

تعیین پارامترهای اندرکنش خاک حاوی دانه‌های ژئوفوم - مسلح‌کننده‌های ژئوسینتتیک

حمید خواجوند جعفری (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مریم یزدی* (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی

مهندسی عمران شریف، بهار (۱۴۰۰)
دوره ۲ - ۳۷، شماره ۱/۲، ص. ۱۳۳-۱۳۴، (پادداست فنی)

با توجه به افزایش استفاده از مسلح‌کننده‌های ژئوسینتتیک در مسلح‌سازی خاک، امروزه بررسی رفتار فصل مشترک خاک - ژئوسینتتیک، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. مطالعه حاضر، با هدف تعیین پارامترهای اندرکنش خاک حاوی دانه‌های ژئوفوم با مسلح‌کننده‌های ژئوسینتتیک با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس انجام شده است. خاک استفاده شده، مخلوط ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه و دانه‌های ژئوفوم با درصد‌های اختلاط ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و درصد وزنی خاک بوده است. مسلح‌کننده‌های استفاده شده در پژوهش حاضر، ژئوگرید، ژئوتکستایل و ژئوکامپوزیت بوده‌اند تا نتایج به دست آمده، قابل تحلیل و مقایسه‌ی بیشتری باشند. براساس نتایج به دست آمده در مخلوط‌های ماسه - ژئوفوم مسلح شده با ژئوسینتتیک، بیشترین ظرفیت باربری و همچنین بالاترین ضریب اندرکنش برای نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید و پس از آن، به ترتیب در نمونه‌های مسلح شده با ژئوکامپوزیت و ژئوتکستایل به دست آمده است.

واژگان کلیدی: ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه، ژئوفوم EPS، مسلح‌کننده‌ی ژئوسینتتیک، آزمایش برش مستقیم، ضریب اندرکنش.

hamid.khajevandjafari@yahoo.com
mar.yazdi@iauctb.ac.ir

۱. مقدمه

امروزه، استفاده از ژئوفوم به‌عنوان یک ماده‌ی بسیار سبک وزن در پروژه‌های ژئوتکنیک افزایش یافته است. مصالح ذکر شده، در کاهش نشست زیر خاکریزها، میرایی صدا و لرزش، کاهش فشار جانبی بر سازه‌های زیرین، کاهش تنش روی خطوط لوله‌ی صلب مدفون و سایر موارد استفاده شده‌اند. ژئوفوم، ماده‌ی با چگالی پایین، مقاومت خمشی و مقاومت گسیختگی بالا در برش است که به دو صورت متفاوت، یعنی بلوک‌ها و دانه‌های EPS مخلوط شده با خاک و چسباننده، استفاده می‌شود.^[۱] از طرفی، به‌کارگیری مسلح‌کننده‌ها باعث افزایش نیروی مقاوم^۱ در توده‌ی خاک، به دلیل فراهم شدن نیروی کششی ناشی از مسلح‌کننده می‌شود و در نتیجه، تغییر شکل‌های افقی خاک کاهش و پایداری کلی سازه‌ی خاک مسلح افزایش می‌یابد.^[۲] در این میان، مکانیزم اندرکنش خاک - مسلح‌کننده، نقش مهمی ایفا می‌کند. در مطالعه‌ی سیستم‌های خاک مسلح با استفاده از آزمایش برش مستقیم، دو عامل یا مکانیزم اندرکنش شناسایی شده است که عبارت‌اند از:^[۳]

۱. اصطکاک جانبی در امتداد طول مسلح‌کننده،

۲. اصطکاک بین دانه‌ی.

«اصطکاک جانبی»، اشاره به اصطکاک در سطح تماس خاک و ژئوسینتتیک

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱۱/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۹/۶/۲، پذیرش ۱۳۹۹/۷/۵.

DOI:10.24200/J30.2020.54696.2682

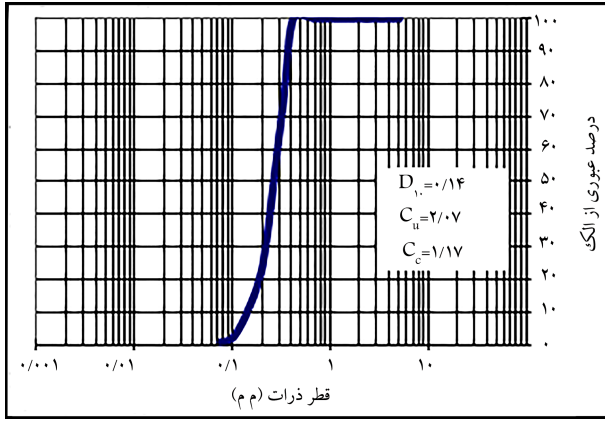
دارد که فقط بین خاک و هر نوع ژئوسینتتیک (ژئوتکستایل، ژئوگرید و ...) ایجاد می‌شود. در اصطکاک جانبی، هم اعضاء طولی و هم اعضاء متقاطع عرضی، در مقاومت برشی ژئوگرید سهیم هستند. اصطکاک خاک با خاک، اشاره به مقاومت برشی خاک با خاک دارد که در حین انجام آزمایش برش مستقیم اتفاق می‌افتد.^[۴] برخی از پژوهشگران، در مطالعات خود به بررسی رفتار اندرکنش خاک - ژئوسینتتیک پرداخته‌اند.

لیو^۵ و همکاران (۲۰۰۹) در بررسی رفتار اندرکنش ماسه - ژئوگرید در مود برش مستقیم از طریق آزمون‌های برش مستقیم بر روی ماسه‌ی اتاوا و چندین ژئوگرید پلی‌استر، با مقاومت کششی و درصد مساحت بازشوی مختلف دریافت‌اند که مقاومت برشی سطح مشترک ماسه - ژئوگرید، تحت مود برش مستقیم، به‌طور قابل توجهی بالاتر از مقاومت برشی سطح مشترک ماسه - ژئوتکستایل است.^[۱] عبدی و همکاران (۲۰۱۰)،^[۲] نیز برای بررسی تأثیر مقدار مقاومت کششی ژئوگرید در اندرکنش خاک (رس و ماسه - ژئوگرید)، آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس برای ارزیابی پارامترهای مقاومت برشی سطح تماس خاک - ژئوگرید انجام داده و جهت بررسی تأثیر مقدار مقاومت کششی ژئوگرید در مقاومت برشی سطح تماس، از ۳ نوع ژئوگرید با مقاومت‌های کششی متفاوت در آزمایش‌ها استفاده کرده‌اند. نتایج به دست آمده نشان داده است که بسیج شدن کامل مقاومت مسلح‌کننده بستگی به مقدار فشار قائم دارد. در فشار قائم پایین، هر چه مقدار مقاومت کششی ژئوگرید افزایش یابد، مقدار مقاومت سطح تماس نیز کاهش می‌یابد. در فشار قائم

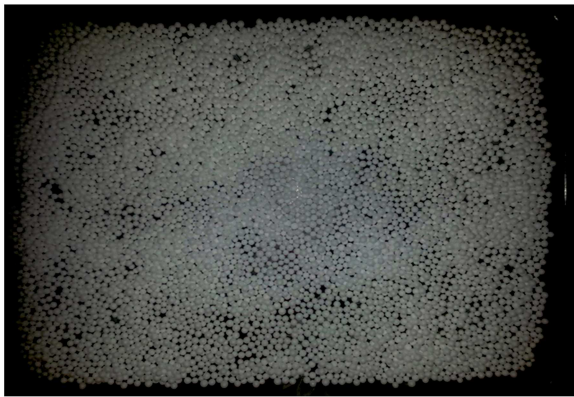
متوسط، تقریباً مقدار مقاومت کششی ژئوگرید، تأثیر چندانی در مقدار مقاومت سطح تماس، چه در مقدار بیشینه و چه در مقاومت پایدار ندارد. در فشار قائم بالا، با افزایش مقدار مقاومت کششی ژئوگرید و به تبع آن، مقدار مقاومت سطح تماس نیز افزایش می‌یابد و این اختلاف، هم در مقدار مقاومت بیشینه و هم در مقدار مقاومت نهایی مشاهده می‌شود. تانچاسوات^۲ و همکاران (۲۰۱۰)، در بررسی اندرکنش بین ژئوگرید و مخلوط خردی لاستیک - ماسه، آزمایش‌های متعددی از جمله آزمون‌های بیرون‌کشش و آزمون‌های برش مستقیم بزرگ‌مقیاس برای دستیابی به اهداف مذکور انجام داده‌اند. ژئوگریدهای Saint-Gobain (ژئوگرید A) و Polyfelt (ژئوگرید B)، به‌عنوان مصالح مسلح‌کننده انتخاب شده و مخلوط‌های خردی لاستیک - ماسه، در نسبت‌های اختلاط ۱۰۰:۰؛ ۷۰:۳۰؛ ۶۰:۴۰ و ۵۰:۵۰ درصد وزنی، به‌عنوان مصالح خاکریز استفاده شده‌اند. در نهایت، ژئوگرید B، به‌عنوان مسلح‌کننده و مخلوط خردی لاستیک - ماسه، در نسبت اختلاط ۷۰:۳۰ درصد وزنی، به‌عنوان مصالح خاکریز توصیه شده‌اند.^[۵] همچنین در مطالعه‌ی انجام شده‌ی تونا^۴ و آلتون^۵ (۲۰۱۲)، رفتار مکانیکی سطح مشترک ماسه (با طبقه‌بندی SP و SW) و ۳ گروه ژئوتکستایل، با آزمایش برش مستقیم بررسی شده است. در نهایت، چنین نتیجه‌گیری شده است که رفتار بین وجهی و به آثار ترکیبی ویژگی‌های سطح و تغییرشکل پذیری ژئوتکستایل‌ها و همچنین ویژگی‌های شاخص خاک وابسته است. ویژگی‌های بافت ژئوتکستایل، آثار قابل توجهی در مقاومت برشی و زاویه‌ی اصطکاک بین‌وجهی داشته‌اند. به‌طور مثال، ژئوتکستایل‌های نبافته، تغییرشکل افقی بالا در شکست و افت کمینه‌ی مقاومت پس از مقدار اوج را نشان داده‌اند. همچنین مشخص شده است که مقدار چسبندگی، تحت تأثیر مستقیم اندازه‌ی نمونه است.^[۶] عیدی و اتفاق (۲۰۱۴) نیز در بررسی تأثیر اندازه‌ی ذرات خاک و ابعاد چشمه‌های ژئوگرید در اندرکنش خاک - ژئوگرید، با کاربرد ۳ نوع خاک درشت‌دانه و ۴ نوع ژئوگرید با جنس یکسان و ابعاد چشمه‌های مختلف با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس دریافتند که برای هر خاک با دانه‌بندی مشخص، یک چشمه با اندازه‌ی بهینه وجود دارد. به‌طور کلی، با بزرگ‌تر شدن اندازه‌ی متوسط ذرات، ابعاد ژئوگرید بهینه نیز افزایش یافته است. براساس نتایج به‌دست آمده، ژئوگریدی که در خاک، بیشترین مقاومت برشی را ایجاد کرده است، بالاترین مقدار زاویه‌ی اندرکنش خاک - ژئوگرید و بیشترین ضریب اتصال را به خود اختصاص داده است.^[۷] دین^۶ و همکاران هم در یک بررسی آزمایشگاهی در سال ۲۰۱۶، اثر تسلیح با ژئوتکستایل را در مقاومت برشی خاک ماسه‌یی مطالعه کرده و یک سری از آزمون‌های فشاری یکنواخت زهکشی‌نشده بر روی ماسه‌ی سست مسلح‌شده با ژئوتکستایل را عمدتاً برای مطالعه‌ی اثر تنش محصورشدگی در رفتار مکانیکی ماسه‌ی مسلح‌شده با ژئوتکستایل انجام داده‌اند. آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های بازسازی‌شده از ماسه‌ی طبیعی خشک، تهیه‌شده در چگالی نسبی ۳۰٪ و بدون لایه‌های ژئوتکستایل و تحکیم‌یافته برای سه سطح از فشارهای محصورکنندگی ۵۰ kPa، ۱۰۰ kPa و ۲۰۰ kPa انجام شده‌اند. لایه‌های مسلح‌کننده در تعداد و چیدمان‌های متفاوتی در ارتفاع‌های مختلف از نمونه (صفر، ۱ و ۲ لایه) قرار داده شده‌اند. رفتار نمونه‌ها تحت آزمون ارائه و بحث شده است. براساس نتایج حاصل، وجود ژئوتکستایل موجب بهبود رفتار مکانیکی ماسه شده و افزایش قابل توجه مقاومت برشی و مقدار چسبندگی با افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده صورت پذیرفته است. همچنین، نتایج نشان داده‌اند که نسبت مقاومت برای نمونه‌هایی که در معرض مقدار کم فشار محصورکنندگی قرار داشته‌اند، قابل توجه‌تر است و مقدار بالای فشار محصورکنندگی می‌تواند اتساع برشی ماسه را محدود کند و اثر بیشتری در بازده مسلح‌کننده دارد.^[۸]

عیدی و همکاران (۲۰۱۷) نیز اثر ژئوتکستایل را در افزایش مقاومت برشی و ظرفیت باربری خاک رس کائولینیت مسلح شده با ژئوگرید، با استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری (UU) بزرگ‌مقیاس و CBR بررسی کرده‌اند. آزمایش‌های مذکور، بر روی نمونه‌های فاقد مسلح‌کننده، نمونه‌های مسلح‌شده با لایه‌های ژئوگرید و نمونه‌های مسلح‌شده با لایه‌های ژئوکامپوزیت انجام شده‌اند. نتایج مطالعات و آزمایش‌ها نشان داده‌اند که وجود لایه‌های ژئوتکستایل در اطراف ژئوگرید در تسلیح خاک رس، به نحو مؤثری موجب بهبود اندرکنش سطح تماس و بسیج شدن تنش‌ها بر روی ژئوگرید می‌شود و نه فقط باعث ارتقاء پارامترهای مقاومت برشی می‌شود، بلکه سبب افزایش ظرفیت باربری نیز می‌شود.^[۹] همچنین علایی و جمشیدی چناری (۲۰۱۸)، رفتار برشی سیکلیک و پس‌سیکلیک سطح مشترک بین ژئوگرید و خاکریز دانه‌های EPS - ماسه را با استفاده از دستگاه آزمون برش مستقیم سیکلیک بزرگ‌مقیاس بررسی کرده‌اند. دانه‌های EPS در مقادیر وزنی ۰، ۵/۱، ۱ و ۲ درصد به ماسه اضافه و آزمون‌ها تحت ۳ فشار قائم مختلف ۳۰ kPa، ۶۰ kPa و ۹۰ kPa انجام شده‌اند. با توجه به نتایج به‌دست آمده مشخص شده است که چسبندگی ظاهری سطح مشترک و زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک، با مقدار EPS به ترتیب افزایش و کاهش یافته‌اند.^[۱۰]

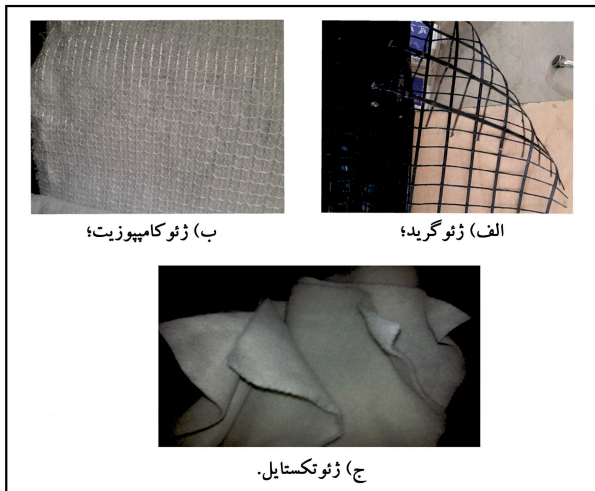
محبوبی مطلق و محبوبی اردکانی (۲۰۱۸)، هم تأثیر افزودن آهک در پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک رس - ژئوسینتیک را بررسی کرده‌اند. در این راستا، خاک‌های رسی با درصد‌های مختلف آهک (۰، ۲، ۴ و ۶) تثبیت و با ژئوسینتیک (ژئوتکستایل و ژئوگرید) مسلح شده و پس از ۱ و ۷ روز عمل‌آوری، تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داده‌اند که تثبیت با آهک، مقاومت برشی نمونه‌ها را افزایش می‌دهد و با افزایش زمان عمل‌آوری، میزان مقاومت برشی افزوده می‌شود. مقاومت برشی نمونه‌های مسلح شده، در مقایسه با نمونه‌های غیرمسلح بیشتر بوده و در یک تنش قائم یکسان، مقاومت نمونه‌های رس - ژئوگرید نیز بیشتر از مقاومت نمونه‌های رس - ژئوتکستایل بوده است.^[۱۱] در پژوهش عیدی و عسگرودن (۲۰۱۹)، نیز تأثیر لایه‌ی درشت‌دانه‌ی تثبیت نشده، تثبیت شده و تسلیح شده با ژئوسینتیک‌ها در کاهش پتانسیل نشست و افزایش ظرفیت باربری رس نرم بررسی شده است. بدین منظور، از ماسه به‌عنوان لایه‌ی درشت‌دانه، از سیمان به‌عنوان تثبیت‌کننده و از ژئوگرید و ژئوتکستایل با موقعیت‌های قرارگیری مختلف به‌عنوان عوامل تسلیح لایه‌ی درشت‌دانه‌ی سطحی استفاده شده است. آزمایش‌ها با استفاده از سیستم بارگذاری CBR، تحت بار استاتیکی انجام شده‌اند. لایه‌ی ماسه با ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد سیمان تثبیت شده و محل قرارگیری ژئوسینتیک‌ها، در وسط لایه‌ی ماسه و مرز دو لایه‌ی رس و ماسه بوده است. نتایج نشان داده است که به‌کارگیری لایه‌ی ماسه‌یی به‌صورت تثبیت نشده و تثبیت شده، موجب افزایش ظرفیت باربری بستر رسی نرم شده و با افزایش درصد سیمان، ظرفیت باربری خاک افزایش چشمگیری یافته است. با تسلیح ماسه با ژئوسینتیک‌ها، ظرفیت باربری بستر رسی افزایش و پتانسیل نشست آن کاهش یافته است. برخلاف نمونه‌های تثبیت شده، در نمونه‌های مسلح به دلیل مقاومت کششی ژئوگرید و ژئوتکستایل، ظرفیت باربری پس از رسیدن به مقدار بیشینه، کاهش نیافته و روند افزایش با شیب ملایم‌تری ادامه یافته است.^[۱۲] با بررسی ادبیات موضوعی به‌نظر می‌رسد که به رفتار اندرکنش خاک حاوی دانه‌های ژئوفوم - ژئوسینتیک، چندان توجه نشده است. لذا در پژوهش حاضر، به بررسی پارامترهای اندرکنش مخلوط خاک و ژئوفوم - ژئوسینتیک، با استفاده از سه نوع مسلح‌کننده‌ی ژئوسینتیکی ژئوگرید، ژئوتکستایل، و ژئوکامپوزیت و با به‌کارگیری دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس پرداخته شده است.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک ماسه‌ای استفاده شده در پژوهش حاضر.



شکل ۲. دانه‌های ژئوفوم پلی استایرن^۸ استفاده شده در پژوهش حاضر.



شکل ۳. انواع مسلح کننده‌های مورد استفاده در آزمایشات.

۳. دستگاه استفاده شده

در پژوهش حاضر، برای انجام آزمایش‌ها، از دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس با ابعاد جعبه‌ای ۱۵۲ × ۳۰۴ × ۳۰۴ (میلی‌متر) استفاده شده است. دلیل انتخاب دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس، بازسازی نمونه‌ها و انطباق بیشتر با شرایط واقعی بوده است. آزمایش‌ها براساس استاندارد ASTM-D5321^[۱۵،۱۴] «روش

۲. مواد و مصالح استفاده شده

۱.۲. مصالح خاکی

در پژوهش حاضر، از خاک ماسه‌ای ۱۶۱ فیروزکوه به‌عنوان خاک شاهد استفاده شده است که براساس نتایج آزمایش دانه‌بندی و منحنی حاصل، خاک مذکور از طبقه‌ی (SP) ماسه‌ی بدانه‌بندی شده، مطابق سیستم طبقه‌بندی متحد بوده است. لازم به ذکر است دانه‌بندی خاک ذکر شده، مشابه دانه‌بندی ماسه‌ی توپورا^۷ ژاپن است و به‌عنوان یک خاک استاندارد در تحقیقات ژئوتکنیکی استفاده می‌شود. همچنین، به دلیل اینکه خاک ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه، ماسه‌ی بدانه‌بندی شده است و قطر دانه‌های آن در یک محدوده قرار می‌گیرد، اضافه‌کردن موادی نظیر دانه‌های ژئوفوم موجب قرارگیری این دانه‌ها در خلل و فرج ماسه‌ی مذکور شده و فضاهای خالی را پر می‌کند و بنابراین، تأثیر اختلاط دانه‌های ژئوفوم با آن بیشتر مشهود است. منحنی دانه‌بندی خاک ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه، در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

۲.۲. ژئوفوم پلی استایرن^۸

ژئوفوم پلی‌استایرن استفاده شده در پژوهش حاضر، جهت اختلاط با خاک، ریزدانه بوده و از الک نمره‌ی ۱۰ عبور کرده است. همچنین، وزن مخصوص آن، ۰/۰۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده و با نسبت‌های وزنی ۰/۲، ۰/۴، و ۰/۶ درصد با خاک مخلوط شده است. لازم به ذکر است درصدهای مذکور براساس پژوهش دیگری در این زمینه^[۱۳] که جهت رسیدن به درصد بهینه‌ی اختلاط (کاهش وزن مخصوص خاک به همراه بیشترین افزایش چسبندگی خاک و کمترین میزان کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی) انجام شده است، انتخاب شده‌اند. تصویر دانه‌های ژئوفوم استفاده شده، در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

۳.۲. مسلح کننده‌های ژئوسینتتیک

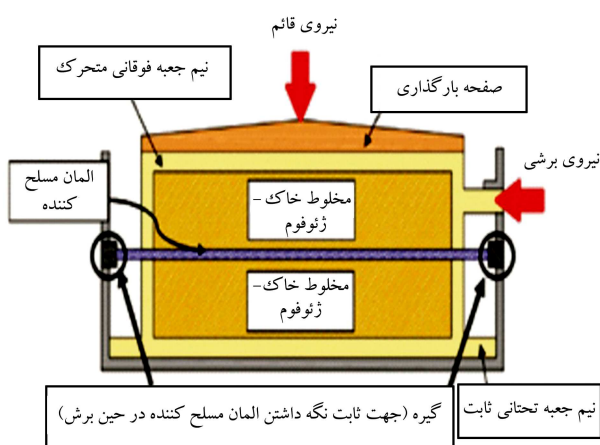
مصالح ژئوسینتتیک استفاده شده در پژوهش حاضر، شامل ژئوگرید، ژئوکامپوزیت، و ژئوتکتایل (شکل ۳) است که ژئوگرید و ژئوکامپوزیت (شکل ۳ الف و ب)، از شرکت ژئوپارسیان در استان مازندران تهیه شده‌اند. ژئوتکتایل استفاده شده (شکل ۳ ج)، از نوع نفاخته‌ی ۲۰۰ گرمی با الیاف پلی‌استر است که از شرکت منسوجات سپید صنعت، در استان مازندران تهیه شده است. مشخصات مصالح ژئوسینتتیک برای ۳ نوع ژئوسینتتیک استفاده شده، در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های ژئوگرید و ژئوکامپوزیت استفاده شده در پژوهش حاضر.

ویژگی	ژئوگرید	ژئوکامپوزیت
مقاومت کششی (kN/m)	۲۰	۲۰
تطویل در مقاومت (%)	۱۲	۱۲
عرض حلقه (mm)	۵۰۲۵	۵۰۲۵
طول حلقه (mm)	۱۰۰	۱۰۰
اندازه‌ی شبکه (mm)	۳۵ × ۲۵	-

جدول ۲. ویژگی‌های ژئوتکستایل استفاده شده در پژوهش حاضر.

مشخصات	حجم در واحد سطح (gr/m^2)	ضخامت (mm)	بیشینه‌ی کشش (%)	مقاومت سوراخ‌شدگی (kN/m)	شاخص فشردن مقاومت (N)
مقدار	۲۰۰	۲/۶	۵۰	۱/۵	۳۷۰

شکل ۴. نحوه‌ی قرارگیری نمونه‌های مسلح شده در دستگاه برش مستقیم.^[۱۰]

شکل ۵. دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس استفاده شده در پژوهش حاضر.

در هر آزمایش کرده است که در انجام آزمایش‌ها نیز رعایت شده است. پس از انجام آزمایش‌های پایه‌ی مکانیک خاک، شامل آزمایش‌های: دانه‌بندی، تعیین چگالی ویژه ذرات جامد خاک و تعیین درصد رطوبت بر روی خاک ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه، آزمایش تراکم بر روی خاک ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه و مخلوط خاک با درصد‌های مختلف ژئوفوم انجام شده است. جهت آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمایش برش مستقیم، ابتدا خاک ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه، با درصد‌های مختلف ژئوفوم در درصد رطوبت بهینه‌ی تعیین شده توسط آزمایش تراکم برای هر طرح اختلاط به خوبی مخلوط شده است. در شکل ۶، نمونه‌ی از مخلوط آماده شده جهت انجام آزمایش تراکم و تصویری از نحوه‌ی انجام آزمایش تراکم مشاهده می‌شود.

پس از آن، برای انجام مطالعات آزمایشگاهی و به منظور ارزیابی اثر مسلح‌کننده‌های ژئوسینتتیک در پارامترهای مقاومت برشی و ظرفیت باربری، همچنین رفتار اندرکنش خاک ماسه‌ی حاوی ژئوفوم، نمونه‌هایی با اختلاط ماسه و درصد‌های مختلف ژئوفوم و تسلیح با ۳ نوع ژئوسینتتیک مختلف آماده شده و در دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس تحت آزمایش قرار گرفته‌اند و منحنی‌های تغییرات تنش برشی - جابه‌جایی افقی و

آزمایش استاندارد برای تعیین ضریب اصطکاک خاک و ژئوسینتتیک، یا ژئوسینتتیک و ژئوسینتتیک، با استفاده از آزمایش برش مستقیم» انجام شده است. روش آزمون مندرج در استاندارد ASTM D5321، مطابق این مراحل است:

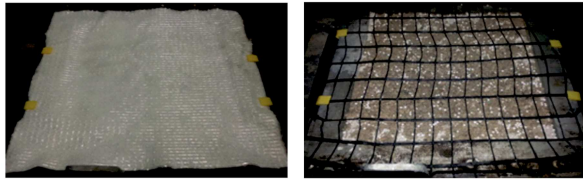
۱. مقاومت برشی بین ژئوسینتتیک و خاک، یا هر ماده‌ی دیگری که توسط کاربر انتخاب شده باشد، با قرار دادن ژئوسینتتیک و یک یا چند سطح تماس، مانند خاک، در جعبه‌ی برش مستقیم تعیین می‌شود. نیروی قائم ثابت، به نمایندگی از تنش‌های طراحی به نمونه اعمال می‌شود و یک نیروی برشی (مماسی)، به گونه‌ی به دستگاه اعمال می‌شود که بخشی از جعبه نسبت به بخش دیگر جابه‌جا شود. نیروی برشی، به عنوان تابعی از تغییرمکان افقی بخش متحرک جعبه‌ی برش ثبت می‌شود.

۲. به منظور مدل‌کردن مناسب شرایط کارگاهی، آزمایش باید در دست‌کم ۳ تنش قائم مختلف، که توسط کاربر انتخاب شده است، انجام شود. مقادیر حدهای تنش‌های برشی، در مقابل تنش‌های فشاری قائم اعمال شده ترسیم می‌شوند. معمولاً، داده‌های آزمایش توسط خط مستقیمی با بهترین برازش نمایش داده می‌شوند که شیب آن نشان‌دهنده‌ی ضریب اصطکاک بین دو ماده است. عرض از مبدأ خط مذکور، بیانگر چسبندگی است. ضریب اصطکاک خاک و ژئوسینتتیک، تابعی از تنش قائم اعمال شده، مشخصات ژئوسینتتیک، دانه‌بندی خاک، حالت خمیری خاک، چگالی، میزان رطوبت، اندازه‌ی نمونه، شرایط زهکشی، نرخ تغییرمکان، مقدار تغییرمکان و ... است.

۳. روش ذکر شده‌ی آزمون، مقاومت کل در برابر برش بین ژئوسینتتیک و یک نوع مصالح تکیه‌گاهی (لایه‌ی زیرین)، یا یک ژئوسینتتیک و قشر رویه را اندازه‌گیری می‌کند. مقاومت لغزش کل می‌تواند ترکیبی از لغزش، پیچش، قفل و بست ذرات خاک و سطوح ژئوسینتتیک و کرنش برشی در نمونه‌ی ژئوسینتتیک باشد. ممکن است مقاومت برشی بر روی دو وجه ژئوسینتتیک متفاوت باشد و ممکن است با جهت برش نسبت به جهت‌گیری ژئوسینتتیک تغییر کند. نحوه‌ی قرارگیری نمونه‌های مسلح و دستگاه استفاده شده، به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود.

۴. روش انجام آزمایش

در پژوهش حاضر، انجام آزمایش‌ها با استفاده از روش UU (تحکیم نیافته - زهکشی نشده)، تحت فشارهای قائم ۷۵kPa، ۱۵۰kPa و ۲۲۵kPa و با سرعت بارگذاری افقی (سرعت گسیختگی) یک میلی‌متر بر دقیقه، مطابق مندرجات استاندارد صورت گرفته است. از آنجایی که برای مصالح ماسه‌ی، روش‌های کند و سریع، از لحاظ مشخصات فشار آب حفره‌ی تفاوت چندانی ندارند، لذا در پژوهش حاضر، از روش UU (روش سریع) استفاده شده است. همچنین با توجه به مرطوب بودن خاک، استاندارد ASTM-D5321 توصیه به انجام سریع آزمایش اخیر کرده است، که رطوبت خاک باعث مرطوب شدن مسلح‌کننده نشود. همچنین استاندارد ASTM-D5321 توصیه به تعویض مسلح‌کننده و استفاده از مسلح‌کننده‌ی جدید



الف) ژئوگرید؛ ب) ژئوکامپوزیت؛



ج) ژئوتکتایل.

شکل ۸. پُر کردن نیمه‌ی پایینی جعبه‌ی برش با مخلوط خاک و ژئوفوم و قرار دادن و محکم نمودن آن به لبه‌ی جعبه‌ی پایین با گیره.

مرحله‌ی بعد، نیمه‌ی پایینی جعبه‌ی برش در ۳ لایه پُر و تا رسیدن به وزن مخصوص خشک بیشینه متراکم شده است. پس از نصب ژئوسیتتیک مرتبط (شکل ۸) در مرز مشترک نیمه‌ی پایینی و بالایی جعبه‌ی برش، و محکم کردن آن به لبه‌های نیمه‌ی پایینی جعبه‌ی برش، نیمه‌ی بالایی جعبه‌ی برش مستقر شده و مشابه بخش پایین، از مخلوط خاک و ژئوفوم با رطوبت بهینه در ۳ لایه، پُر و متراکم شده است. با استقرار صفحه‌ی بارگذاری بر روی نمونه و اعمال تنش قائم مورد نظر (۷۵kPa)، شده است. با توجه به وجود ضریب اصطکاک، کرنش گسیختگی مطابق استاندارد ASTM-D۵۳۲۱، تا ۲۵ الی ۳۰ درصد بعد نمونه (ابعاد جعبه) ادامه یافته است. در نام‌گذاری نمونه‌ها، از علائم SP، EPS، GG، GT و GC به ترتیب، برای اشاره به ماسه، ژئوفوم پلی‌استایرن، ژئوگرید، ژئوتکتایل و ژئوکامپوزیت استفاده و درصد‌های اختلاط ژئوفوم در کنار EPS درج شده است.

۵. بحث و بررسی نتایج

۵.۱. بررسی رفتار تنش برشی - جابه‌جایی افقی

به منظور بررسی تأثیر نوع مسلح‌کننده‌ی ژئوسیتتیک در رفتار تنش - کرنش مخلوط ماسه و درصد‌های مختلف ژئوفوم، تغییرات تنش برشی - جابه‌جایی افقی برای ماسه‌ی خالص و مخلوط‌های خاک و ژئوفوم مسلح شده با ۳ نوع ژئوسیتتیک در تنش قائم یکسان بررسی شده است. در شکل ۹، تغییرات تنش برشی - جابه‌جایی افقی برای نمونه‌های ماسه‌ی خالص، مخلوط ماسه و ۲٪ ژئوفوم؛ مخلوط ماسه و ۴٪ ژئوفوم و همچنین مخلوط ماسه و ۶٪ ژئوفوم در تنش قائم ۷۵kPa مشاهده می‌شود. برای دو تنش قائم دیگر نیز روند تغییرات مشابه بوده است.

با نگاهی به شکل ۹ مشاهده می‌شود که در تنش قائم یکسان، در تمام مخلوط‌های خاک و ژئوفوم مسلح شده با ژئوسیتتیک، بیشترین افزایش تنش برشی نسبت به مخلوط ماسه و ژئوفوم، در مخلوط‌های خاک و ژئوفوم مسلح شده با ژئوگرید و پس از آن به ترتیب در مخلوط‌های خاک و ژئوفوم مسلح شده با ژئوکامپوزیت و مخلوط‌های خاک و ژئوفوم مسلح شده با ژئوتکتایل به دست آمده است. در تنش قائم بالاتر، اندرکنش خاک و ژئوسیتتیک و قفل و بست ذرات در یکدیگر و فشرده‌گی مخلوط خاک و ژئوفوم افزایش یافته و در نتیجه، افزایش تنش برشی نیز

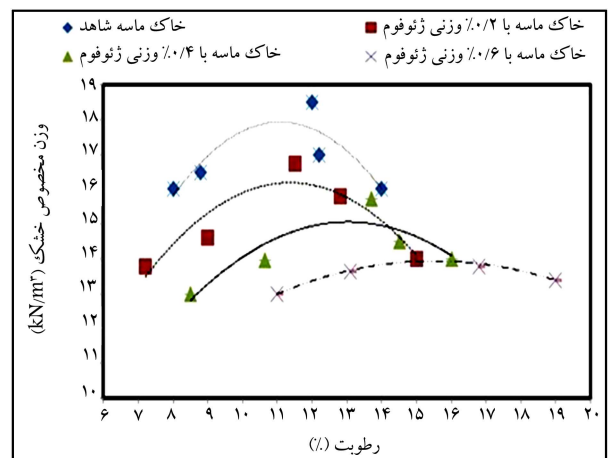


الف) نمونه‌ی بی از مخلوط خاک و ژئوفوم جهت انجام آزمایش تراکم؛



ب) انجام آزمایش تراکم نمونه‌ها برای تعیین درصد رطوبت بهینه.

شکل ۶. نحوه اختلاط خاک و آزمایش تراکم نمونه‌ها.



شکل ۷. منحنی تراکم ماسه‌ی شاهد و ماسه با افزودن درصد‌های مختلف ژئوفوم.

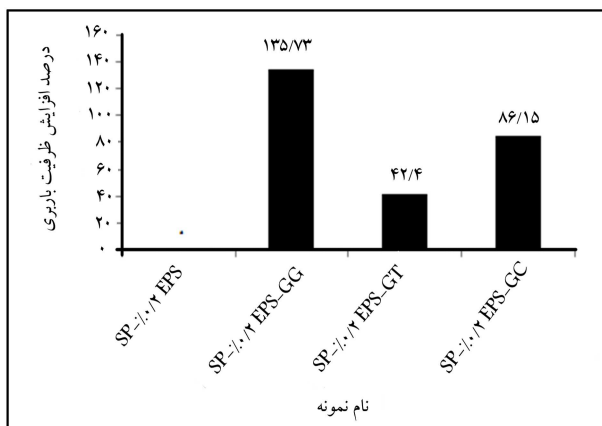
جدول ۳. نتایج حاصل از آزمایش تراکم انجام شده بر روی نمونه‌های خاک.

نمونه‌ی خاک	وزن مخصوص خشک بیشینه (kN/m^3 , $Y_{d\max}$)	رطوبت بهینه ($\%$, ω_{opt})
SP	۱۷٫۷۴	۱۱٫۴
SP - ۰٫۲٪EPS	۱۶٫۳۳	۱۲٫۲
SP - ۰٫۴٪EPS	۱۵٫۲۲	۱۳٫۷
SP - ۰٫۶٪EPS	۱۳٫۹۶	۱۵٫۴

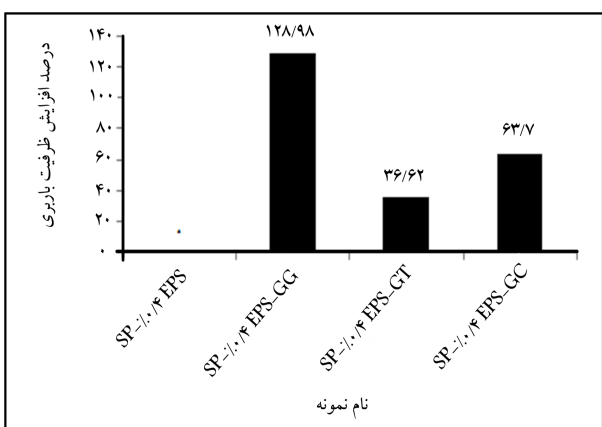
تغییرات تنش برشی - تنش عمودی ترسیم شده‌اند. نتایج آزمایش‌های تراکم برای سه میزان درصد اختلاط ۲٪، ۴٪ و ۶٪ ژئوفوم، در شکل ۷ و جدول ۳ نشان داده شده است.

با توجه به نتایج آزمایش تراکم در شکل ۷ و جدول ۳، می‌توان مشاهده کرد که افزودن ژئوفوم باعث کاهش وزن مخصوص خشک خاک شده است؛ که این امر به کاهش نیروی محرک در پشت سازه‌های حائل کمک محسوسی می‌کند. لازم به ذکر است بررسی تأثیر افزودن درصد‌های مختلف ژئوفوم به خاک و تعیین پارامترهای مقاومتی مخلوط خاک و ژئوفوم و تعیین درصد اختلاط بهینه‌ی ژئوفوم با خاک در مطالعات پیشین مطالعه شده است.

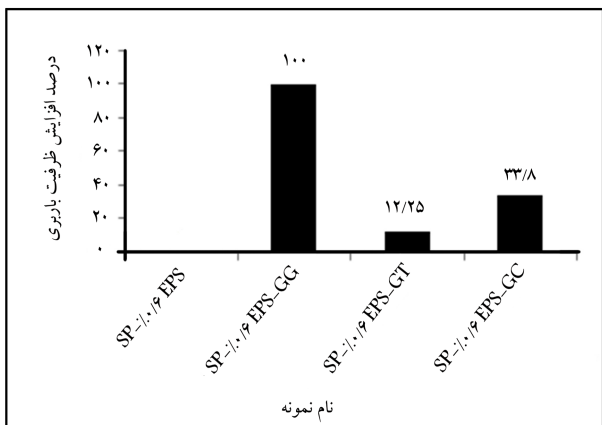
پس از اختلاط خاک و درصد‌های مختلف ژئوفوم با میزان رطوبت بهینه، در



شکل ۱۰. میزان افزایش ظرفیت باربری مخلوط‌های ماسه - ژئوفوم مسلح حاوی ۰/۲٪ وزنی ژئوفوم نسبت به مخلوط‌های ماسه - ژئوفوم غیرمسلح.

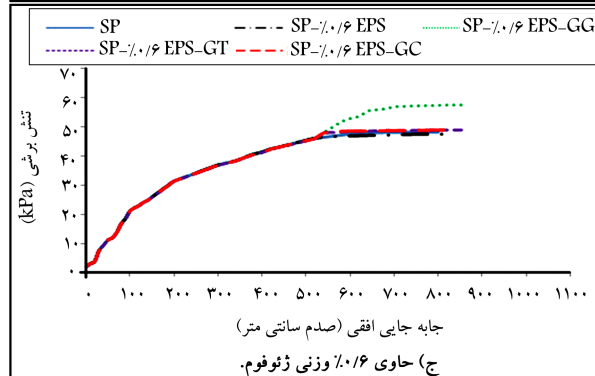
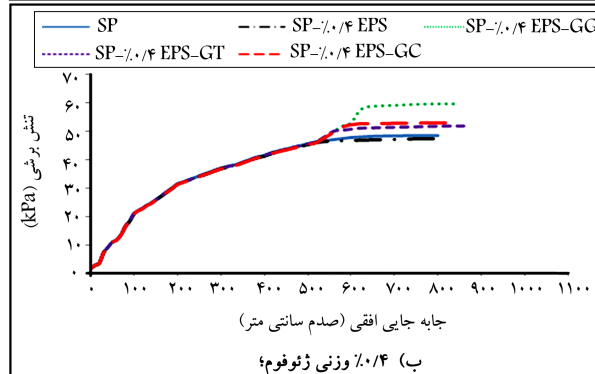
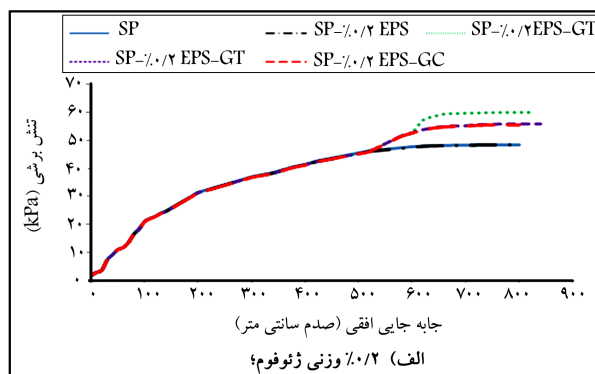


شکل ۱۱. میزان افزایش ظرفیت باربری مخلوط‌های ماسه - ژئوفوم مسلح حاوی ۰/۴٪ وزنی ژئوفوم نسبت به مخلوط‌های ماسه - ژئوفوم غیرمسلح.



شکل ۱۲. میزان افزایش ظرفیت باربری مخلوط‌های ماسه - ژئوفوم مسلح حاوی ۰/۶٪ وزنی ژئوفوم نسبت به مخلوط‌های ماسه - ژئوفوم غیرمسلح.

رتیب در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ مشاهده می‌شوند که مطابق آن‌ها می‌توان نتیجه گرفت در هر ۳ مورد، بیشترین افزایش ظرفیت باربری نسبت به نمونه‌های ماسه - ژئوفوم غیرمسلح، به ترتیب: در تسلیج با ژئوگرید، ژئوکامپوزیت و ژئوتکستایل به دست آمده است. استفاده از مسلح‌کننده‌ها در خاک باعث افزایش مقاومت توده‌ی



شکل ۹. تغییرات تنش برشی (۳) جابه‌جایی افقی، برای نمونه‌های ساخته شده با ماسه‌ی خالص و مخلوط‌های خاک مسلح شده با ژئوسینتتیک‌ها در تنش قائم ۷۵kPa.

بیشتر شده است. همچنین، با افزایش درصد اختلاط ژئوفوم در مخلوط‌های مسلح شده با ژئوسینتتیک، مقادیر تنش برشی کاهش یافته است که دلیل آن افزایش میرایی حاصل از افزودن دانه‌های ژئوفوم و جذب آب توسط دانه‌های ژئوفوم است که در درصد‌های بالاتر ژئوفوم، نقش بیشتری ایفا می‌کند.

۲.۵. بررسی تغییرات ظرفیت باربری

در پژوهش حاضر، ظرفیت باربری از فرمول هانسن، مطابق مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان (پی و پی‌سازی)^[۱۶] محاسبه و مقادیر به دست آمده برای ظرفیت باربری در جدول ۴ ارائه شده است که در آن به مقادیر پارامترهای مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) خاک‌ها نیز اشاره شده است. میزان افزایش ظرفیت باربری مخلوط‌های ماسه - ژئوفوم مسلح، حاوی ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ درصد وزنی ژئوفوم، نسبت به نمونه‌های ماسه - ژئوفوم غیرمسلح، به

جدول ۴. مقادیر ظرفیت باربری مخلوط‌های ماسه - ژئوفوم غیرمسلح و مخلوط‌های ماسه - ژئوفوم مسلح شده با ژئوسینتتیک.

نام نمونه	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	ظرفیت باربری نهایی (kPa)
SP - ۰٪ EPS	۰	۳۳	۴۰۸
SP - ۰٫۲٪ EPS	۲٫۸	۳۱	۳۶۱
SP - ۰٫۴٪ EPS	۴٫۹	۲۹	۳۱۴
SP - ۰٫۶٪ EPS	۶٫۷	۲۸	۳۰۲
SP - ۰٫۲٪ EPS - GG	۳٫۲	۳۷	۸۵۱
SP - ۰٫۲٪ EPS - GT	۴٫۶	۳۳	۵۱۴
SP - ۰٫۲٪ EPS - GC	۳٫۸	۳۵	۶۷۲
SP - ۰٫۴٪ EPS - GG	۵٫۴	۳۵	۷۱۹
SP - ۰٫۴٪ EPS - GT	۷٫۱	۳۰	۴۲۹
SP - ۰٫۴٪ EPS - GC	۶٫۱	۳۲	۵۱۴
SP - ۰٫۶٪ EPS - GG	۷٫۲	۳۳	۶۰۴
SP - ۰٫۶٪ EPS - GT	۹٫۲	۲۷	۳۳۹
SP - ۰٫۶٪ EPS - GC	۸٫۴	۲۹	۴۰۴

برابر ۱۲۹، ۶۳ و ۳۶ درصد بوده است. همچنین در حالت افزودن ۰٫۶٪ وزنی ژئوفوم، افزایش ظرفیت باربری به ترتیب برابر ۱۰۰، ۳۴ و ۱۲ درصد بوده است. با توجه به نتایج به دست آمده از میان مسلح‌کننده‌های مورد بحث، بیشترین افزایش ظرفیت باربری مربوط به ژئوگرید و پس از آن به ترتیب مربوط به ژئوکامپوزیت و ژئوتکستایل بوده است. همچنین بیشترین افزایش ظرفیت باربری متعلق به خاک با درصد اختلاط ژئوفوم کمتر (۰٫۲٪) بوده است که این نتیجه با توجه به اثر افزایش ژئوفوم در کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک منطقی به نظر می‌رسد.

۳.۵. محاسبه‌ی ضریب اندرکنش خاک - ژئوسینتتیک

ضریب اندرکنش برای حالت بیرون کشش مسلح‌کننده بستگی به: سطح ژئوسینتتیک، سطح باربری اعضاء متقاطع عرضی برای بار بیرون کشش، ظرفیت باربری خاک اطراف مسلح‌کننده، نوع خاک، و طول نمونه‌ی مدفون شده دارد. مقاومت برشی سطح تماس در مکانیزم اندرکنش برش مستقیم خاک - مسلح‌کننده، ترکیبی از مقاومت برش مستقیم سطح خاک با خاک و مقاومت برش مستقیم مسلح‌کننده با خاک در سطح تماس دارد. پژوهشگران متعددی، [۱۷-۲۷] تأثیر پارامترهای مختلف را در رفتار اصطکاک‌ی سطح تماس خاک - ژئوسینتتیک بررسی کرده‌اند. محور مطالعات ایشان، بیشتر پارامترهایی همانند: درصد رطوبت، نوع و چگالی خاک، هندسه و سختی ژئوسینتتیک و تنش‌های قائم بوده است. آن‌ها مقدار زاویه‌ی اصطکاک بسیج شده در سطح تماس خاک و ژئوسینتتیک را با زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک مقایسه و بررسی کرده و عامل C_i یا ضریب اندرکنش یا سطح تماس مؤثر را به صورت نسبت تنش برشی بیشینه در فصل مشترک خاک - مسلح‌کننده به تنش برشی بیشینه‌ی خاک غیرمسلح، مطابق رابطه‌ی ۱ تعریف کرده‌اند:

$$C_i = \frac{C_a + \sigma_n tg \delta_a}{C + \sigma_n tg \phi} \quad (1)$$

که در آن، C_a چسبندگی بین خاک و ژئوسینتتیک، δ_a زاویه‌ی اصطکاک ظاهری

خاک، به دلیل فراهم شدن نیروی کششی ناشی از مسلح‌کننده می‌شود و در نتیجه، تغییرشکل‌های افقی خاک کاهش و پایداری و ظرفیت باربری سازه‌ی خاک مسلح افزایش می‌یابد.

به طور کلی، مقاومت برشی فصل مشترک خاک - ژئوسینتتیک ناشی از چند عامل است که در این میان، اصطکاک و قفل و بست دانه‌ها با یکدیگر، بیشترین سهم در مقاومت برشی خاک را دارند. در پژوهش حاضر، ژئوگرید و ژئوکامپوزیت، به علت داشتن اعضاء متقاطع عرضی، اندرکنش بهتری با ذرات خاک دارند و در نتیجه، قفل و بست بین ذرات و ژئوسینتتیک و همچنین اصطکاک سطحی بین آن‌ها بیشتر است، لذا ظرفیت باربری بیشتری نیز در استفاده از دو مسلح‌کننده‌ی ژئوسینتتیکی مذکور حاصل می‌شود. افزایش بیشتر ظرفیت باربری نمونه‌های ماسه‌ی مسلح‌شده با ژئوگرید، نسبت به نمونه‌های غیرمسلح، از چشمه‌های باز ژئوگرید نیز ناشی می‌شود، که امکان قفل و بست بهتر ذرات و مسلح‌کننده را فراهم می‌سازد. از طرفی، با افزایش درصد ژئوفوم از ۰٫۲ تا ۰٫۶، میزان افزایش اشاره شده، کاهش یافته است؛ زیرا همان‌طور که پیش از این گفته شد، با افزودن ژئوفوم و نیز افزایش درصد اختلاط آن با ماسه، ساختار خاک دچار تغییر می‌شود و این امر موجب کاهش ظرفیت باربری می‌شود. با وجود کاهش ظرفیت باربری ناشی از اختلاط ژئوفوم با خاک، ژئوفوم EPS به دلیل وزن فوق‌العاده سبک (معمولاً، وزن ژئوفوم ۵۰ تا ۱۰۰ برابر کمتر از خاک است)، باعث ایجاد کمیته‌ی تنش‌های قائم و جانبی و در نتیجه، موجب پخش کردن بارهای متمرکز، کمیته‌سازی بارهای جانبی در دیوارهای حائل، تأمین کمیته‌ی بارهای شیب و احجام بزرگ خاکریز بدون اضافه کردن هرگونه تنش «واقعی» می‌شود. جهت افزایش ظرفیت باربری خاک می‌توان از مسلح‌کننده‌های مختلف به همراه خاک حاوی ژئوفوم استفاده کرد، تا علاوه بر کاهش نیروهای محرک، ظرفیت باربری خاک را نیز افزایش داد.

به طور کلی، ظرفیت باربری نمونه‌های ماسه‌ی مسلح‌شده با ژئوگرید، ژئوکامپوزیت و ژئوتکستایل و با افزودن ۰٫۲٪ وزنی ژئوفوم، نسبت به مخلوط ماسه - ژئوفوم غیرمسلح، به ترتیب به میزان ۱۳۶، ۸۶ و ۴۲ درصد افزایش یافته است. مقادیر متناظر برای افزایش ظرفیت باربری در حالت افزودن ۰٫۴٪ وزنی ژئوفوم به ترتیب

سطح تماس، C چسبندگی خاک، ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک و σ_n تنش قائم اعمال شده است.

در صورتی که ضریب اندرکنش کمتر از ۰/۵ باشد، بدین معنی است که اتصال ضعیفی بین خاک و ژئوسینتتیک وجود دارد و اگر بیشتر از ۱ باشد، یعنی اتصال قوی بین خاک و ژئوسینتتیک حاکم است و مقاومت سطح تماس بین خاک و مسلح‌کننده، بیشتر از مقاومت خاک با خاک خواهد بود.^[۱۶]

با توجه به مقادیر پارامترهای مقاومت برشی (ϕ, C) حاصل از آزمایش برش مستقیم، برای نمونه‌های غیرمسلح و مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک ظاهری بین خاک و ژئوسینتتیک (C_a, δ_a)، ضرایب اندرکنش (C_i) محاسبه شده با استفاده از رابطه ۱، برای مخلوط خاک و ژئوفوم - ژئوسینتتیک، در تنش‌های قائم ۷۵kPa، ۱۵۰kPa و ۲۲۵kPa، به شرح جدول ۵ هستند. نتایج حاصل برای ضریب اندرکنش، در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود.

با توجه به مقادیر ضریب اندرکنش در جدول ۵ و شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که در مخلوط‌های ماسه و ژئوفوم - ژئوسینتتیک، در تنش قائم یکسان، بالاترین ضریب اندرکنش و به عبارتی، قوی‌ترین اتصال در نمونه‌های مسلح‌شده با ژئوگرید بوده و پس از آن در نمونه‌های مسلح‌شده با ژئوکامپوزیت ایجاد شده است. ضرایب اندرکنش نمونه‌های مسلح‌شده با ژئوتکستایل، همواره کمتر از ضریب اندرکنش نمونه‌های مسلح‌شده با ژئوگرید و ژئوکامپوزیت بوده‌اند.

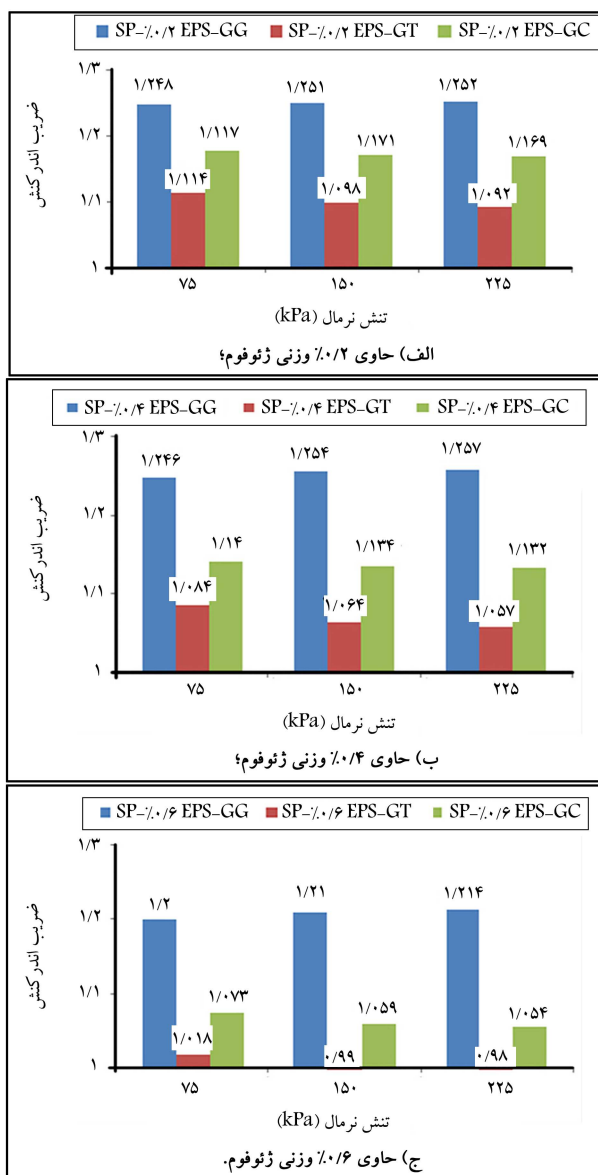
با افزایش تنش قائم و در درصد یکسان اختلاط ژئوفوم، ضریب اندرکنش در مخلوط‌های ماسه - ژئوفوم مسلح‌شده با ژئوگرید، روند افزایشی و در مخلوط‌های ماسه - ژئوفوم مسلح‌شده با ژئوتکستایل و ژئوکامپوزیت روند کاهشی داشته است. برای مخلوط‌های مسلح‌شده با ژئوکامپوزیت، نیز میزان کاهش ایجاد شده کمتر بوده است.

با بررسی درصد اختلاط ژئوفوم بر روی ضریب اندرکنش می‌توان مشاهده کرد که در مخلوط‌های مسلح‌شده با ژئوگرید، درصد اختلاط ۰/۴ و پس از آن، درصد اختلاط ۰/۲، بهترین نتیجه را در بر داشته است. در مورد مسلح‌کننده‌های ژئوتکستایل و ژئوکامپوزیت، با افزایش درصد اختلاط ژئوفوم، ضریب اندرکنش کاهش یافته است. افزایش ضریب اندرکنش و قوی‌تر بودن اتصال ایجاد شده بین خاک و مسلح‌کننده در نمونه‌های مسلح‌شده با ژئوگرید، ناشی از وجود چشمه‌های باز در ژئوگرید و قفل و بست قوی و اصطکاک سطحی بهترین ذرات خاک و مسلح‌کننده، همچنین وجود المان‌های متقاطع عرضی در ژئوگرید بوده است که موجب فراهم شدن مقاومت مقاوم در خاک شده است.

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به منظور بررسی رفتار اندرکنش مخلوط ماسه و ژئوفوم - ژئوسینتتیک، مخلوط‌های ماسه - ژئوفوم مسلح‌شده با ژئوسینتتیک، در دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس با روش تحکیم‌نیافته - زهکشی‌نشده، آزمایش شده و پارامترهای مقاومت برشی و ظرفیت باربری مخلوط‌های مذکور و در نهایت، ضریب اندرکنش، تعیین و بررسی شده‌اند. نتایج کلی حاصل از پژوهش حاضر را می‌توان به این صورت برشمرد:

۱. در مخلوط‌های ماسه - ژئوفوم مسلح‌شده با ژئوسینتتیک، در تنش قائم یکسان، بیشترین افزایش تنش برشی نسبت به مخلوط ماسه و ژئوفوم، به ترتیب در مخلوط‌های مسلح‌شده با ژئوگرید، ژئوکامپوزیت، و ژئوتکستایل، به‌دست آمده و با افزایش تنش قائم، تنش برشی افزایش یافته است.
۲. در مخلوط‌های ماسه - ژئوفوم مسلح‌شده با ژئوسینتتیک، با افزایش درصد اختلاط ژئوفوم، مقادیر تنش برشی کاهش یافته است.
۳. با مقایسه‌ی ظرفیت باربری مخلوط‌های ماسه - ژئوفوم مسلح‌شده و غیرمسلح می‌توان مشاهده کرد که بسته به نوع مسلح‌کننده و درصد اختلاط ژئوفوم، ظرفیت باربری حدود ۱۲ تا ۱۳۵ درصد افزایش داشته است.
۴. در مخلوط‌های ماسه - ژئوفوم مسلح‌شده با ژئوسینتتیک، بیشترین افزایش ظرفیت باربری نسبت به مخلوط‌های متناظر غیرمسلح، برای نمونه‌های مسلح‌شده با ژئوگرید و پس از آن به ترتیب، برای نمونه‌های مسلح‌شده با ژئوکامپوزیت و ژئوتکستایل به‌دست آمده است.
۵. با وجود کاهش ظرفیت باربری ناشی از اختلاط ژئوفوم با خاک، ژئوفوم EPS برای کاربردهای ساخت و ساز مقرون به صرفه که درگیر حجم بالایی



شکل ۱۳. مقادیر ضریب اندرکنش برای مخلوط‌های ماسه - ژئوفوم مسلح‌شده با ژئوسینتتیک.

جدول ۵. ضرایب اندرکنش محاسبه شده برای نمونه‌های مسلح شده با ژئوسینتتیک.

نمونه‌های مسلح شده با ژئوسینتتیک					
C_i	σ_n (kPa)	$\delta\alpha$ (درجه)	C_a (kpa)	مشخصات نمونه	نام نمونه
۱,۲۴۸	۷۵			نمونه‌ی ساخته شده با ماسه‌ی SP و ۰/۲°	SP - ۰/۲٪EPS - GG
۱,۲۵۱	۱۵۰	۳۷	۳,۲	درصد وزنی ژئوفوم، مسلح شده با ژئوگرید	
۱,۲۵۲	۲۲۵				
۱,۱۱۴	۷۵			نمونه‌ی ساخته شده با ماسه‌ی SP و ۰/۲°	SP - ۰/۲٪EPS - GT
۱,۰۹۸	۱۵۰	۳۳	۴,۶	درصد وزنی ژئوفوم، مسلح شده با ژئوتکستایل	
۱,۰۹۲	۲۲۵				
۱,۱۷۷	۷۵			نمونه‌ی ساخته شده با ماسه‌ی SP و ۰/۲°	SP - ۰/۲٪EPS - GC
۱,۱۷۱	۱۵۰	۳۵	۳,۸	درصد وزنی ژئوفوم، مسلح شده با ژئوکامپوزیت	
۱,۱۶۹	۲۲۵				
۱,۲۴۶	۷۵			نمونه‌ی ساخته شده با ماسه‌ی SP و ۰/۴°	SP - ۰/۴٪EPS - GG
۱,۲۵۴	۱۵۰	۳۵	۵,۴	درصد وزنی ژئوفوم، مسلح شده با ژئوگرید	
۱,۲۵۷	۲۲۵				
۱,۰۸۴	۷۵			نمونه‌ی ساخته شده با ماسه‌ی SP و ۰/۴°	SP - ۰/۴٪EPS - GT
۱,۰۶۴	۱۵۰	۳۰	۷,۱	درصد وزنی ژئوفوم، مسلح شده با ژئوتکستایل	
۱,۰۵۷	۲۲۵				
۱,۱۴۰	۷۵			نمونه‌ی ساخته شده با ماسه‌ی SP و ۰/۴°	SP - ۰/۴٪EPS - GC
۱,۱۳۴	۱۵۰	۳۲	۶,۱	درصد وزنی ژئوفوم، مسلح شده با ژئوکامپوزیت	
۱,۱۳۲	۲۲۵				
۱,۲۰۰	۷۵			نمونه‌ی ساخته شده با ماسه‌ی SP و ۰/۶°	SP - ۰/۶٪EPS - GG
۱,۲۱۰	۱۵۰	۳۳	۷,۲	درصد وزنی ژئوفوم، مسلح شده با ژئوگرید	
۱,۲۱۴	۲۲۵				
۱,۰۱۸	۷۵			نمونه‌ی ساخته شده با ماسه‌ی SP و ۰/۶°	SP - ۰/۶٪EPS - GT
۰,۹۹۰	۱۵۰	۲۷	۹,۲	درصد وزنی ژئوفوم، مسلح شده با ژئوتکستایل	
۰,۹۸۰	۲۲۵				
۱,۰۷۳	۷۵			نمونه‌ی ساخته شده با ماسه‌ی SP و ۰/۶°	SP - ۰/۶٪EPS - GC
۱,۰۵۹	۱۵۰	۲۹	۸,۴	درصد وزنی ژئوفوم، مسلح شده با ژئوکامپوزیت	
۱,۰۵۴	۲۲۵				

(خاک SP)، جهت حصول ظرفیت باربری بیشینه، معادل ۰/۲٪ به دست آمده است.

۷. در مخلوط‌های ماسه و ژئوفوم - ژئوسینتتیک، قوی‌ترین اتصال (بالا‌ترین ضریب اندرکنش)، در نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید، سپس در نمونه‌های مسلح شده با ژئوکامیوزیت و پس از آن در نمونه‌های مسلح شده با ژئوتکستایل ایجاد شده است.

۸. در مخلوط‌های ماسه و ژئوفوم - ژئوگرید، بیشترین ضریب اندرکنش، در درصد اختلاط ژئوفوم ۰/۴ و سپس درصد اختلاط ۰/۲ به دست آمده است.

از خاکریزی هستند و از لحاظ سبکی (معمولاً وزن ژئوفوم، ۵۰ تا ۱۰۰ برابر کمتر از خاک است) و سختی مصالح، تاکنون رایج‌ترین نوع مصالح سبک‌وزن استفاده شده بوده است. با توجه به وزن فوق‌العاده سبک و سختی ژئوفوم، کمینه‌ی تنش‌های قائم و جانبی را اعمال می‌کند و در نتیجه، موجب کاهش قابل توجه نشست‌ها، پخش کردن بارهای متمرکز، کمینه‌سازی بارهای جانبی در دیوارهای حائل، تأمین حداقل بارهای شیب و احجام بزرگ «خاکریز» (یعنی سدهای خاکی، خاکریزهای شیب) بدون اضافه کردن هرگونه تنش «واقعی» می‌شود.

۶. در پژوهش حاضر، مقدار بهینه‌ی ژئوفوم در اختلاط با ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه

پانویس‌ها

1. passive
2. Liu
3. Tanchaisawat
4. Tuna
5. Altun
6. Denine
7. Toyoura sand
8. EPS

منابع (References)

1. Padade, A. and Mandal, J. "Interface strength behavior of expanded polystyrene EPS geof foam", *Int. J. Geotech. Eng.*, **8**(1), pp. 66-71 (2014).
2. Arjomand, M.A. and Darsi, S. "Investigation of soil-geogrid interaction by using direct shear and pullout tests", 8th National Congress on Civil Engineering, Noshirvani University of Technology, Faculty of civil engineering Babol, Iran, pp. 1-8 (In Persian) (2014).
3. Abdi, M.R., Arjomand, M.A. and Siavoshnia, M. "Effect of tensile strength on soil-geogrid interaction", 5th National Congress of Civil Engineering, Mashhad, Iran, pp. 1-8 (In Persian) (2010).
4. Liu, C., Zornberg, J.G., Chen, T.C., Ho, Y.H. and et al. "Behavior of geogrid-sand Interface in direct shear mode", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **135**(12), pp. 1863-1867 (Dec., 2009).
5. Tanchaisawat, T., Bergado, D.T., Voottipruex, P. and Shehzad, K. "Interaction between geogrid reinforcement and tire chip-sand lightweight backfill", *Geotextiles and Geomembranes Journal*, **28**(1), pp. 119-127 (2010).
6. Tuna, S.C. and Altun, S. "Mechanical behaviour of sand-geotextile interface", *Scientia Iranica (Transactions A: Civil Engineering)*, **19**(4), pp. 1044-1051 (2012).
7. Abdi, M. and Etefagh, M. "The effect of soil particle size and reinforcement aperture size on the soil-geogrid

interaction", *Journal of Experimental Research in Civil Engineering*, **1**(1), pp. 57-64 (In persian) (2014).

8. Denine, S., Della, N., Muhammed, R.D. and et al. "Effect of geotextile reinforcement on shear strength of sandy soil: Laboratory study", *Studia Geotechnica et Mechanica*, **38**(4), pp. 3-13 (2016).
9. Abedi, M.M., Arjomand, M.A. and Hajiannia, A. "Study of the effect of geotextile on increasing of shear strength and bearing capacity of clay soil reinforced by geogrid and investigation of their correlation", *Journal of Science and Engineering Elites*, **2**(1), pp. 216-223 (In Persian) (2017).
10. Alaie, R. and Jamshidi Chenari, R. "Cyclic and post-cyclic shear behaviour of interface between geogrid and EPS beads-sand backfill", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **22**(9), pp. 3340-3357 (2018).
11. Mahbubi Motlagh, N. and Mahbubi Ardakani, A.R. "Evaluation of the effect of adding lime to shear strength parameters of clay -geosynthetic interface", *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, **27**(108), pp. 281-292 (In Persian) (2018).
12. Abdi, M.R. and Asgardun, Y. "Evaluation of the effects of reinforced or stabilized coarse surface layer on bearing capacity of soft clays", *Journal Civ. Env. Eng.*, **49.3**(96), pp. 97-106 (2019).
13. Mohammadjafari, M. and Yazdi, M. "Effect of mixing geof foam beads and soil on shear strength parameters of sandy soil using direct shear test", *Journal of Engineering Geology*, **14**(1), pp.133-148 (In Persian) (2020).
14. ASTM D5321-02, "Standard test method for determining the coefficient of soil and geosynthetic or geosynthetic and geosynthetic friction by the direct shear method", American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, pp. 1-7 (2002).
15. ASTM-D5321/D5321M-14, "Standard test method for determining the shear strength of soil-geosynthetic and geosynthetic-geosynthetic interfaces by direct shear", ASTM International, Provided by IHS under license with ASTM, pp. 1-11 (2014).

16. Ministry of Roads and Urban Development Deputy for Housing and Construction, National building code, Part 7: Foundation, Iran development publisher, Tehran, Iran (2013).
17. Jarret, P.M. and Bathurst, R.J. "Frictional development at a gravel geosynthetic peat interface", *Proc., 2nd Canadian Symp. Of Geotextiles and Geomembranes*, Edmonton, Canada, pp. 1-6 (1985).
18. Cancelli, A., Rimoldi, P. and Togni, S. "Frictional characteristics of geogrids by means of direct shear and pullout tests", *Proc., Int. Symp. on Earth Reinforcement Practice, Kyushu Univ, Fukuoka, Japan*, pp. 51-56 (1992).
19. Cazzuffi, D., Picarelli, L., Ricciuti, A. and Rimold, P. "Laboratory investigations on the shear strength of geogrid reinforced soils", *ASTM Spec. Tech. Publ*, **1190**, pp. 119-137 (1993).
20. Bauer, G.E. and Zhao, Y. "Evaluation of shear strength and dilatancy behavior of reinforced soil from direct shear tests", *ASTM Spec. Tech. Publ*, **1190**, pp. 138-157 (1993).
21. Athanasopoulos, G.A. "Results of direct shear tests on geotextile reinforced cohesive soil", *Geotextiles and Geomembranes*, **14**(11), pp. 619-644 (1996).
22. Tatlisoz, N., Edil, T.B. and Benson, C.H. "Interaction between reinforcing geosynthetics and soil-tire chip mixtures", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124**(11), pp. 1109-1119 (1998).
23. Abu-Farsakh, M., Coronel, J. and Tao, M. "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), pp. 540-549 (2007).
24. Liu, Ch.-N., Zornberg, J.G., Chen, T-Ch. and et al. "Behavior of geogrid-sand interface in direct shear mode", *Journal of Geotechnical and Geoinviromental Engineering*, **135**(12), pp. 1863-1871 (2009).
25. Abdi, M.R. and Arjomand, M.A. "Feasibility study of improving clay-geogrid interaction by using thin layers of sand", *Civil Engineering Journal of Ferdowsi University of Mashhad*, **21**(2), pp. 85-100 (In Persian) (2010).
26. Infante, D.J., Martinez, G.M., Arrua, P.A. and et al. "Shear strength behavior of different geosynthetic reinforced soil structure from direct shear test", *International Journal of Geosynthetic and Ground Eng*, **2**(17), pp. (2016).
27. Abdi, M.R., Safdari, Sh. and Gonbad ,M. "Studying the effect of roughness on soil-geotextile interaction in direct shear test", *journal of engineering geology*, **12**(5), pp. 1-30 (2018).