



بررسی آزمایشگاهی تأثیر سختی مسلح کننده و اندازه‌ی ذرات خاک بر مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده از خاک

احد اوریا^{*}، البار حیدرلی، سعید کرمزادگان

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۸

بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۱/۱۹

کلمات کلیدی:

مقاومت بیرون کشش

سختی مسلح کننده

اندرکش خاک و مسلح کننده

اندازه‌ی دانه‌های خاک

خاک مسلح

خلاصه: یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار در رفتار مکانیکی سیستم‌های خاک مسلح، پارامترهای اندرکش بین خاک و مسلح کننده در فصل مشترک آنها می باشد. پارامترهای مکانیکی فصل مشترک خاک و مسلح کننده به مشخصات خاک و مسلح کننده وابسته است. در این تحقیق تأثیر اندازه دانه‌های خاک و نیز سختی مسلح کننده در مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده از خاک بصورت آزمایشگاهی بررسی شده است. مقاومت بیرون کشیدگی سه نوع مسلح کننده با سختی‌های متفاوت در سه نوع خاک با دانه‌بندی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های بیرون کشیدگی در سه سطح تنش ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال انجام شده است. برای بررسی این موضوع و تعیین شاخصی برای سختی مسلح کننده، دستگاهی ساخته شده است تا بتوان مقدار نفوذ دانه‌های جامد خاک در مسلح کننده اندازه‌گیری کرد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد فرورفتگی دانه‌های خاک در مسلح کننده تأثیر زیادی در مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده از خاک داشته است. مقدار نفوذ دانه‌های جامد خاک در مسلح کننده با کاهش سختی مسلح کننده و افزایش اندازه قطر دانه‌های خاک افزایش می‌یابد. برای هر سطح تنش قائم مشخص، هر چقدر میزان نفوذ دانه‌های جامد خاک در مسلح کننده بیشتر بوده، مقاومت بیرون کشیدگی آن مسلح کننده نیز بیشتر بوده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش قطر دانه‌های جامد خاک، مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده نیز افزایش یافته است ولی این افزایش در مورد مسلح کننده با سختی کمتر در مقایسه با مسلح کننده سختی بیشتر، چشم‌گیرتر بوده است و نیز اختلاف مقاومت بیرون کشیدگی سه مسلح کننده با سختی‌های مختلف در خاک ریزدانه کمتر از اختلاف مقاومت بیرون کشیدگی سه مسلح کننده در خاک درشت دانه بوده است که نشان دهنده تأثیر همزمان سختی مسلح کننده و اندازه دانه‌های خاک در مقاومت بیرون کشیدگی می‌باشد.

۱- مقدمه

سبب تضعیف پایداری سیستم خاک مسلح شده و می‌تواند منجر به خرابی کل سیستم گردد. یکی از مسائل چالش‌برانگیز برای مهندسين و متخصصين ژئوتکنیک ضعف در فصل مشترک خاک و مسلح کننده می‌باشد. ضعف در فصل مشترک خاک و مسلح کننده سبب افزایش طول مسلح کننده مورد نیاز برای مهار مسلح کننده در توده خاک مورد نظر شده و سبب مشکلات اقتصادی و زیست محیطی می‌گردد [۱۱]. با تقویت فصل مشترک خاک و مسلح کننده می‌توان طول مصرفی موردنیاز در سیستم خاک مسلح را به طرز قابل‌توجهی کاهش داد. روش‌های متفاوتی برای افزایش بازده تسلیح در خاک مسلح توسط محققین پیشنهاد گردیده است. استفاده از سیمان و رزین اپوکسی در سطح مسلح کننده جهت افزایش زبری در محل تماس دانه‌های خاکی و مسلح کننده پیشنهاد شده است [۱۲-۱۷]. با افزایش ضخامت مسلح کننده، دانه‌های خاکی به دلیل نفوذ در بافت مسلح کننده سبب افزایش زاویه

اندرکش بین خاک و مسلح کننده یکی از عوامل مهم و تعیین کننده در طراحی و تحلیل سیستم‌های خاک مسلح می‌باشد. با درک صحیح و عمیق تر از پارامترهای اندرکش خاک و مسلح کننده می‌توان به روش‌های تحلیل و طراحی‌های ایمن تر و قابل اعتمادتری برای سیستم‌های خاک مسلح دست یافت. در طی چند سال اخیر روش‌های مختلف و مفیدی توسط پژوهشگران برای تعیین این پارامترهای اساسی پیشنهاد گردیده است [۱-۹]. استفاده از عناصر تسلیح سبب افزایش تنش محصورکننده و در نتیجه افزایش مقاومت در محیط خاکی می‌شود [۱۰]. پایداری سیستم خاک مسلح به سه عامل اساسی گسیختگی کششی مسلح کننده، گسیختگی برشی خاک و لغزش بین مسلح کننده و خاک بستگی دارد. نامناسب بودن هر یک از این عوامل

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: aouria@uma.ac.ir



۲- مواد و روش‌ها

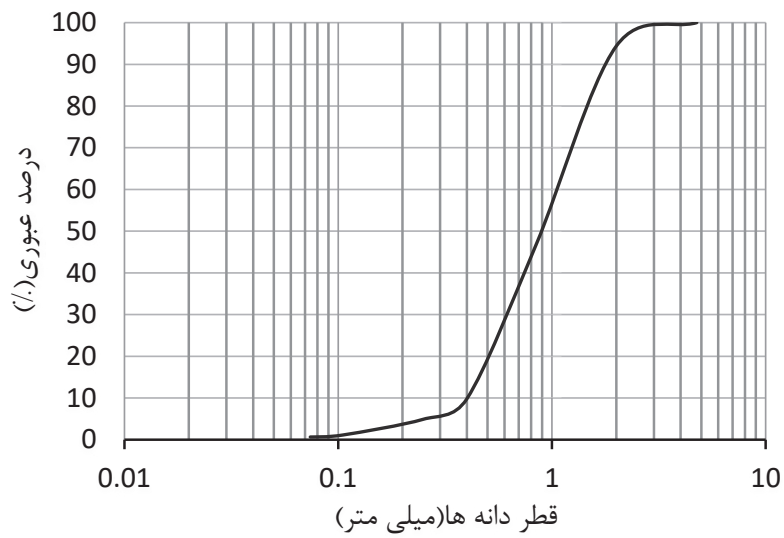
۲-۱- مصالح مورد استفاده

در این تحقیق از سه نوع خاک دانه‌ای شامل ماسه، شن ریز و شن درشت استفاده شد. خاک مورد استفاده از معادن شن و ماسه واقع در نواحی اطراف شهر اردبیل جمع‌آوری گردید. انواع ذرات سنگریزه ریز و درشت مورد استفاده در این تحقیق مشابه بوده و این دو نوع مصالح توسط الک از هم جدا شده‌اند. با توجه به طبقه‌بندی سیستم متحد، طبق ASTM D2487 [۳۰] ماسه استفاده‌شده از نوع بد دانه‌بندی شده بوده‌است. مشخصات ماسه مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ و شکل ۱ نشان داده شده است. شن ریز استفاده‌شده در این تحقیق رد شده از الک شماره ۸ و مانده بر روی الک شماره ۱۰ بوده‌است. شن درشت مورد استفاده در این آزمایش نیز رده‌شده از الک ۳/۸ اینچی و مانده روی الک شماره ۴ بوده‌است. با توجه به روش تولید هر سه نوع خاک مورد استفاده در این تحقیق طبق سیستم نام‌گذاری متحد، بد دانه بندی شده، بوده‌اند. در شکل ۲ تصویر مصالح مورد استفاده و در شکل ۳ نمودار مقاومت برشی در تنش‌های عمودی مختلف برای هر یک از مصالح نشان داده شده است.

۲-۲- مسلح کننده

در تحقیق حاضر دو نوع ژئوتکستایل و یک نوع نوار فولادی به‌عنوان مسلح‌کننده استفاده شده است. ژئوتکستایل‌های مورد استفاده در این پژوهش از نوع بافته‌شده می‌باشد. مسلح‌کننده‌های مورد استفاده به‌گونه‌ای انتخاب شدند که سطح سختی متفاوتی داشته باشند. نوار فلزی مورد استفاده به‌عنوان مسلح‌کننده نوع ۱، مسلح‌کننده با سختی متوسط به‌عنوان مسلح‌کننده نوع ۲ و مسلح‌کننده با سطح سختی کم به‌عنوان مسلح‌کننده نوع ۳ نام‌گذاری شده‌اند. ویژگی‌های ژئوتکستایل‌های مورد استفاده در این آزمایش‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. ویژگی‌های مسلح‌کننده‌های استفاده‌شده بر اساس استانداردهای ASTM D4595 [۳۱]، ASTM D5199 [۳۲] و ASTM D5261 [۳۳] تعیین شد. در شکل ۴ مسلح‌کننده‌های مورد استفاده نشان داده شده است.

اتساع شده و متعاقباً ظرفیت باربری سیستم افزایش می‌یابد [۱۵]. با افزودن الیاف در حد بهینه به محیط خاکی به دلیل افزایش چسبندگی بین دانه‌های خاکی و الیاف، بازده مسلح‌کننده افزایش می‌یابد [۱۸]. تنش توزیع شده در محیط خاکی با نحوه‌ی قرارگیری مسلح‌کننده‌ها در خاک رابطه‌ی تنگاتنگی دارد. بطوریکه با تغییر چیدمان مسلح‌کننده در محیط خاکی و استفاده از مسلح‌کننده‌ها بصورت مهار برگشتی می‌توان توزیع تنش در هر دو جهت افقی و قائم محیط را تغییر داد [۱۹-۲۲]. فرورفتگی دانه‌های خاک در بافت مسلح‌کننده تأثیر قابل‌توجهی در مقاومت برشی و کششی مسلح‌کننده از خاک دارد. پارامترهای مختلفی مانند اندازه‌ی دانه‌های خاک، نوع مسلح‌کننده و سختی مسلح‌کننده می‌توانند در مقاومت برشی سیستم خاک مسلح مؤثر باشند [۲۳-۲۶]. رطوبت و وزن مخصوص خشک خاک تقویت‌شده با ژئوستنتیک تأثیر مستقیمی بر مکانیسم خاک و مسلح‌کننده دارد، به‌طوری‌که تغییرات هریک از این پارامترها، می‌تواند اصطکاک بین دانه‌های خاک و مسلح‌کننده را به‌طور کلی تحت تأثیر قرار دهد [۲۷ و ۲۸]. نوع و نحوه تغییر شکل ایجاد شده در مسلح‌کننده در سیستم خاک مسلح یکی از پارامترهای بسیار مهم در مقاومت بیرون کشش مسلح‌کننده از محیط خاکی می‌باشد. بر اثر تغییر سطح تنش و اندازه‌ی دانه‌های خاکی در مسلح‌کننده نوعی حالت فرو رفتگی و بالا آمدگی در سطح مسلح‌کننده بوجود می‌آید. در اثر ایجاد حالت موجدار در سطح مسلح‌کننده، درگیری دانه‌های خاکی و مسلح‌کننده افزایش می‌یابد [۲۹]. در تحقیقات گذشته، پارامترهای مؤثر در مقاومت برشی فصل مشترک مسلح‌کننده و خاک بصورت وسیعی بررسی شده ولی توجه چندانی بر تأثیر متقابل این پارامترها نشده است. در همه تحقیقات قبلی نیز مشخصات فصل مشترک خاک و مسلح‌کننده بصورت مستقیم از نتایج آزمایش‌های برش فصل مشترک یا بیرون کشیدگی تعیین شده‌است که بیشتر براساس نسبتی از مقاومت برشی خاک بیان شده است. هدف از این تحقیق بررسی نحوه تأثیرگذاری مشخصات مکانیکی مسلح‌کننده و خاک در مشخصات فصل مشترک بوده‌است که تأثیر نحوه تغییر شکل مسلح‌کننده در میان دانه‌های جامد در مقاوت بیرون کشیدگی بررسی شده است. این تغییر شکل تابع سختی مسلح‌کننده و اندازه دانه‌های خاک می‌باشد. بدین منظور مقاوت بیرون کشیدگی سه نوع مسلح‌کننده با سختی‌های مختلف در سه نوع خاک با اندازه دانه‌های مختلف بررسی شده است.



شکل ۱. نمودار دانه بندی ماسه‌ی مورد استفاده

Fig. 1. Particle size distribution curve of the sand

جدول ۱. ویژگی‌های ماسه‌ی مورداستفاده

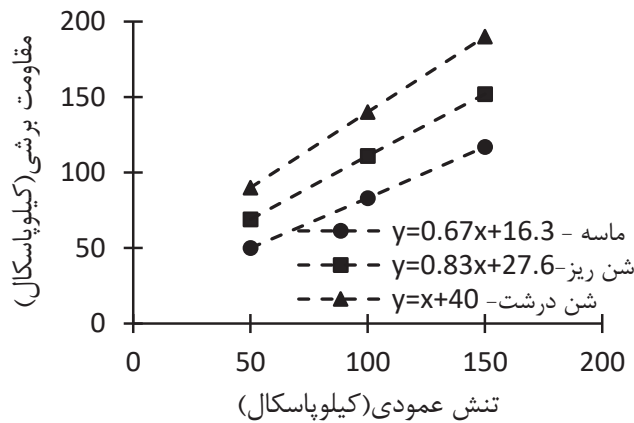
Table.1. Properties of the sand used in this study

D_{10}	D_{30}	D_{60}	ϕ	γ
0.4(mm)	0.6(mm)	1.2(mm)	34°	16.5KPa



شکل ۲. مصالح مورداستفاده (الف-ماسه ب-شن ریز ج-شن درشت)

Fig. 2. Materials used in this study



شکل ۳. نمودار مقاومت برشی - تنش عمودی مصالح مورد استفاده

Fig. 3. Shear resistance-vertical stress diagram of the materials used

جدول ۲. مشخصات مکانیکی مسلح کننده‌های مورد استفاده

Table 2. Basic parameters of reinforcement used in this study

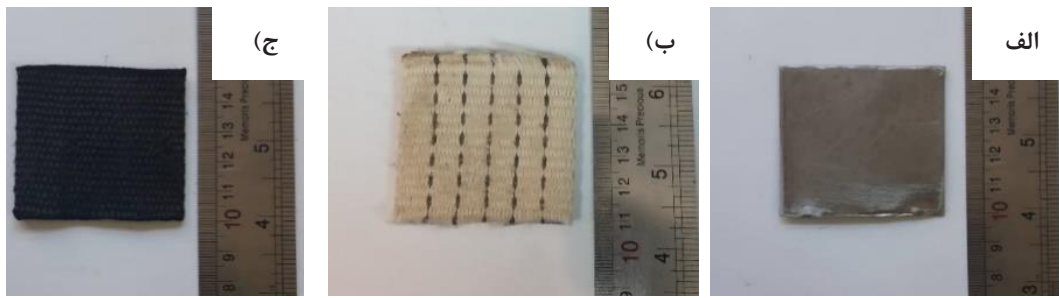
مدول بانگ (کیلو نیوتن بر متر)	تغییر طول (%)	ضخامت (میلی متر)	مقاومت محوری (کیلو نیوتن بر متر)	وزن واحد (کیلوگرم بر مترمربع)	مسلح کننده مورد استفاده
۱/۰۳×۱۰ ^۶	۱ >	۰/۵	۱۵۰۰	۳/۹	مسلح کننده نوع ۱ (صفحه‌ی فلزی)
۹۷۱	۱۵/۹۳	۲/۸	۱۵۵	۱/۹۸	مسلح کننده نوع ۲
۹۱۴	۱۲/۲۳	۲/۶۵	۱۱۲	۰/۹۴	مسلح کننده نوع ۳

۲-۴- برنامه آزمایش و آماده‌سازی نمونه‌ها

در مطالعه‌ی آزمایشگاهی حاضر، تأثیر سختی مسلح کننده و اندازه ذرات خاک مورد استفاده بر مقاومت بیرون کشش مسلح کننده از سیستم خاک مسلح بررسی شد. برای این منظور، آزمایش‌های بیرون کشش گوناگونی با مسلح کننده‌هایی با شاخص سختی مختلفی در انواع خاک انجام شد. آزمایش‌های بیرون کشش تحت سه سطح تنش ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال انجام گرفتند. سرعت بارگذاری آزمایش‌ها ۱ میلی‌متر در دقیقه بود. تمام آزمایش‌ها تا زمانی که از صحت نتایج اطمینان لازم کسب شود انجام شدند. حداقل تعداد تکرار آزمایش‌ها ۳ سری بودند. به منظور از بین بردن اثر رطوبت و ساده‌سازی فرآیند تهیه نمونه‌ها، میزان رطوبت خاک مورد استفاده در حداقل شرایط ممکن حفظ شد. مهم‌ترین عامل در انجام آزمون‌های

۲-۳- دستگاه بیرون کشش

جهت بررسی ظرفیت بیرون کشش دستگاه کشش مخصوصی طراحی شده و مورد استفاده قرار گرفته شد. دستگاه بیرون کشش طراحی شده از سه قسمت بارگذاری ثقلی عمودی، بارگذاری افقی موتوری و یک واحد کنترل الکترونیکی تشکیل شده است. جعبه بارگذاری فولادی دارای ابعاد ۶۱۰×۴۶۰×۳۲۰ میلی‌متر (طول، عرض و ارتفاع) و ضخامت ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. ابعاد جعبه‌ی آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D6706 [۳۴] انتخاب شد. جهت قرارگیری مناسب‌تر مسلح کننده در محیط خاکی و کاهش اثر اصطکاک دیواره از ورق‌های فلزی در قسمت بالا و پایین محل قرارگیری مسلح کننده به قسمت ابتدایی جعبه‌ی فلزی متصل گردید. سیستم بیرون کشش مورد استفاده در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۴. مسلح کننده مورد استفاده (الف-مسلح کننده نوع ۱ ب-مسلح کننده نوع ۲ ج-مسلح کننده نوع ۳)

Fig.4.Reinforcement used (a.type1 b.type2 c.type3)



شکل ۵. سیستم مورد استفاده (الف-تصویر دستگاه بیرون کشش ب-شکل شماتیک دستگاه بیرون کشش ج-تصویر قرارگیری مسلح کننده در داخل جعبه ی دستگاه بیرون کشش)

Fig.5. a) Photograph b) Schematic diagram of the pull out device c) Installation of geosynthetic

جدول ۳. مشخصات شاخص سختی انواع مسلح کننده

Table.3. Properties of stiffness index of reinforcement types

تنش عمودی (کیلوپاسکال)			انواع مسلح کننده
۱۱/۱۱	۸/۳۳	۵/۵۶	
۰	۰	۰	میزان نفوذ در مسلح کننده نوع ۱ (میلی متر)
۱/۶	۱	۰/۴	میزان نفوذ در مسلح کننده نوع ۲ (میلی متر)
۲/۶	۱/۸	۱	میزان نفوذ در مسلح کننده نوع ۳ (میلی متر)

دیگر نیز به قسمت بالایی قالب متصل شدند. با استفاده سیستم بارگذاری و گیج‌های دستگاه برش مستقیم میزان تنش-نشست یا فرورفتن پیچ‌ها درون بافت مسلح کننده برای هر نوع از مسلح کننده قرائت گردید. مسلح کننده با درجه نفوذ کمتر پیچ‌ها به عنوان مسلح کننده سخت‌تر و با مسلح کننده با درجه‌ی نفوذ بیشتر به‌عنوان مسلح کننده نرم‌تر معرفی گردید. در شکل ۶ سیستم مورد استفاده جهت تعیین شاخص سختی آورده شده است. در جدول ۳ انواع مسلح کننده با شاخص نفوذ مختلف آورده شده است.

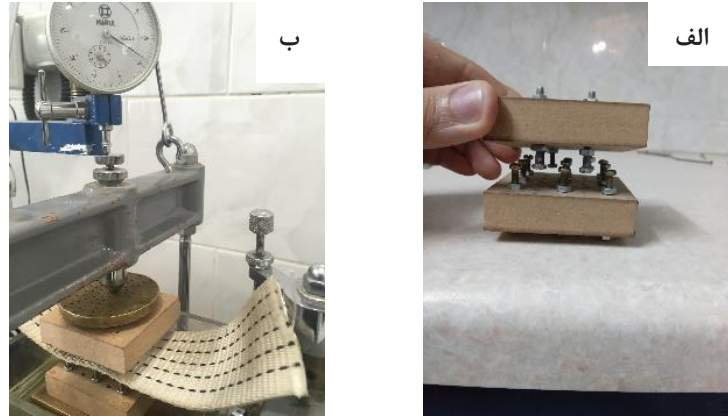
۳- نتایج

نتایج آزمایش بیرون کشیدگی انجام شده بر روی نوارهای ژئوستنتیک با سختی زیاد (مسلح کننده نوع ۱) در خاک ماسه‌ای در تنش‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال در شکل ۷، نشان داده شده است. میانگین نیروی بیرون کشیدگی مسلح کننده نوع ۱ در خاک ماسه‌ای، شنی ریز و شنی درشت به ترتیب در حدود ۷/۴، ۷/۹۴ و ۸/۷۳ کیلونیوتن می‌باشد که بیشترین نیروی بیرون کشش مربوط به خاک درشت‌دانه در تنش عمودی ۱۵۰ کیلوپاسکالی برابر ۱۱/۸۸ بوده و کمترین مقدار نیروی بیرون کشش نیز مربوط به حالت خاک ماسه‌ای در تنش ۵۰ کیلوپاسکالی برابر ۴/۶ کیلونیوتن بوده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده با مسلح کننده نوع ۲ و ۳ در تنش‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال به ترتیب در شن ریز و درشت در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. بیشترین نیروی بیرون کشش به دست آمده از مسلح کننده نوع ۲ و ۳ به ترتیب ۱۴ و ۱۶/۲ کیلو نیوتن از خاک شنی درشت مربوط به تنش عمودی ۱۵۰ کیلوپاسکال بوده است.

مقایسه‌ای امکان تهیه نمونه‌های مشابه با یکدیگر می‌باشد جهت رسیدن به این مهم، نمونه‌های آزمایش شده از نظر چگالی، تنش و شرایط رطوبتی شرایط یکسانی داشتند. به منظور کنترل وزن مخصوص و تخلخل اولیه تمام نمونه‌های آزمایشی، وزن کل نمونه مورد استفاده در هر آزمون ثابت نگه داشته و مقدار عددی آن بر اساس مطالعه پیشین انتخاب گردید [۹]. جهت تراکم نمونه‌های قرار داده شده در جعبه آزمایش، وزنه ۸ کیلوگرمی از ارتفاع ۱۰ سانتی متری رها شد. نوارهای مسلح کننده مورد استفاده در وسط لایه نمونه قرار گرفت به طوری که ۱۶ سانتی متر در بالا و ۱۶ سانتی متر زیر نوارها مسلح کننده جایگذاری شدند. ابعاد نوار ژئوستنتیک مورد استفاده ۱۵ سانتی متر (عرض) و ۷۰ سانتی متر (طول) بود. طول مدفون مسلح کننده ها در داخل توده خاک، ۳۰ سانتی متر بوده است.

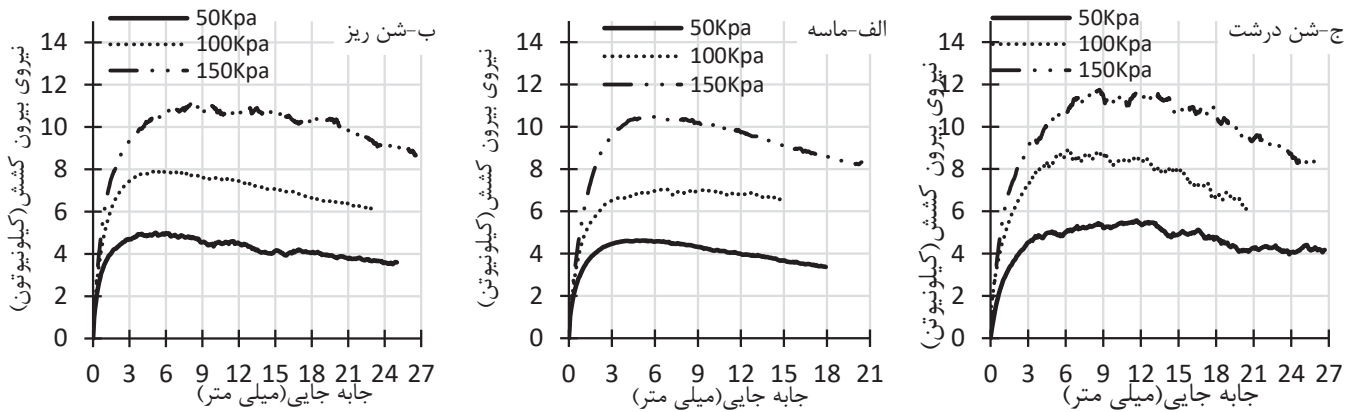
۲-۵- شاخص سختی مسلح کننده

سختی مسلح کننده یکی از مهم‌ترین پارامترهایی هست که در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر آن در مقاومت بیرون کشش مسلح کننده از حجم خاکی پرداخته شده است. در ابتدا جهت مشخص شدن سختی برای هر نوع از مسلح کننده‌ها شاخصی به نام شاخص سختی مسلح کننده تعریف شد. شاخص سختی معیاری جهت تعیین سختی نسبی انواع مسلح کننده‌ها نسبت به یکدیگر هست. برای مشخص شدن شاخص سختی مسلح کننده دو قالب با ابعاد ۶×۶ سانتی متر و ضخامت ۱/۵ سانتی متر طراحی گردید که مسلح کننده در بین این دو قالب قرار گرفتند. جهت شبیه سازی دانه‌های خاک از پیچ‌هایی با ارتفاع ۳ سانتی متر و قطر ۲ میلی متر استفاده شد. تعدادی مشخص از پیچ‌ها به قالب قرار گرفته در قسمت پایینی مسلح کننده و تعدادی



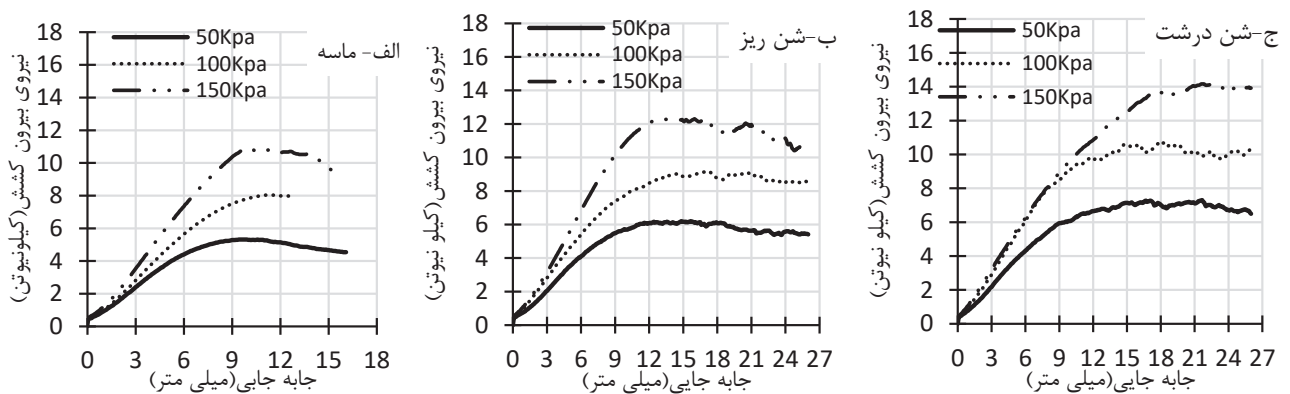
شکل ۶. سیستم مورد استفاده جهت تعیین شاخص سختی (الف- تصویر قالب طراحی شده ب- مسلح کننده قرار گرفته درون قالب طراحی شده و سیستم برش مستقیم)

Fig 6. The system used to determine the stiffness index (a- image of the designed mold b- reinforcement placed inside the designed mold and direct shear system)



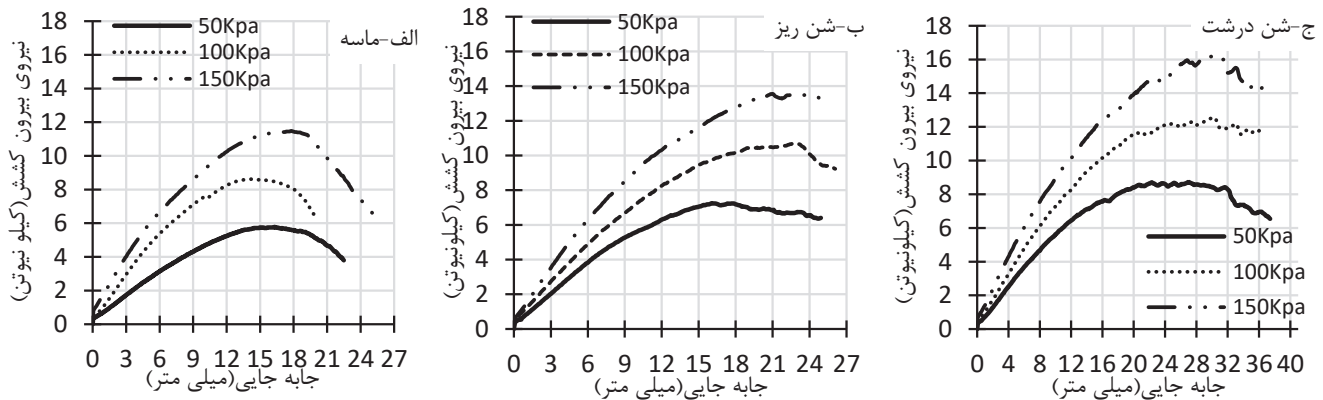
شکل ۷. مقاومت بیرون کشش مسلح کننده نوع ۱ در خاکهای (الف- ماسه‌ای ب- شن ریز ج- شن درشت)

Fig.7. Result of pull out tests conducted for type 1 reinforcement in (a .sand b .fine gravel c .coarse gravel)



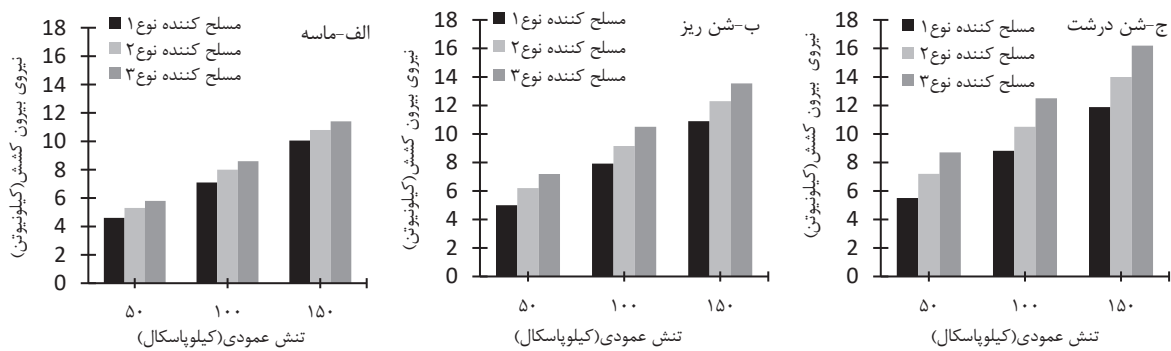
شکل ۸. مقاومت بیرون کشش مسلح کننده نوع ۲ در خاکهای (الف- ماسه‌ای ب- شن ریز ج- شن درشت)

Fig.8. Result of pull out tests conducted for type 2 reinforcement in (a .sand b .fine gravel c .coarse gravel)



شکل ۹. مقاومت بیرون کشش مسلح کننده نوع ۳ در خاک‌های (الف- ماسه‌ای ب-شن ریز ج-شن درشت)

Fig. 9. Result of pull-out tests conducted for type 3 reinforcement in (a .sand b .fine gravel c .coarse gravel)

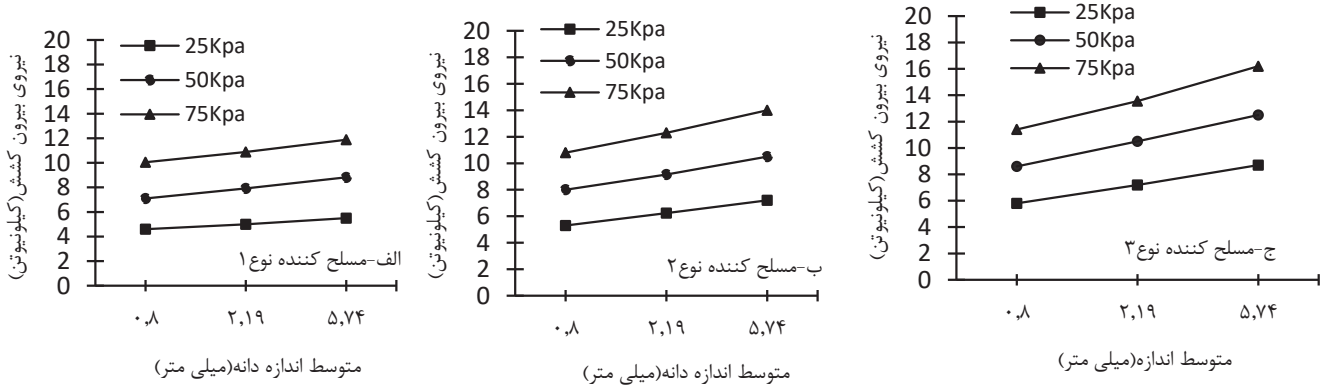


شکل ۱۰. نمودار مقایسه تغییرات نیروی برشی انواع مسلح کننده در خاک‌های (الف-ماسه ب-شن ریز ج-شن درشت)

Fig. 10. Pull out capacity of three types of geosynthetic in the a. sand b. fine gravel c. coarse gravel

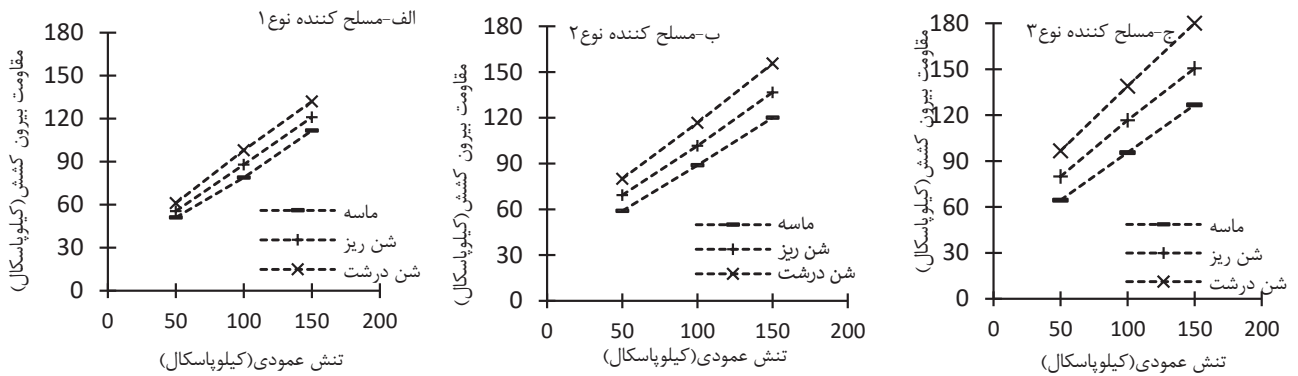
کشیدگی تأثیر داشته باشند. نتایج مقاومت بیرون کشیدگی انواع مختلف خاک با انواع مسلح کننده به صورت نمودار مقایسه‌ای در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۲ می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر اندازه دانه‌ها در مشخصات فصل مشترک خاک و مصلح کننده نیز تابع سختی مسلح کننده بوده است. در مسلح کننده با سختی کم‌تر تأثیر افزایش قطر متوسط دانه در افزایش پارامترهای مقاومتی فصل مشترک، بیشتر بوده است. نمودار شکل ۱۳ تغییرات چسبندگی ظاهری در فصل مشترک خاک و مسلح کننده را نشان می‌دهد. با افزایش اندازه‌ی دانه‌های خاک از ماسه‌ای به شنی درشت در مسلح کننده نوع ۱ چسبندگی و زاویه اصطکاک به ترتیب ۶ کیلوپاسکال و ۵ درجه تغییر کرده‌اند ولی این تغییرات در مسلح کننده نوع ۳ به ترتیب ۲۲ کیلوپاسکال و ۸ درجه می‌باشد که تغییرات نشان داده شده می‌تواند حاصل از تفاوت‌های سختی دو مسلح کننده باشد.

در شکل ۱۰ نتایج آزمایش انجام شده بر اساس نمودارهای مقایسه‌ای نیروی بیرون کشش مسلح کننده‌های مختلف در تنش‌های عمودی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال آورده شده است. با توجه به این نمودارهای این شکل می‌توان نشان داد که رفتار مسلح کننده‌ها براساس نوع خاک مورد استفاده تفاوت داشته‌است، بطوریکه با کاهش سختی مسلح کننده در خاک ماسه‌ای نیروی بیرون کشش در حدود ۹ درصد، در خاک شنی ریز ۱۵ درصد و در خاک شنی درشت ۲۰ درصد افزایش یافته است. تأثیر اندازه ذرات خاک مورد استفاده در نیروی بیرون کشیدگی در انواع مختلف مسلح کننده در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۱۱-الف قابل مشاهده است، به دلیل سختی بالای مسلح کننده نوع ۱ (صفحه‌ی فلزی) افزایش اندازه ذرات خاک تأثیر چندانی در افزایش نیروی بیرون کشیدگی ندارند ولی با کاهش سختی مسلح کننده افزایش ذرات می‌توانند در نیروی بیرون



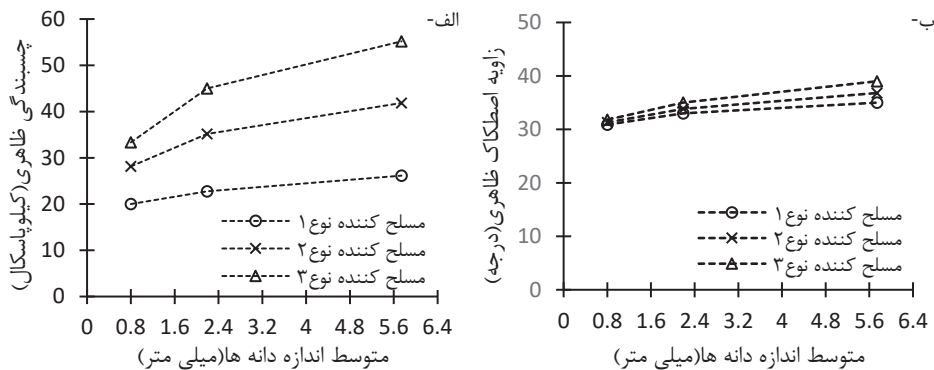
شکل ۱۱. نمودار مقایسه تغییرات نیروی برشی در انواع مسلح کننده با تغییرات اندازه متوسط دانه‌های خاک (الف-مسلح کننده نوع ۱-ب-مسلح کننده نوع ۲-ج-مسلح کننده نوع ۳)

Fig.11. Pull-out capacity of different soil sizes in the different types of reinforcement



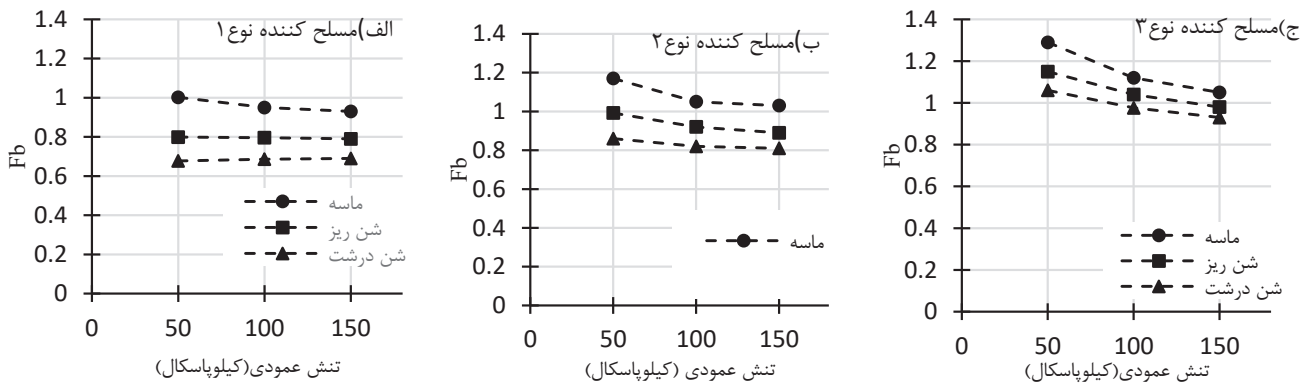
شکل ۱۲. نمودار تغییرات مقاومت برشی خاک‌های مختلف در انواع مختلف مسلح کننده

Fig. 12. Interface shear strength in different types of reinforcement



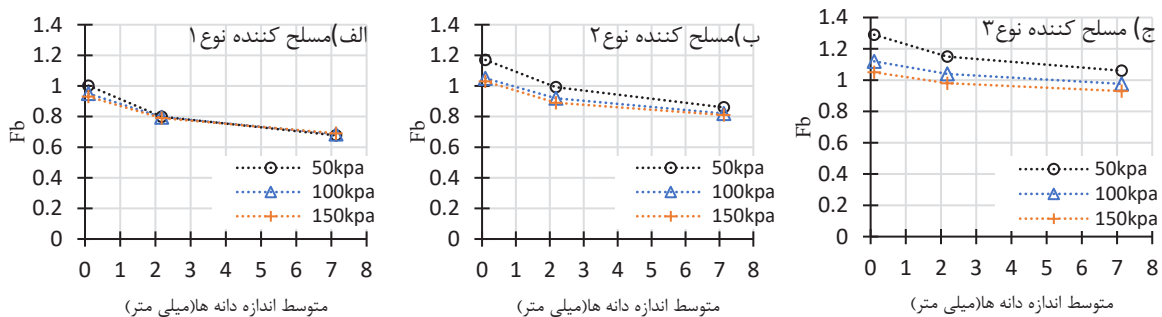
شکل ۱۳. نمودار پارامترهای موهر کلمب در فصل مشترک خاک و مسلح کننده (الف- چسبندگی ظاهری ب- زاویه اصطکاک)

Fig. 13. Adhesion and friction angle at the improved interface with different reinforcement types



شکل ۱۴. نمودار تغییرات ضریب اندرکنش در انواع محیط خاکی (الف- مسلح کننده نوع ۱ ب- مسلح کننده نوع ۲ ج- مسلح کننده نوع ۳)

Fig.14. Interface interaction coefficients in different types of soil



شکل ۱۵. نمودار تغییرات ضریب اندرکنش در انواع اندازه‌های دانه‌های خاکی و تنش‌های عمودی مختلف (الف-مسلح کننده نوع ۱ ب- مسلح کننده نوع ۲ ج-مسلح کننده نوع ۳)

Fig.15. Interface interaction coefficients in different grain size

خاک مسلح با تغییرات سختی و تنش عمودی تغییر می‌کند، بطوریکه با افزایش تنش عمودی ضریب اندرکنش مسلح کننده در سیستم کاهش می‌یابد. با مقایسه‌ی تغییرات ضریب اندرکنش در مسلح کننده نوع ۱ و نوع ۳ با تغییرات متوسط اندازه دانه‌های محیط خاکی (شکل ۱۵-ب و شکل ۱۵-ج) تغییرات و تفاوت عملکرد تنش‌های عمودی محسوس‌تر می‌باشد. بطوریکه با افزایش سختی، اندرکنش مسلح کننده و خاک در تنش‌های عمودی مختلف به مقداری مشخصی میل می‌کند. ضریب اندرکنش در مسلح کننده نوع ۱ برای انواع محیط خاکی در تنش‌های عمودی مختلف در بازه‌ی ۰/۶۷۷-۰/۱۰۰۲ تغییر می‌کند. با تغییر مسلح کننده به نوع ۲ و ۳ بازه‌ی عددی ضریب اندرکنش به ترتیب به اعداد ۰/۸۱-۰/۱۷ و ۰/۹۳-۰/۲۹ تغییر می‌کند. نتایج تحقیقات قبلی نیز بیانگر کاهش مقدار ضریب اندرکنش با افزایش سطح تنش می‌باشد [۱، ۳۷ و ۳۸].

جهت بدست آوردن ضریب اندرکنش بین خاک و مسلح کننده در انواع محیط خاکی و مسلح کننده از رابطه‌ی (۱) استفاده شده است [۳۵ و ۳۶] که در آن P_R مقاومت بیرون کشش، F_b ضریب اندرکنش بین خاک و مسلح کننده، L_R طول مسلح کننده، σ_n تنش قائم، ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک و c چسبندگی آن است.

$$P_R = 2F_b L_R (c + \sigma_n \tan \phi) \quad (1)$$

در شکل ۱۴ و ۱۵ نتایج تغییرات ضریب اندرکنش به ترتیب به تغییرات تنش عمودی وارده و متوسط اندازه‌ی محیط خاکی نشان داده شده است با توجه به نتایج شکل ۱۴ می‌توان نتیجه گرفت ضریب اندرکنش در سیستم

۴- بحث

مقاومت بیرون کشیدگی مسلح‌کننده از خاک دارد. نتایج آزمایشات بیرون کشیدگی انجام شده در این تحقیق با مسلح‌کننده‌های مختلف با سختی‌های متفاوت در سه نوع خاک با اندازه دانه‌های متفاوت نشان می‌دهد صرفنظر از نوع سطح مسلح‌کننده، سختی آن نیز پارامتر تأثیرگذاری در مقاومت بیرون کشیدگی آن می‌باشد. با افزایش سختی مسلح‌کننده و کاهش مقدار نفوذ دانه‌های خاک در مسلح‌کننده مقاومت بیرون کشیدگی مسلح‌کننده کاهش می‌یابد. برای هر مسلح‌کننده، با افزایش قطر دانه‌های خاک مقدار مقاومت بیرون کشیدگی و ضریب اندرکنش بین مسلح‌کننده و خاک افزایش یافته است. برای مسلح‌کننده فلزی که دارای سختی زیادی بوده و مقدار نفوذ دانه‌های خاک در مسلح‌کننده ناچیز بوده است، تغییرات ضریب اندرکنش با اندازه دانه‌ها کمتر از دو مسلح‌کننده دیگر بوده است. همچنین برای مسلح‌کننده فلزی نیز تأثیر سطح تنش قائم بر مقدار ضریب اندرکنش، کمتر از دو مسلح‌کننده دیگر بوده است که نشان دهنده تأثیر مقدار سختی بر ضریب اندرکنش بوده است.

منابع

- [1] M. Abu-Farsakh, J. Coronel, M. Tao, Effect of soil moisture content and dry density on cohesive soil-geosynthetic interactions using large direct shear tests, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(7) (2007) 540-549.
- [2] M. Abdi, H. Mirzaeifar, Experimental and PIV evaluation of grain size and distribution on soil-geogrid interactions in pullout test, *Soils and foundations*, 57(6) (2017) 1045-1058.3
- [3] J. Derksen, M. Ziegler, R. Fuentes, Geogrid-soil interaction: A new conceptual model and testing apparatus, *Geotextiles and Geomembranes*, 49(5) (2021) 1393-1406.
- [4] H.-L. Wang, W.-H. Zhou, Z.-Y. Yin, X.-X. Jie, Effect of grain size distribution of sandy soil on shearing behaviors at soil-structure interface, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(10) (2019) 04019238.
- [5] C. Suksiripattanapong, S. Horpibulsuk, A. Udomchai, A. Arulrajah, T. Tangsutthinon, Pullout resistance mechanism of bearing reinforcement embedded in coarse-grained soils: Laboratory and field investigations,

نکته‌ی حائز اهمیت‌ی که در این پژوهش قابل مشاهده می‌باشد، با استفاده همزمان از مسلح‌کننده با سختی کمتر و خاک با دانه‌بندی درشت‌تر، می‌توان مقاومت بیرون کشش بیشتری را از سیستم خاک مسلح انتظار داشت. دلیل افزایش مقاومت بیرون کشش سیستم با افزایش اندازه‌ی دانه‌های خاک و کاهش سختی، در نحوه درگیر شدن دانه‌های خاک با سطح مسلح می‌باشد. در شکل ۱۶ رفتار مسلح‌کننده با سختی زیاد و کم بصورت شماتیک نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل قابل مشاهده می‌باشد زمانیکه مسلح‌کننده دارای سختی بیشتری می‌باشد (۱۶-الف) مسلح‌کننده در برابر نفوذ ذرات خاک درون بافت خود مقاومت کرده و تغییر شکلی در حالت کلی مسلح‌کننده ایجاد نمی‌شود. در مسلح‌کننده نرم تر (۱۶-ب) می‌توان مشاهده کرد که پیچ‌هایی که جهت شبیه‌سازی دانه‌های درشت ذرات خاک استفاده شده‌اند سبب ایجاد تغییر شکل در سطح مسلح‌کننده کرده و کاملاً به درون بافت مسلح‌کننده فرو می‌روند، فرو رفتگی ذرات خاک عاملی می‌باشد که سبب افزایش قفل و بست در میان مسلح‌کننده و خاک می‌شوند. این عامل را می‌توان در واقع شبیه مکانیسم ایجاد زاویه اتساع در خاک‌های متراکم تصور نمود. لذا می‌توان تأثیر همزمان سختی مسلح‌کننده و قطر ذرات خاک را بصورت یک پارامتر بدون بعد نسبت نفوذ به قطر متوسط ذرات خاک بیان داشت. هر چه مقدار این پارامتر بدون بعد بزرگتر باشد، مقاومت بیرون کشیدگی مسلح‌کننده در آن خاک نیز مقدار بیشتری خواهد بود. نتایج آزمایش‌های بیرون کشیدگی مسلح‌کننده‌های مشابه با جنس یکسان ولی ضخامت‌های مختلف در خاک مشابه [۱۴] نشان‌دهنده افزایش مقاومت بیرون کشیدگی با افزایش ضخامت مسلح‌کننده بوده است که بیانگر تأثیر نفوذ ذرات می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر مستقیم سختی مسلح‌کننده و اندازه‌ی ذرات محیط خاکی بر روی ظرفیت بیرون کششی سیستم خاک مسلح پرداخته شد. آزمایش‌های انجام‌شده با استفاده از دستگاه بیرون کشش انجام شد. جهت کسب اطمینان لازم از صحت نتایج، آزمایش‌ها حداقل ۳ بار تکرار گردیده و میانگین نتایج به‌دست‌آمده به‌عنوان نتیجه‌ی نهایی گزارش گردید. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد علاوه بر مشخصات مکانیکی خاک و پارامترهای مقاومت برشی آن، سختی مسلح‌کننده و نیز اندازه ذرات خاک نیز تأثیر همبسته‌ای در مقاومت برشی فصل مشترک و نیز

- and Building Materials, 266 (2021) 121014.
- [15] E. Heidarli, A. Ouria, Laboratory study of the effect of cement stabilization of the interface of reinforcement and sand on the interface shear strength, *Civil Infrastructure Researches*, (Articles in Press) (2022).
- [16] H. Sadeghpour, A. Fahmi, Laboratory Modeling of a Spread Footing on Sand Reinforced by Strips of Carbon Fiber Reinforcement, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, (2022).
- [17] V. Toufigh, A. Ouria, C.S. Desai, N. Javid, V. Toufigh, H. Saadatmanesh, Interface behavior between carbon-fiber polymer and sand, *Journal of Testing and Evaluation*, 44(1) (2016) 385-390.19.
- [18] T. Yetimoglu, M. Inanir, O.E. Inanir, A study on bearing capacity of randomly distributed fiber-reinforced sand fills overlying soft clay, *Geotextiles and Geomembranes*, 23(2) (2005) 174-183.
- [19] A. Ouria, E. Heidarly, Laboratory Investigation of the Effect of the Geotextile Placement Pattern on the Bearing Capacity of Footing on Reinforced Sand, *Modares Civil Engineering journal*, 21(3) (2021) 21-34.
- [20] A. Ouria, H. Sadeghpour, Laboratory and numerical simulation of the effect of wraparound anchorage of reinforcements on the bearing capacity of spread footing, *Sharif Journal of Civil Engineering*, 37(4.1) (2022) 93-104.
- [21] A. Ouria, E. Heidarli, M. Enshaee, A laboratory study of the effect of wraparound anchorage, increasing reinforcement thickness and nailing in improving the bearing capacity of strip foundation on sandy soil, *Civil Infrastructure Researches*, (Articles in Press) (2022).
- [22] A. Beyranvand, S.H. Lajevardi, M. Ghazavi, S.M. Mirhosseini, Laboratory investigation of pullout behavior of strengthened geogrid with concrete pieces in fine sand, *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(4) (2021) 1-11.
- [23] P. Vangla, G.M. Latha, Influence of particle size on the friction and interfacial shear strength of sands of similar morphology, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 1(1) (2015) 1-12.
- Transportation Geotechnics, 22 (2020) 100297.
- [6] P. Punetha, P. Mohanty, M. Samanta, Microstructural investigation on mechanical behavior of soil-geosynthetic interface in direct shear test, *Geotextiles and Geomembranes*, 45(3) (2017) 197-210.
- [7] A.M. Namjoo, K. Jafari, V. Toufigh, Effect of particle size of sand and surface properties of reinforcement on sand-geosynthetics and sand-carbon fiber polymer interface shear behavior, *Transportation Geotechnics*, 24 (2020) 100403.
- [8] A.M. Namjoo, M. Baniasadi, K. Jafari, S. Salam, M.M. Toufigh, V. Toufigh, Studying effects of interface surface roughness, mean particle size, and particle shape on the shear behavior of sand-coated CFRP interface, *Transportation Geotechnics*, 37 (2022) 100841.
- [9] A. Ouria, E. Heidarli, S. Karamzadegan, Utilization of recycled concrete aggregates as coarse material sandwich to improve the pullout strength of geosynthetics in a fine sand, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 8(5) (2022) 55.
- [10] K. Halder, D. Chakraborty, Effect of interface friction angle between soil and reinforcement on bearing capacity of strip footing placed on reinforced slope, *International Journal of Geomechanics*, 19(5) (2019) 06019008.
- [11] Z. Li, X. Yang, Required strength of geosynthetics in a reinforced slope with tensile strength cut-off subjected to seepage effects, *Geotextiles and Geomembranes*, 47(4) (2019) 542-551.
- [12] A. Ouria, A. Mahmoudi, H. Sadeghpour, Effect of the geotextile arrangement on the bearing capacity of a strip footing, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 6(3) (2020) 1-14.
- [13] A. Ouria, S. Emami, S. Karamzadegan, Laboratory Investigation of the Effect of the Cement Treatment of the Interface and the Thicknesses of Reinforcement on its Pull-out Capacity, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(11) (2021) 2831-2846.
- [14] A. Ouria, S. Karamzadegan, S. Emami, Interface properties of a cement coated geocomposite, *Construction*

- [30] ASTM D2487, Standard classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system), Annual Book of ASTM Standards, 4 (2011) 206-215.
- [31] ASTM D4595, Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method, (2011).
- [32] ASTM D5199, Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics, (2012).
- [33] ASTM D5261, Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextiles, (2010).
- [34] ASTM D6706. Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil, (2013).
- [35] R. Jewell, Reinforcement bond capacity, *Geotechnique*, 40(3) (1990) 513-518.
- [36] J. Esfandiari, M. Selamat, Laboratory investigation on the effect of transverse member on pull out capacity of metal strip reinforcement in sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 35 (2012) 41-49.
- [37] D. Cazzuffi, L. Picarelli, A. Ricciuti, P. Rimoldi, Laboratory investigations on the shear strength of geogrid reinforced soils, in: *Geosynthetic soil reinforcement testing procedures*, ASTM International, 1993.
- [38] F. Ferreira, C.S. Vieira, M. Lopes, Direct shear behaviour of residual soil–geosynthetic interfaces–influence of soil moisture content, soil density and geosynthetic type, *Geosynthetics International*, 22(3) (2015) 257-272.
- [24] Su, Li-Jun, Wan-Huan Zhou, Wei-Bin Chen, and Xixi Jie. “Effects of relative roughness and mean particle size on the shear strength of sand-steel interface.” *Measurement* 122 (2018): 339-346.
- [25] F. Han, E. Ganju, R. Salgado, M. Prezzi, Effects of interface roughness, particle geometry, and gradation on the sand–steel interface friction angle, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(12) (2018) 04018096.
- [26] A.K. Choudhary, A.M. Krishna, Experimental investigation of interface behaviour of different types of granular soil/geosynthetics, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2(1) (2016) 1-11.
- [27] D. Esmaili, K. Hatami, G.A. Miller, Influence of matric suction on geotextile reinforcement-marginal soil interface strength, *Geotextiles and Geomembranes*, 42(2) (2014) 139-153.
- [28] S. Vibha, P. Divya, Performance of geosynthetic reinforced MSE walls with marginal backfills at the onset of rainfall infiltration, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7(1) (2021) 1-16.
- [29] S. Attache, M. Mellas, Numerical study of large-scale pull-out test of horizontal corrugated strips, *International Journal of Geotechnical Engineering*, (2017).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Ouria, E. Heidarli, S. Karamzadegan, *A laboratory study of the influence of reinforcement stiffness and the size of soil particles on soil pull-out strength*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(5) (2023) 929-942.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21922.7853



