و هیدرولیکی خاک محلی، خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی خاک دانه‌ای و مقدار (درصد) رطوبت خاکها دارد. با این وجود بر اساس نتایج پژوهش حاضر و سایر پژوهشها می‌توان نتیجه گرفت که جایگزینی 20 تا 25% از خاک محلی با مصالح دانه‌ای می‌تواند عملکرد مکانیکی و هیدرولیکی مناسبی را برای خاک دانه‌ای در روش ساندویچ فراهم آورد.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از یک دستگاه آزمایش بیرون کشش بزرگ مقیاس، مقاومت بیرون کشش تسمه‌های پلیمری مدفون در خاکهای رس و ماسه مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این راستا پس از سنجش مقاومت بیرون کشش دو رشته تسمه پلیمری با انتهای آزاد که به موازات هم در خاکهای رس و ماسه قرار گرفته‌اند، مقاومت بیرون کشش یک الگوی U-شکل که در آن انتهای دو رشته تسمه به هم متصل شده‌اند نیز سنجیده شد و اثر ایجاد ناحیه مقاوم انتهایی بر مقاومت بیرون کشش تسمه در خاکهای رس و ماسه مورد مطالعه قرار گرفت. در نهایت با توجه به تاثیر نوع خاک اطراف تسمه بر مقاومت بیرون کشش خاک، اثر محصورسازی تسمه در لایه نازکی از ماسه (روش ساندویچ) به همراه ایجاد ناحیه U-شکل انتهایی بر مقاومت بیرون کشش تسمه -ها مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به آزمایشهای صورت گرفته نتایج زیر مشاهده گردید:

1) در شرایطی که خاک یکنواخت (ماسه یا رس) در برگیرنده تسمه با انتهای آزاد باشد، منحنی نیرو-جابجایی بیرون کشش، یک نقطه اوج نشان می‌دهد که ناشی از بسیج اوج نیروی برشی می‌باشد. منحنی‌های نیرو-جابجایی بیرون کشش مربوط به تسمه -های U-شکل هیچگونه نقطه اوجی را نشان نمی‌دهند و به صورت پیوسته با افزایش جابجایی، افزایش نیروی بیرون کشش وجود دارد.

برگرفته از مطالعات آزمایشگاهی و عددی در رابطه با روش ساندویچ هستند، باید مورد توجه قرار گیرند:

- کنترل مقدار (درصد) رطوبت خاکریز: مقدار رطوبت خاکریز در حین اجرای لایه به لایه آن باید به صورت دقیق کنترل شود. انحراف از درصد رطوبت بهینه برای تراکم خاکریز چسبنده (با زهکشی نامناسب) می‌تواند نتایج جبران ناپذیری را به همراه داشته باشد. به عنوان مثال، اجرای خاکریز در درصد رطوبت بیشتر از بهینه (خارج از محدوده $\pm 5\% w_{opt}$) باعث تغییر شکل بسیار زیاد دیوار می‌شود. همچنین اجرای خاکریز در درصد رطوبت کمتر از درصد رطوبت بهینه باعث از دست دادن مقاومت برشی خاکریز در صورت مرطوب شدن پس از ساخت می‌شود (Christopher و همکاران، 1998). به طور کلی توصیه می‌شود خاکریز چسبنده در درصد رطوبتی معادل $\pm 1\% w_{opt}$ متراکم شود.

- انتخاب وسیله تراکم: انتخاب وسیله تراکم باید با نوع خاکی که نیاز به تراکم دارد متناسب باشد. در روش ساندویچ لازم است که ابزارهای متفاوت مناسب برای تراکم خاک چسبنده به عنوان تشکیل دهنده بخش اصلی خاکریز پشت دیوار و لایه خاک دانه‌ای با ضخامت کم در اطراف مسلح کننده فراهم شود. برای تراکم خاکهای چسبنده استفاده از وسایل تراکم با خاصیت ورزدهندگی نظیر غلتک پاجه‌بزی مناسب می‌باشد؛ در حالیکه، متراکم کننده -های صفحه‌ای و ارتعاشی برای تراکم لایه‌های نازک ماسه ارجحیت دارد (Naresh و Edwards، 2021). قابل ذکر است که با توجه به نتایج مشاهده شده در این پژوهش، تراکم خاک دانه‌ای در ناحیه‌هایی که انتظار بسیج فشار مقاوم از آنها می‌رود- نظیر ناحیه جلو قسمت U-شکل تسمه - تاثیر زیادی در میزان جابجایی لازم برای فعال شدن فشار مقاوم دارند و لذا تراکم مناسب آنها از اهمیت شایانی برخوردار است.

- پیشگیری از ورود رطوبت: جلوگیری از ورود رطوبت به خاکریز خاک مسلح بسیار موثرتر از تلاش برای جمع‌آوری آن پس از ورود به خاکریز است. زهکشهای سطحی و سازه‌های منحرف کننده آب سطحی به همراه سیستم جمع‌آوری آب در پشت خاکریز مسلح، مزایای بیشتری نسبت به سیستم‌های زهکش پشت پوسته بیرونی دیوار دارند. لازم است که شیب‌بندی سطحی به نحوی تنظیم شود که آب سطحی به سمت نما یا رویه دیوار هدایت نشود. همچنین آب‌بندی سطح خاکریز توسط لایه‌های ژئوممبران²⁶ می‌تواند بسیار موثر باشد. در اینگونه موارد لازم است که لایه ژئوممبران هم سطح بالایی توده خاک مسلح را بپوشاند و هم قسمتی از ناحیه دست نخورده زمین طبیعی را که توسط دیوار حائل مسلح نگه داشته شده است. این نوع آب‌بندی باعث می‌شود که آب سطحی نتواند در ترکهای کششی رسوخ کند و در نتیجه

- Abu Farsakh M., Farrag K., Almohd I., Mohiuddin A., "Bearing and Frictional Contributions to the Pullout Capacity of Geogrid Reinforcements in Cohesive Backfill", *Proceeding GeoFrontiers, Slopes and Retaining Structures Under Seismic and Static Conditions*, 2005. [https://doi.org/10.1061/40787\(166\)22](https://doi.org/10.1061/40787(166)22).
- ASTM, "Standard Test Method for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table", ASTM, U.S.A. ASTM Designation: D4253-00, 2000.
- ASTM, "Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil", ASTM, U.S.A. ASTM Designation: D6706-01, 2001.
- ASTM, "Standard Test Method for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density", ASTM, U.S.A. ASTM Designation: D 4254-16, 2016.
- Balakrishnan S., Viswanadham B.V.S., "Centrifuge model studies on the performance of soil walls reinforced with sand-cushioned geogrid layers", *Geotextiles and Geomembranes*, 2019, 47, 6, 803–814, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.103496>.
- Berg R.R., Christopher B.R., Samtani N.C., "Design of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Volume I", FHWA. National Highway Institute Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation, Washington, D.C, 2009a.
- Berg R.R., Christopher B.R., Samtani N.C., "Design of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Volume II", FHWA. National Highway Institute Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation, Washington, D.C, 2009b.
- Chen H.T., Hung W.Y., Chang C.C., Chen Y.J., Lee C.J., "Centrifuge modeling test of a geotextile-reinforced wall with a very wet clayey backfill", *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, 25, 6, 346–359, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2007.01.003>.
- Christopher B.R., Zornberg J.G., Mitchell J.K., "Design guidance for reinforced soil structures with marginal soil backfills", *Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, Georgia, 1998, 797–804.
- Damians I.P., Bathurst R.J., Olivella S., Lloret A., Josa A., "3D modelling of strip reinforced MSE walls" *Acta Geotechnica*, 2021, 16, 3, 711–730. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01057-w>.
- Durukan, Z., Tezcan, S.S., "Cost analysis of reinforced soil walls", *Geotextiles and Geomembranes*, 1992, 11, 1, 29–43. [https://doi.org/10.1016/0266-1144\(92\)90011-X](https://doi.org/10.1016/0266-1144(92)90011-X).
- Esfandiari J., Selamat M., "Laboratory investigation on the effect of transverse member on pull out capacity of metal strip reinforcement in sand", *Geotextiles and Geomembranes*, 2012, 35, 41–49, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.07.002>.
- Fei J., Jie Y., Wu H., Zhou T., "Laboratory pullout test study on the influence zone of geosynthetics", *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2020, 15, (2) در محدوده آزمایشهای انجام شده، U-شکل نمودن انتهای تسمه در خاکهای ماسه و رس تاثیر تقریباً یکسانی بر افزایش مقاومت بیرون کشش نسبت به تسمه با انتهای آزاد داشت و بیشینه نیروی بیرون کشش را به صورت متوسط تا حدود 250% افزایش داد.
- (3) استفاده از ماسه در اطراف تسمه‌های با انتهای آزاد و انتهای U-شکل مقاومت بیرون کشش را به صورت متوسط تا حدود 60% نسبت به استفاده از خاک رس افزایش داد.
- (4) استفاده همزمان از روش ساندویچ و تسمه U-شکل، مقاومت بیرون کشش را به صورت متوسط تا حدود 400% افزایش می دهد.
- قابل بیان است که با وجود عملکرد مناسب روش ساندویچ در شرایط اشباع و غیراشباع خاکهای محلی، چالشهای فراوانی در رابطه با کاربرد این روش در عمل وجود دارد که در پژوهشهای آینده باید مورد بررسی و مطالعه قرار گیرند. برخی از این چالشها عبارتند از: بالازدگی خاک در اثر ریخ زدگی، انقباض یا تورم خاک، بروز ترکهای کششی در خاک محلی و فرسایش خاک محلی ریزدانه و ورود دانه‌های ریز به لایه دانه‌ای روش ساندویچ.
- ## 6- مراجع
- AASHTO, "LRFD Bridge Design Specifications", third ed. AASHTO, Washington, DC, 2010.
- Abdelouhab A., Dias D., Freitag N., "Numerical analysis of the behaviour of mechanically stabilized earth walls reinforced with different types of strips", *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, 29, 2, 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2010.10.011>.
- Abdi M.R., Sadrnejad A., Arjomand M.A., "Strength enhancement of clay by encapsulating geogrids in thin layers of sand", *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27, 6, 447–455, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.06.001>.
- Abdi M.R., Arjomand M.A., "Pullout tests conducted on clay reinforced with geogrid encapsulated in thin layers of sand", *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, 29, 6, 588–595, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2011.04.004>.
- Abdi M.R., Zandieh A.R., "Experimental and numerical analysis of large scale pull out tests conducted on clays reinforced with geogrids encapsulated with coarse material", *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, 42, 5, 494–504. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2014.07.008>.
- Abdi M.R., Tabarsa A., Haghighi P., "Evaluation of soil-geometrically modified geogrid interaction in direct shear mode", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2023, 9, 60, <https://doi.org/10.1007/s40891-023-00479-2>.

- 24, <https://doi.org/10.1007/s40891-023-00443-0>.
- Razzazan R., Keshavarz A., Mosallanezhad M., "Large-scale pullout testing and numerical evaluation of U-shape polymeric straps", *Geosynthetics International*, 2018, 26, 3, 237-250, <https://doi.org/10.1680/jgein.19.00001>.
- Sridharan A., Murthy B.S., Bindumadhava, Revanasiddappa K., "Technique for using fine-grained soil in reinforced earth", *Journal of geotechnical engineering (ASCE)*, 1991, 117, 8, 1174-1190, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:8\(1174\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:8(1174)).
- Tajabadipour M., Lajevardi S.H., "Laboratory large-scale pullout investigation of a new reinforcement of composite geosynthetic strip", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13, 5, 1147-1159, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.03.014>.
- Tatlisoğlu N., Edil T.B., Benson C.H., "Interaction between reinforcing geosynthetics and soil-tire chip mixtures", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124, 11, 1109-1119, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:11\(1109\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:11(1109)).
- Tavakoli S., Aminfar M.H., "Study of nail group efficiency on sandy soil using large scale pull-out box", *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 2022, 10, 1, 69-87, <https://doi.org/10.22075/JRCE.2021.22026.1463>.
- Thuo J.N., Yang K.H., Huang C.C., "Infiltration into unsaturated reinforced slopes with nonwoven geotextile drains sandwiched in sand layers", *Geosynthetics International*, 2015, 22, 6, 457-474, <https://doi.org/10.1680/jgein.15.00026>.
- Wu J., Pham T., "Load-carrying capacity and required reinforcement strength of closely spaced soil-geosynthetic composites", *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, 2013; 139, 9, 1468-1476, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000885](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000885).
- Wu J., Tung C. and Adams M., "Analysis of stress deformation behavior of soil-geosynthetic composites in plane strain condition", *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 2018; 5, 3, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s40515-018-0057-y>.
- Yako, M.A., Christopher, B.R., "Polymerically reinforced retaining walls and slopes in North America", In: Jarrett, P.M., McGown, A. (eds), *The Application of Polymeric Reinforcement in Soil Retaining Structures*. NATO ASI Series, Springer, Dordrecht, 1988, 147, 239-283, https://doi.org/10.1007/978-94-009-1405-6_8.
- Yang K.H., Huynh V.D.A., Nguyen T.S., Portelinha, F.H.M., "Numerical evaluation of reinforced slopes with various backfill-reinforcement-drainage systems subject to rainfall infiltration", *Computers and Geotechnics*, 2018, 96, 25-39, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.10.012>.
- Yang K.H., Wu H.M., Tseng T.L., Yoo C., "Model tests of geosynthetic reinforced soil walls with marginal
- 1-11, <https://doi.org/10.1177/1558925020906674>.
- FHWA, "Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes: Design and Construction Guidelines", Federal Highway Administration and National Highway Institute, Washington DC. FHWA NHI-00-43, 2010.
- Koerner R.M., Koerner G.R., "The importance of drainage control for geosynthetic reinforced mechanically stabilized earth walls", *Journal of Geoengineering*, 2011, 6, 1, 3-13.
- Koerner, R.M., "Designing with Geosynthetics", sixth ed., vol. 1. Xlibris Corporation, Bloomington, USA, 2012.
- Koerner R.M., Koerner G.R., "An extended data base and recommendations regarding 320 failed geosynthetic reinforced mechanically stabilized earth (MSE) walls", *Geotextiles and Geomembranes*, 2018, 46, 904-912, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.07.013>.
- Ladd R.S., "Preparing test specimens using undercompaction", *Geotechnical Testing Journal*, 1978, 1, 1, 16-23, <https://doi.org/10.1520/GTJ10364J>.
- Malek Ghasemi S., Binesh S.M., Tabatabaie Shourijeh P., "Improving clay-geogrid interaction: Enhancing pullout resistance with recycled concrete aggregate encapsulation", *Geotextiles and Geomembranes*, 2024, 52, 6, 1145-1160, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2024.07.010>.
- Mitchell J.K., Zornberg J.G., "Reinforced soil structures with poorly draining backfills part II: case histories and applications", *Geosynthetics International*, 1995, 2, 1, 265-307, <https://doi.org/10.1680/jgein.2.0011>.
- Nareesh C.S., Edward A.N., "Mechanically stabilized earth (MSE) wall fills—a Framework for Use of local available sustainable resources (LASR)", Federal Highway Administration, FHWA Wash. DC USA, 2021.
- NCMA, "Design Manual for Segmental Retaining Walls", third ed. National Concrete Masonry Association, VA, USA, 2010.
- Palmeira E.M., "Soil-geosynthetic interaction: modelling and analysis", *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27, 368-90, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.03.003>.
- Panah, A.K., Eftekhari, Z., "Shaking table tests on polymeric-strip reinforced-soil walls adjacent to a rock slope", *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49, 3, 737-756, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.12.005>.
- Portelinha F.H.M., Zornberg, J.G., Pimentel, V., "Field performance of retaining walls reinforced with woven and nonwoven geotextiles", *Geosynthetics International*, 2014, 21, 4, 270-284, <https://doi.org/10.1680/jgein.14.00014>.
- Razeghi H.R., Ensani, A., "Clayey sand soil interactions with geogrids and geotextiles using large-scale direct shear tests", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2023, 9,

backfill subjected to rainfall", *Geotextiles and Geomembranes*, 2023, 51, 2, 342–359, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.12.002>.

Yüncül, K., Gürbüz, A., "Shaking table study on seismic behavior of MSE wall with inclined backfill soils reinforced by polymeric geostrips", *Geotextiles and Geomembranes*, 2022, 50, 1, 116–136, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2021.09.005>.