



بررسی مقاومت برشی فصل مشترک خاک رس- ژئوتکستایل با استفاده از الیاف ضایعات BCF

بهاره ابراهیمی علویجه^۱، رضا پورحسینی اردکانی^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران
^۲ دانشیار گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۱-۰۸
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۱-۲۶
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۱-۲۸
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۲-۰۹

کلمات کلیدی:

اندرکنش خاک رس-ژئوتکستایل
آزمایش برش مستقیم بزرگ
مقیاس
رس الیافدار
رطوبت

خلاصه: با قرار دادن عناصر مسلح کننده مقاومت برشی خاک بهبود می یابد. پژوهش های متعددی در زمینه ی تسلیح خاک های درشت دانه انجام شده و کمتر به خاک های ریزدانه پرداخته شده است. بر اساس پژوهش های موجود مقاومت خاک ریزدانه - ژئوسنتتیک در مقایسه با خاک های درشت دانه ضعیف تر بوده و لازم است تا اندرکنش خاک های ریزدانه- مسلح کننده تقویت گردد. در این پژوهش از نمونه خاک رس حاوی حدود ۸۰ درصد ریزدانه عبوری از الک #۲۰۰ و دو نوع ژئوتکستایل بدون بافت استفاده شد. مقاومت برشی خاک در اثر افزودن الیاف ضایعات نخ پلی پروپیلن با ۰/۷ و ۱/۲ درصد نسبت به وزن خشک خاک مورد توجه قرار گرفت. مقاومت برشی خاک-ژئوتکستایل با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس تعیین شد، پاره ای از این آزمایش ها با بارگذاری - باربرداری خاک به اجرا درآمدند. نتایج آزمایش نشان داد که بارگذاری - باربرداری، مقاومت برشی را افزایش می دهد. افزودن ۰/۷٪ الیاف به خاک مقاومت برشی فصل مشترک خاک - ژئوتکستایل را تا ۱۵ درصد در شرایط بارگذاری - بدون باربرداری و تا ۹ درصد در شرایط بارگذاری - باربرداری فزونی داده است. همچنین بارگذاری قائم بیشتر، استفاده از ژئوتکستایل با استحکام کششی بالاتر و کاهش رطوبت خاک از عوامل بهبود مقاومت برشی خاک-ژئوتکستایل در این مطالعه هستند.

۱- مقدمه

از نوارهای فلزی برای بهبود خواص خاک غیرچسبنده استفاده کرد. از دهه ی ۱۹۷۰ استفاده از ژئوتکستایل ها با توجه به شکل پذیری و سازگاری بیشتر با خاک نسبت به مسلح کننده های فلزی، رواج یافت. ژئوتکستایل ها علاوه بر بهبود مقاومت برشی و شکل پذیری خاک، میزان افت مقاومت بعد از نقطه ی اوج را در خاک ماسه کاهش می دهند [۱]. عناصر مسلح کننده ی خاک از نظر ابعاد به دو گروه المان های ممتد شامل ژئوسنتتیک ها و مسلح کننده های فلزی و المان های گسسته با توزیع تصادفی همانند الیاف طبیعی و مصنوعی تقسیم می شوند.

از عوامل تأثیرگذار در طراحی سازه های خاک مسلح، اندرکنش خاک - مسلح کننده است. دانستن پارامترهای اندرکنش خاک - مسلح کننده، همچنین ارتباط این پارامترها با بارهای اعمالی، به

خاک از اصلی ترین مصالح مورد استفاده در پروژه های راهسازی در مواردی به دلیل مقاومت ناکافی نیاز به بهسازی دارد. تسلیح خاک با استفاده از مصالح نوین یکی از روش های پرکاربرد در مهندسی ژئوتکنیک برای افزایش پارامترهای مقاومتی خاک است. استفاده از روش های تسلیح در خاک علاوه بر بهبود پارامترهای مقاومتی خاک می تواند موجب کاهش حجم عملیات خاکی در پروژه های راهسازی و پایدارسازی شیب ها شود. هرچند مسلح سازی خاک سابقه ی طولانی دارد اما هنری ویدال^۱ مهندس فرانسوی در اوایل دهه ی ۱۹۶۰ برای نخستین بار مبحث خاک مسلح را به صورت علمی مطرح کرد. وی

1 Vidal

* نویسنده عهده دار مکاتبات: r_porphoseini@yazd.ac.ir



ماسه و ژئوتکستایل بافته شده را با استفاده از آزمایش برش مستقیم مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که شکل ذرات بر روی رفتار فصل مشترک و به ویژه رفتار بعد از نقطه‌ی اوج تأثیر دارد، به گونه‌ای که ضریب اصطکاک و افت مقاومت برشی بعد از نقطه‌ی اوج در ماسه‌ی گوشه‌دار- ژئوتکستایل بیشتر از ماسه گرد گوشه - ژئوتکستایل است [۱۰]. انوبهو و وو^۳ در سال ۲۰۱۵ با استفاده از نرم افزار FLAC^{3D} رفتار فصل مشترک ماسه - ژئوتکستایل را شبیه سازی کردند. مقایسه‌ی منحنی‌های شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم افزار با داده‌های تجربی موجود در مطالعه‌ی انوبهو و بسودر [۱۰] انطباق مناسب نتایج عددی و تجربی را نشان می‌دهد [۱۱].

ونگلا و گالی^۴ در سال ۲۰۱۶ بر روی ژئوتکستایل بافته شده و سه نوع ماسه با دانه‌بندی مختلف و ویژگی‌های ریخت شناسی^۵ یکسان مطالعه نمودند. هدف بررسی اثر اندازه ذرات بر رفتار فصل مشترک خاک - مسلح‌کننده بود. نتایج آزمایش‌های برش مستقیم نشان می‌دهد که ماسه‌ی درشت به دلیل قفل‌شدگی کمتر در بافت ژئوتکستایل مقاومت برشی کمتری نسبت به ماسه‌ی ریز و متوسط دارد [۱۲].

در سال ۲۰۱۷ افضلی نژاد و همکاران اثر شکل ذرات بر مقاومت و تغییر حجم خاک - ژئوتکستایل بافته شده را بررسی کردند. از ماسه گوشه‌دار و گوی‌های شیشه‌ای برای شبیه‌سازی ماسه‌ی گرد گوشه استفاده شد. زاویه اصطکاک اوج و زاویه اتساع بیشه برای ماسه‌ی گوشه‌دار - ژئوتکستایل بیشتر از گوی‌های شیشه‌ای - ژئوتکستایل است. افزایش تنش قائم، زاویه اصطکاک اوج و زاویه اتساع بیشه برای ماسه گوشه‌دار - ژئوتکستایل را می‌کاهد ولی در گوی‌های شیشه‌ای - ژئوتکستایل این حالت به وجود نمی‌آید [۱۳].

پونتا^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از عکس‌های FESEM^۷ ژئوتکستایل بدون بافت پس از آزمایش برش مستقیم، مکانیزم برش فصل مشترک ماسه - ژئوتکستایل بدون بافت را مورد مطالعه قرار دادند. مشخص شد که این مکانیزم شامل قفل‌شدگی ذرات ماسه در الیاف ژئوتکستایل، کشیدگی و پارگی الیاف ژئوتکستایل است [۱۴]. پی‌سازی بر روی خاک با ظرفیت باربری کم و هزینه‌ی زیاد

خصوص در طراحی سازه‌های خاک مسلح به ژئوسنتتیک اهمیت دارد. اندرکنش خاک - ژئوسنتتیک متأثر از هندسه و ویژگی‌های مکانیکی ژئوسنتتیک و خاک، شرایط مرزی و بارگذاری است [۲]. با توجه به موقعیت ژئوسنتتیک و شرایط بارگذاری، آزمایش‌های گوناگونی مانند آزمایش برش مستقیم و آزمایش بیرون کشش جهت شبیه‌سازی مکانیزم اندرکنش توسعه یافت.

اندرکنش خاک - ژئوسنتتیک به عوامل گوناگونی از جمله وضعیت عملکردی (برش مستقیم یا بیرون کشش)، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک (وزن مخصوص، شکل و ابعاد دانه‌ها، دانه‌بندی و درصد آب)، ویژگی‌های مکانیکی ژئوسنتتیک‌ها (مقاومت کششی نهایی و درکنش ۵ درصد)، شکل و نوع بافت ژئوسنتتیک‌ها بستگی دارد [۳] و مطالعات زیادی در زمینه‌ی تأثیر این عوامل به انجام رسیده‌است. کاهش رطوبت و افزایش تراکم خاک موجب افزایش در مقاومت فصل مشترک خاک - ژئوسنتتیک شده‌است [۴-۶]. ابوفرسخ^۱ و همکاران [۵] نشان دادند که این افزایش متأثر از نوع ژئوسنتتیک و ویژگی‌های خاک است..

محمود و همکاران در سال ۲۰۰۰ با مطالعه بر روی فصل مشترک خاک - ژئوتکستایل با استفاده از آزمایش برش مستقیم دریافتند که افزایش استحکام کششی مقاومت برشی فصل مشترک خاک رس - ژئوتکستایل را افزایش داده، ولی در خاک ماسه‌ای رابطه‌ی ثابتی بین استحکام کششی ژئوتکستایل و مقاومت برشی فصل مشترک وجود ندارد [۷].

انوبهو و بسودر در سال ۲۰۱۰ رفتار تنش برشی - جابه‌جایی فصل مشترک ماسه - ژئوتکستایل بافته شده با دو بافت مختلف را بررسی کردند. نتایج بیانگر آن است ژئوتکستایل با بافت درشت‌تر مقاومت برشی فصل مشترک بیشتری دارد. [۸].

بلال حسین و همکاران در سال ۲۰۱۲ اندرکنش ژئوتکستایل و سه نوع خاک شامل ماسه‌ی خالص، خاک ماسه‌ای و خاک رسی را با استفاده از دستگاه برش مستقیم بررسی کردند. نتایج نشان داد که رفتار تنش برشی - جابه‌جایی در هر سه خاک به صورت هیپربولیکی است. در خاک ماسه‌ی خالص هر دو رفتار اتساع و انقباض و در خاک ماسه‌ای و رسی تنها انقباض مشاهده شد [۹].

در سال ۲۰۱۳ انوبهو و بسودر^۲ فصل مشترک دو نوع خاک

3 Anubhav & Wu

4 Vangla & Gali

5 Morphological characteristics

6 Punetha

7 Field Emission Scanning Electron Microscope

1 Abu-Farsakh

2 Anubhav & Basudhar

فشاری تک محوری، برش مستقیم و CBR بررسی کردند. نتایج تحقیق بیانگر آن است که مقاومت فشاری و نسبت باربری تا درصد مشخصی از الیاف افزایش یافته و بعد از آن افزایش الیاف تأثیر قابل توجهی ندارد. در آزمایش برش مستقیم با افزودن الیاف چسبندگی افزایش یافته و در مقدار زاویه اصطکاک تغییر قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشده است [۲۰]

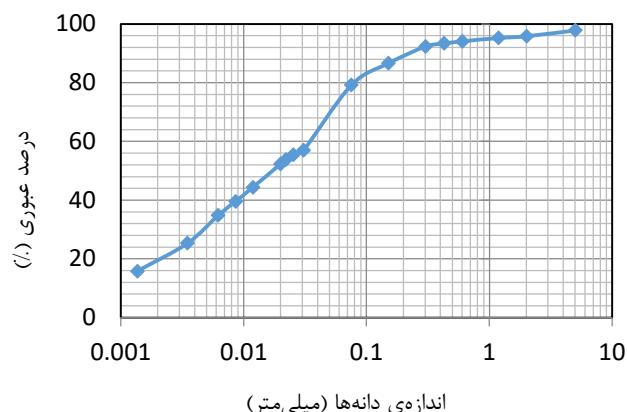
آناگنوستوپولس و همکاران (۲۰۱۴)، تأثیر پارامترهای مختلف از جمله، خواص مقاومتی الیاف، ابعاد نسبی الیاف و نرخ برش را بر روی مقاومت برشی خاک چسبیده مسلح به الیاف پلی پروپیلن و الیاف کربن در درصد‌های مختلف با استفاده از آزمایش برش مستقیم بررسی کردند. افزودن الیاف پلی پروپیلن به خاک تا درصد بهینه باعث افزایش قابل توجه در مقاومت برشی شده و بعد از آن مقاومت کاهش یافته و یا در مقداری ثابت باقی مانده است. در ارتباط با ابعاد الیاف نیز در بررسی نتایج حاصل، الیاف با قطر کم‌تر، چسبندگی کم‌تری را نتیجه می‌دهد که به دلیل قطر کمتر، نقاط اتصال خاک و الیاف کمتر و چسبندگی کاهش یافته است. نتیجه‌ی مهم دیگر حاصل از این تحقیق، بیان‌گر آن است که مقاومت برشی خاک مسلح مستقل از شاخص‌های مکانیکی الیاف است [۱۹].

با توجه به بهبود پارامترهای مقاومتی خاک با افزودن الیاف، این فرضیه وجود دارد که افزودن الیاف به خاک اندرکنش خاک - ژئوسنتتیک را نیز بهبود بخشد. در این پژوهش بهبود اندرکنش خاک رس - ژئوتکتستایل با افزودن الیاف به خاک با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس و تأثیر پارامترهایی همچون افزایش تنش قائم، استحکام کششی ژئوتکتستایل و رطوبت خاک مطالعه شد.

۲- مصالح مورد استفاده

۲-۱- خاک

خاک رس مورد استفاده در این پژوهش از محدوده‌ی علی‌آباد شهرستان میبد واقع در استان یزد تهیه شده است. آزمایش دانه‌بندی بر اساس استاندارد ASTM D-422 انجام شده است [۲۱]. با توجه به این‌که درصد خاک عبوری از الک #۲۰۰ درصد قابل توجهی است، آزمایش دانه‌بندی به روش تر و دانه‌بندی بخش عبوری از الک #۲۰۰ نیز به روش هیدرومتری انجام شده است. نمودار دانه‌بندی و مشخصات خاک مورد پژوهش به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: نمودار دانه‌بندی خاک

Fig. 1. Particle size distribution curve

جدول ۱: مشخصات خاک مورد استفاده

Table 1. Properties of the soil

مقدار	شماره مرجع	استاندارد	آزمایش
۲/۶۳	[۲۲]	ASTM D-۸۵۴	چگالی نسبی دانه های جامد خاک
۱۲/۴	[۲۳]	ASTM D-۴۲۷	حد انقباض (%)
۱۵	[۲۴]	D-۴۳۱۸ ASTM	حد خمیری (%)
۳۴			حد روانی (%)
۱۷	[۲۵]	ASTM D-۶۹۸	رطوبت بهینه (%)
۱/۹			چگالی خشک بیشینه (gr/cm ³)

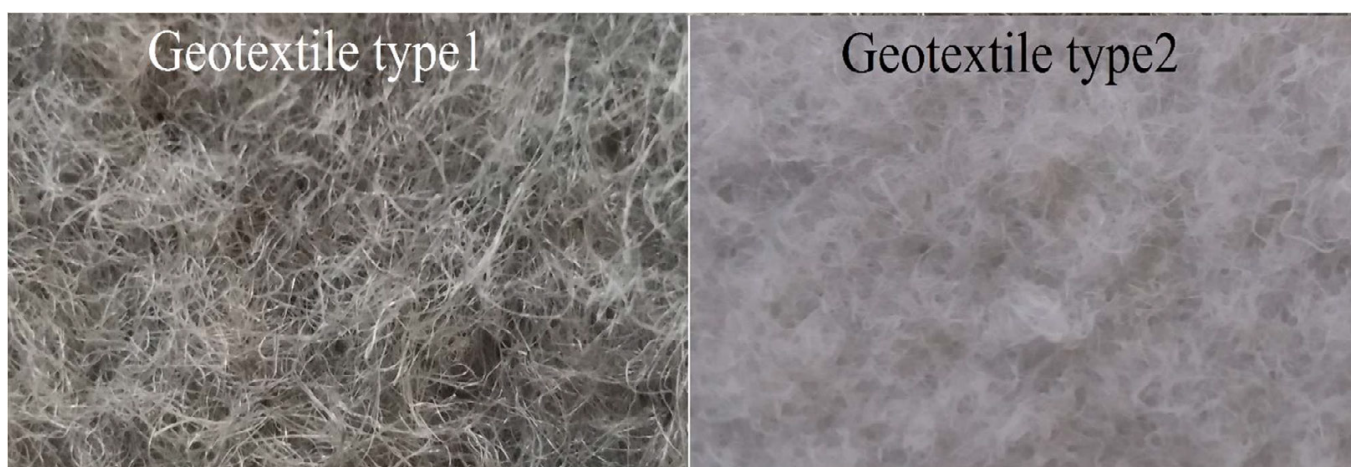
احداث پی های عمیق، ضرورت بررسی در مورد کاربرد روش های تسلیح خاک ریزدانه را مشخص می‌کند. در پژوهش‌های خاک مسلح به میحث خاک‌های ریزدانه کمتر توجه شده است. در خاک رس به دلیل گسیختگی در سطح تماس قبل از بسیج کامل مقاومت ژئوسنتتیک‌ها [۱۵]، بررسی امکان بهبود مقاومت برشی فصل مشترک آن ضرورت می‌یابد. در پژوهش‌ها مطالعه بر روی اندرکنش خاک - ژئوسنتتیک در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفته است اما راهکاری جهت افزایش مقاومت برشی فصل مشترک ارائه نشده است. الیاف طبیعی شامل الیاف نارگیل، سیسال، خرما، کنف، پوشال کاه و الیاف مصنوعی شامل الیاف پلی پروپیلن، پلی استر، پلی اتیلن، شیشه و پلی وینیل الکل است [۱۶]، که به‌طور کلی افزودن این الیاف به خاک مقاومت فشاری و برشی خاک را افزایش داده است. [16-19] زیموگلو و یتیموگلو (۲۰۱۲)، اثر افزودن الیاف پلی پروپیلن بر خاک سیلت با خاصیت خمیری زیاد را با استفاده از آزمایش مقاومت



شکل ۲: وضعیت ظاهری الیاف مورد استفاده
Fig.2. A view of the fibers

جدول ۲: مشخصات الیاف BCF
Table 2. Properties of BCF fibers

ویژگی	مقدار	واحد
چگالی	۰/۹۱	گرم بر سانتی متر مکعب
قطر	۴۵	میکرون
طول	۲-۱	سانتی متر
مقاومت کششی	۱۰۰	مگا پاسکال



شکل ۳: ژئوتکستایل های مورد استفاده
Fig.3. geotextiles used

جدول ۳: مشخصات دو نوع ژئوتکستایل مورد استفاده (داده های تولید کننده)
Table 3. Properties of two types of geotextile used (data from the manufacturer)

مشخصات	واحد	روش آزمایش	جهت	نوع ۱	نوع ۲
جرم در واحد سطح	g/m^2	DIN EN ۲۹۰۷۳-۱	-	۲۵۰	۴۰۰
ضخامت	mm	DIN EN ۲۹۰۷۳-۲	-	۳	۴
مقاومت کششی	kN/m	DIN EN ۲۹۰۷۳-۳	طولی	۱۶	۲۶
مقاومت کششی	kN/m	DIN EN ۲۹۰۷۳-۳	عرضی	۱۳	۲۶
حداکثر کشش طولی	%	DIN EN ۲۹۰۷۳-۳	طولی	۵۵	۵۵
حداکثر کشش عرضی	%	DIN EN ۲۹۰۷۳-۳	عرضی	۵۰	۵۰
مقاومت سوراخ	kN/m	DIN EN ISO ۱۲۲۳۶	-	۳	۴/۱
استحکام پارگی دوزنقه	N	ASTM D -۴۵۳۳	طولی	۳۴۰	۳۱۰
استحکام پارگی دوزنقه	N	ASTM D -۴۵۳۳	عرضی	۳۲۰	۵۰۵



شکل ۴: دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس
Fig.3. Large scale direct shear machine



شکل ۵: نمونه‌ای از مخلوط خاک و الیاف
Fig.5. a sample of soil and fibers mix

است. این نخ از نوع الیاف پلی‌پروپیلن است و با روش‌های مختلف بافت‌دهی، برخی از خواص آن‌ها به منظور کاربرد در منسوجات اصلاح گردیده‌است. در پژوهش‌های مرتبط، مقدار الیاف بهینه، کمتر از ۰/۵ [۲۷]، بین ۰/۵ تا ۱ [۱۹] درصد وزنی نسبت به وزن خشک خاک پیشنهاد شده‌است. با توجه به این نتایج، درصد الیاف در محدوده‌های بیان شده انتخاب شده‌اند. نمونه‌های مورد مطالعه عبارتند از خاک بدون الیاف و خاک به اضافه‌ی ۰/۲، ۰/۷ و ۱/۲ درصد الیاف نسبت

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های شناسایی خاک و بر اساس استاندارد ASTM D-2478 خاک موردپژوهش در دسته‌ی CL، خاک رس با خاصیت خمیری پایین قرار می‌گیرد [۲۶].

۲-۲- الیاف

الیاف استفاده‌شده در این پژوهش، ضایعات نخ BCF¹

1 Bulk Continuous Filament



شکل ۶: (الف) قرارگیری بلوک چوبی در جعبه‌ی برش. (ب) بعد از نصب ژئوتکستایل

Fig.6. (a) wooden block position in direct shear box. (b) Direct shear box after geotextile placement

الیاف انتخاب شده ۰/۲، ۰/۷ و ۱/۲ درصد نسبت به وزن خشک خاک است. میزان خاک خشک مورد استفاده‌ی هر نمونه ۰/۸ چگالی خشک بیشینه‌ی حاصل از آزمایش تراکم استاندارد نظیر است. آزمایش برش مستقیم با استاندارد ASTM D-5321 [۲۸] و ASTM D-3080 [۲۹] انجام شده‌است. براساس استاندارد ASTM D5321 و با توجه به دانه‌بندی خاک، حداقل بعد و عمق جعبه‌ی برش باید به ترتیب ۳۰۰ و ۵۰ میلی‌متر باشد.

۳-۱- اصلاح دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس

طبق استاندارد در هنگام بررسی اندرکنش خاک - ژئوسنتتیک، در جعبه‌ی پایینی دستگاه، بلوک صلبی قرار گرفت تا جابه‌جایی در جهت قائم پس از اعمال تنش قائم صورت نپذیرد و ژئوسنتتیک دقیقاً در محل صفحه‌ی برش باشد. این توصیه در هنگام استفاده از ژئوتکستایل به‌عنوان مسلح‌کننده کاربرد بیشتری خواهد داشت [۲۸]. تصویر جعبه‌ی برش مستقیم بعد از قرارگیری ژئوتکستایل در شکل ۶ نشان داده شده‌است. به‌منظور جلوگیری از ایجاد تفرع در سطح برش حداقل ضخامت خاک در این آزمایش باید ۵۰ میلی‌متر باشد [۳۰]، از این رو ضخامت خاک در بررسی مقاومت فصل مشترک و در آزمایش مقاومت برشی خاک به ترتیب ۷۰ و ۱۵۰ میلی‌متر اجرا شد. برای اطمینان از صحت نتایج آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس برخی از آزمایش‌ها در شرایط یکسان تکرار شد.

یک بلوک چوبی از جنس نئوپان و ^۱MDF با ضلع ۲۹/۵ سانتی‌متر

به وزن خشک خاک. مشخصات الیاف مصرفی در جدول ۲ و وضعیت ظاهری الیاف در شکل ۲ آمده‌است.

۳-۲- ژئوسنتتیک

ژئوسنتتیک مورد استفاده در آزمایش‌ها، دو نوع ژئوتکستایل بدون بافت پلی‌استر است. تصویر ژئوتکستایل‌ها در شکل ۳ و ویژگی آن‌ها در جدول ۳ آورده شده‌است.

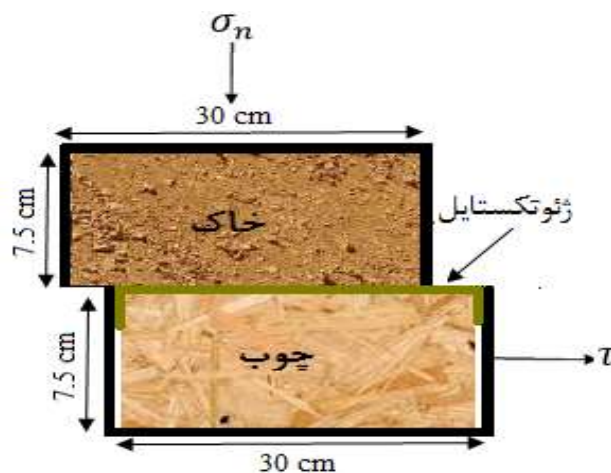
۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

اندرکنش خاک رس - ژئوتکستایل و تأثیر افزودن الیاف بر آن با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۴ دستگاه مورد استفاده در آزمایش نشان داده شده‌است. از مسائل درخور اهمیت در کاربرد الیاف به‌عنوان مسلح‌کننده، ترکیب این عناصر با خاک به‌منظور ایجاد محیط همگن است. این مشکل در خصوص خاک ریزدانه و یا خاکی که دارای درصد قابل‌توجهی رس است، دوچندان خواهد شد. به‌منظور آماده‌سازی نمونه برای انجام آزمایش‌های خاک الیاف‌دار، ابتدا بخشی از رطوبت مورد نیاز به خاک اضافه‌شده و الیاف با خاک مرطوب ترکیب و پس‌از آن رطوبت باقی‌مانده به خاک افزوده می‌شود. مخلوط کردن مواد تا جایی ادامه می‌یابد که ترکیبی تقریباً همگن ایجاد شود. پس از انجام مراحل فوق، نمونه در محیط بسته به مدت ۲۴ ساعت نگهداری می‌گردد تا رطوبت به خوبی در مخلوط توزیع گردد. تصویری از نمونه‌ی خاک الیاف‌دار در شکل ۵ آورده شده‌است. درصد

1 Medium-density fiberboard

۳-۳- برش نمونه‌ها در شرایط بارگذاری-باربرداری

در این حالت پس از آماده‌سازی نمونه به شیوه‌هایی که در بخش‌های پیشین بیان گردید، نمونه با استفاده از تنش قائم ۲۰۰ یا ۳۰۰ کیلو پاسکال به مدت ۲۴ ساعت بارگذاری و پس از آن، تا تنش قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال باربرداری شده و در همین تنش قائم برش بر نمونه اعمال شده‌است. در این روش برای همه‌ی نمونه‌ها از رطوبت ۱۷ درصد که رطوبت بهینه خاک است، استفاده شده‌است. سرعت برش و حداکثر جابه‌جایی افقی به مانند شرایط عادی به ترتیب ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه و ۳۰ میلی‌متر است.



شکل ۷: شماتیک قرارگیری بلوک چوبی و ژئوتکستایل در جعبه‌ی دستگاه برش مستقیم

Fig. 7. Schematic of wooden block and geotextile placement in direct shear box

۴- نتایج آزمایش

۴-۱- آزمایش تراکم خاک

در آزمایش تراکم پس از افزودن رطوبت به خاک، به منظور توزیع یکنواخت رطوبت در محیط خاک، نمونه به مدت ۲۴ ساعت در محیط بسته نگهداری و سپس بر اساس استاندارد ASTM D-698 آزمایش تراکم بر روی نمونه‌ها انجام شد. نمودار نتایج حاصل از آزمایش تراکم برای خاک و خاک الیاف دار در شکل ۸ آورده شده‌است. با افزایش درصد الیاف، رطوبت بهینه افزایش و چگالی خشک بیشینه کاهش یافته‌است. از آنجاکه چگالی الیاف نسبت به دانه‌های خاک کمتر است، با افزودن الیاف به خاک چگالی خشک بیشینه‌ی خاک کاهش یافته‌است. میزان رطوبت بهینه بسته به نوع الیاف و میزان جذب رطوبت آن می‌تواند متفاوت باشد. الیاف پلی‌پروپیلن میزان جذب رطوبت ناچیزی دارند؛ بنابراین افزایش رطوبت ممکن است به دلیل افزایش میزان تخلخل ناشی از افزودن الیاف باشد.

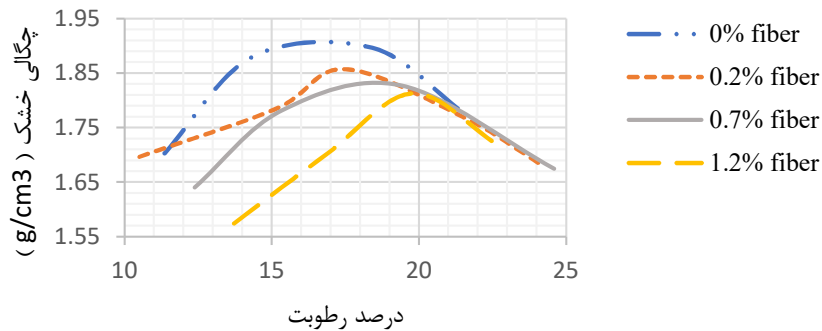
۴-۲- آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس خاک

مقاومت برشی خاک غیر مسلح با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس در تنش قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل ۹ آورده شده‌است. مقاومت برشی خاک الیاف دار نیز در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ آورده شده‌است. همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شد با افزایش تنش قائم مقاومت برشی خاک افزایش یافته‌است. با افزایش جابه‌جایی افقی تا ۳۰ میلی‌متر تنش برشی نیز افزایش یافته و کاهشی در روند آن مشاهده نشده‌است. این نوع رفتار در تنش برشی - جابه‌جایی برشی در برخی از مطالعات مشاهده

ساخته و درون جعبه پایینی دستگاه برش قرار داده شده‌است. برای جلوگیری از حرکت و جمع شدن ژئوتکستایل در طول آزمایش باید ژئوتکستایل در ابتدا و انتهای بلوک چوبی ثابت شود، با توجه به این موضوع طول ضلع بلوک چوبی اندکی کمتر از ضلع جعبه‌ی برش در نظر گرفته شده تا پس گیرداری ابتدا و انتهای ژئوتکستایل، امکان قرارگیری بلوک درون جعبه وجود داشته باشد. چگونگی قرارگیری ژئوتکستایل و بلوک چوبی در جعبه‌ی دستگاه برش مستقیم در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده‌است.

۳-۲- برش نمونه‌ها در شرایط بارگذاری - بدون باربرداری

پس از آماده‌سازی نمونه و افزودن آب و الیاف به خاک بر اساس روش ارائه شده در قسمت قبل، نمونه در سه لایه بر روی ژئوتکستایل متراکم گردیده تا به ارتفاع موردنظر برسد. بعد از پر کردن جعبه و تراز کردن دستگاه، تنش قائم به نمونه اعمال و پس از ثابت شدن تقریبی نشست، برش بر نمونه اعمال شده‌است. سرعت دستگاه در برش مستقیم بزرگ مقیاس ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه، تنش‌های قائم اعمالی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال و حداکثر جابه‌جایی افقی ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است. رطوبت استفاده شده رطوبت بهینه‌ی حاصل از آزمایش تراکم استاندارد نظیر هر آزمایش است.



شکل ۸: نتایج آزمایش تراکم مخلوط خاک و الیاف

Fig.8. Results of compaction test on mixture of soil and fibers

جدول ۴: مقاومت برشی و ضریب اندرکنش برای خاک - ژئوتکستایل نوع ۱

Table 4. Shear Strength and interaction coefficient for soil - geotextile type 1

درصد الیاف	$\sigma_n = 50 \text{ kPa}$		$\sigma_n = 100 \text{ kPa}$		$\sigma_n = 150 \text{ kPa}$	
	مقاومت برشی	ضریب اندرکنش	مقاومت برشی	ضریب اندرکنش	مقاومت برشی	ضریب اندرکنش
۰	۳۸/۷۱	۰/۷۳	۶۰/۱۵	۰/۷۴	۸۵/۴۸	۰/۶۹
۰/۲	۳۷/۰۳	۰/۷۱	۶۲/۷۳	۰/۷۰	۹۲/۵۲	۰/۷۵
۰/۷	۴۲/۶۵	۰/۸۰	۶۳/۵۸	۰/۸۰	۹۷/۵۰	۰/۷۵
۱/۲	۳۴/۵۸	۰/۶۹	۶۲/۹۰	۰/۸۱	۹۱/۸۳	۷۴/۰
$\sigma_n =$ تنش قائم						

شده‌اند. ضریب اندرکنش به صورت نسبت مقاومت برشی خاک مسلح به مقاومت برشی خاک در رابطه‌ی (۱) تعریف می‌گردد. این مقادیر با استفاده از نتایج آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس در رابطه جایگذاری شده‌است. در جدول ۵ پارامترهای مقاومت برشی برای فصل مشترک خاک - ژئوتکستایل در درصد الیاف مختلف آمده‌است.

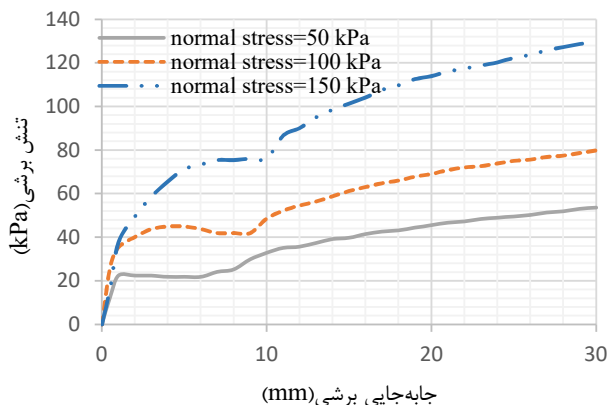
$$C_i = \frac{\tau_{soil-GT}}{\tau_{soil-soil}} \quad (1)$$

در این رابطه $C_i =$ ضریب اندرکنش، $\tau_{soil-GT} =$ مقاومت برشی فصل مشترک خاک - ژئوتکستایل و $\tau_{soil-soil} =$ در حالت بدون الیاف، مقاومت برشی خاک و در حالت الیاف‌دار، مقاومت برشی خاک الیاف‌دار است.

شده‌است [۹ و ۶].

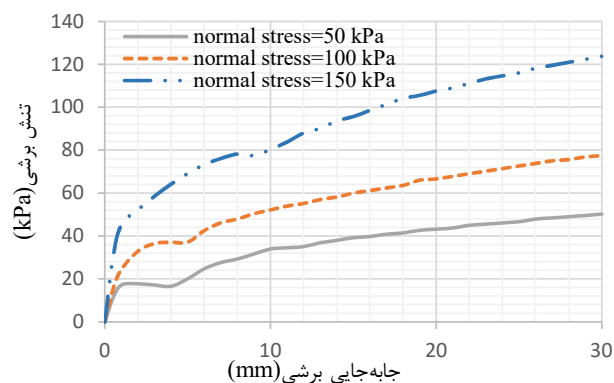
۳-۴- اثر الیاف بر اندرکنش خاک - ژئوتکستایل نوع ۱

نتایج مقاومت برشی فصل مشترک خاک - ژئوتکستایل نوع ۱ و خاک الیاف‌دار - ژئوتکستایل نوع ۱ در شرایط بارگذاری - بدون باربرداری در جدول ۴ آورده شده‌است. در استاندارد ASTM D-3080، دستورالعمل انجام آزمایش برش مستقیم، اشاره‌ای به اصلاح سطح تماس برشی نشده‌است؛ بنابراین نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس که در شکل ۹ آمده بدون اصلاح سطح است. استاندارد ASTM D-5321 در بررسی مقاومت برشی فصل مشترک خاک - ژئوستنتیک توصیه می‌کند که برای محاسبه‌ی تنش برشی، نیروی برشی به مساحت سطح تماس اصلاح شده در جابه‌جایی نظیر تقسیم گردد، که نتایج جدول ۴ بر این مبنا محاسبه



شکل ۱۱: منحنی تنش برشی - جابه‌جایی برشی خاک همراه با ۰/۷ درصد الیاف

Fig.11. Shear stress - shear displacement curve of soil with 0.7% fibers



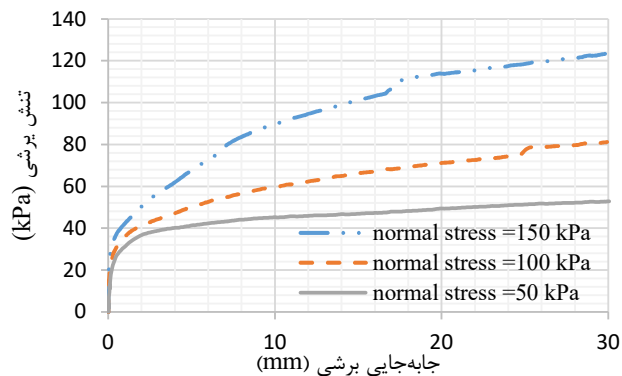
شکل ۱۲: منحنی تنش برشی - جابه‌جایی برشی خاک همراه با ۱/۲ درصد الیاف

Fig.12. Shear stress - shear displacement curve of soil with 1.2% fibers

با توجه به جدول ۴ و ۵ افزودن الیاف به خاک موجب کاهش چسبندگی، افزایش زاویه اصطکاک و در نتیجه افزایش مقاومت برشی فصل مشترک خاک - ژئوتکستایل شده‌است. در بین درصدهای الیاف بررسی شده، ۰/۷ درصد الیاف بیشترین ضریب اندرکنش را نتیجه داده که با توجه به جدول ۶ بیشتر بودن چسبندگی نسبت به سایر درصدها عامل این نتیجه است.

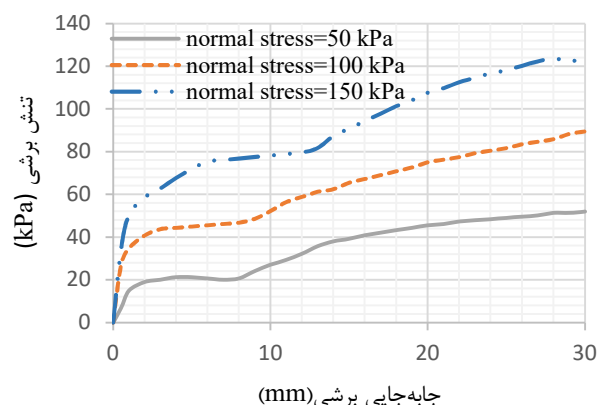
۴-۴- اندرکنش خاک-ژئوتکستایل نوع ۱ در شرایط بارگذاری - باربرداری

اثر افزودن الیاف بر اندرکنش خاک-ژئوتکستایل نوع ۱ در شرایط



شکل ۹: منحنی تنش برشی - جابه‌جایی برشی خاک بدون الیاف

Fig.9. Shear stress - shear displacement curve of soil without fibers



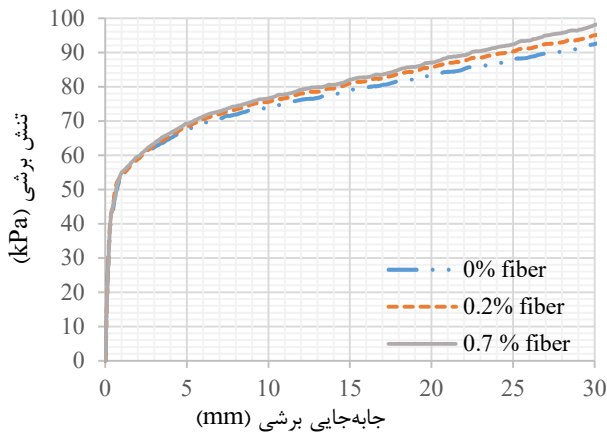
شکل ۱۰: منحنی تنش برشی - جابه‌جایی برشی خاک همراه با ۰/۲ درصد الیاف

Fig.10. Shear stress - shear displacement curve of soil with 0.2% fibers

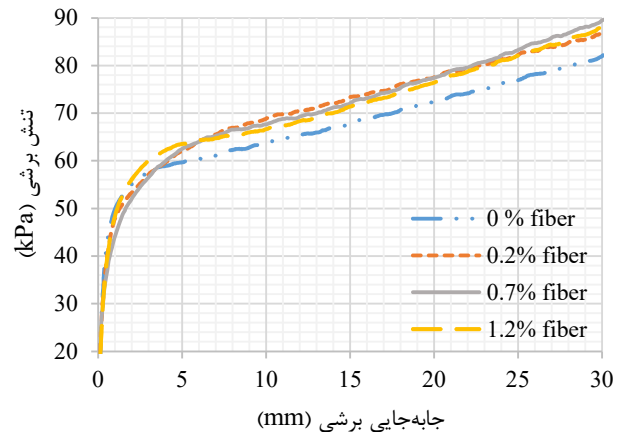
جدول ۵: پارامترهای مقاومت برشی خاک - ژئوتکستایل نوع ۱

Table 5. Shear strength parameters of soil - geotextile type 1

درصد الیاف	چسبندگی (کیلوپاسکال)	زاویه اصطکاک (درجه)
۰	۱۴/۶۸	۲۲.۸۳
۰/۲	۸/۶	۲۶.۵۴
۰/۷	۱۳/۰۶	۲۶.۲۸
۱/۲	۵/۸۵	۲۷.۲۵



شکل ۱۴: تأثیر الیاف بر اندرکنش خاک-ژئوتکستایل نوع ۱ در رطوبت ۱۷ درصد و تنش قائم ۳۰۰ کیلوپاسکال در شرایط بارگذاری-بازبارداری
 Fig.14. Effect of fibers on soil-geotextile type1 interaction in loading-reloading conditions ($\omega=17\%$ and normal stress =300 kPa)



شکل ۱۳: تأثیر الیاف بر اندرکنش خاک-ژئوتکستایل نوع ۱ در رطوبت ۱۷ درصد و تنش قائم ۲۰۰ کیلوپاسکال در شرایط بارگذاری-بازبارداری
 Fig.13. Effect of fibers on soil-geotextile type1 interaction in loading-reloading conditions ($\omega=17\%$ and normal stress =200 kPa)

جدول ۶: تأثیر جهت قرارگیری ژئوتکستایل بر مقاومت برشی

Table 6. Effect of geotextile orientation on shear strength

درصد الیاف نمونه	برش هم‌راستا با جهت طولی ژئوتکستایل	برش عمود بر جهت طولی ژئوتکستایل
۰	۸۸/۲۶	۸۲/۱۷
۰/۲	۹۰/۵۳	۸۶/۷۹
۰/۷	۹۲/۱۹	۸۹/۶۸

افزودن ۰/۷ درصد الیاف بیشترین مقاومت برشی و افزودن ۰/۲ و ۱/۲ درصد الیاف، مقاومت نسبتاً یکسانی را نتیجه داده‌اند؛ از این رو برای بررسی‌های بعدی تنها ۰/۲ و ۰/۷ درصد الیاف مورد توجه قرار گرفت. در شکل ۱۴، اثر افزایش تنش قائم در مرحله‌ی بارگذاری بر اندرکنش خاک - ژئوتکستایل نوع ۱ و خاک الیاف‌دار - ژئوتکستایل نوع ۱ نشان داده شده‌است. با افزایش تنش قائم اندرکنش خاک - ژئوتکستایل نوع ۱ افزایش ۱۲/۷ درصدی داشته‌است. افزایش تنش قائم در خاک همراه با ۰/۲ درصد الیاف و در خاک همراه با ۰/۷ درصد الیاف به ترتیب ۹/۵۶ و ۹/۴۷ درصد مقاومت برشی فصل مشترک را رشد داد. افزایش تنش قائم، درصد تراکم خاک و خاک الیاف‌دار را افزایش داده که بنابر نتایج تحقیقات، افزایش تراکم مقاومت برشی فصل مشترک را افزایش داده [۴-۶] که با نتایج این پژوهش مطابقت

بارگذاری - بازبارداری بررسی شد. در این آزمایش، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت با تنش قائم ۲۰۰ کیلوپاسکال بارگذاری و سپس با بازبارداری تا تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال، نمونه‌ها تحت برش قرار گرفت. جهت اعمال برش در دستگاه برش مستقیم در جهت عرض رول ژئوتکستایل بوده‌است. با مقایسه‌ی مقاومت برشی نهایی خاک-ژئوتکستایل افزایش به میزان ۳۶/۶ درصد در شرایط بارگذاری - بازبارداری نسبت به شرایط بارگذاری - بدون بازبارداری مشاهده شده‌است. افزایش مقاومت برشی در شرایط بارگذاری - بازبارداری را می‌توان به افزایش تراکم خاک مربوط دانست. افزودن الیاف به خاک، مقاومت برشی فصل مشترک خاک - ژئوتکستایل نوع ۱ را ۵/۶۷، ۹/۱۳ و ۷/۲ درصد به ترتیب برای ۰/۲، ۰/۷ و ۱/۲ درصد الیاف افزایش می‌دهد. نتایج تأثیر درصد الیاف در شکل ۱۳ آورده شده‌است. در بین سه درصد الیاف بررسی شده،

محمود و همکاران مشاهده شده است [۷].

۴-۴-۲- اثر رطوبت بر اندرکنش خاک-ژئوتکستایل

رطوبت یکی از عوامل تأثیرگذار در مقاومت برشی خاک است. در بخش قبل رطوبت همگی نمونه‌ها برابر با رطوبت بهینه‌ی خاک، در نظر گرفته شده بود. در این بخش رطوبت خاک را افزایش داده و آزمایش‌ها را برای فصل مشترک خاک-ژئوتکستایل نوع ۱، خاک به همراه ۰/۲ درصد الیاف - ژئوتکستایل نوع ۱ و خاک به همراه ۰/۷ درصد الیاف - ژئوتکستایل نوع ۱ تکرار و نتایج آن با رطوبت ۱۷ درصد در جدول ۷ مقایسه شده است. تنش قائم در مرحله‌ی بارگذاری ۲۰۰ کیلوپاسکال و پس از باربرداری تا ۱۰۰ کیلوپاسکال برش به نمونه‌ها اعمال شده است. رطوبت اندازه‌گیری شده‌ی نمونه‌ها پس از آزمایش نسبت به رطوبت اولیه در نظر گرفته شده متفاوت است. دلیل این اتفاق آن است که در طول آزمایش، شامل مراحل ساخت نمونه در جعبه‌ی برش، بارگذاری نمونه به مدت ۲۴ ساعت، اعمال برش و در نهایت خالی کردن جعبه‌ی برش، امکان از دست رفتن رطوبت خاک وجود دارد. از طرفی شرایط جوی محیط آزمایشگاه نیز در میزان تغییر رطوبت خاک در نمونه‌های مختلف تأثیرگذار است. با اندازه‌گیری میزان رطوبت نمونه‌ها بعد از اعمال برش مشاهده گردید که میزان رطوبت خاک در فصل مشترک کمتر از سایر نقاط جعبه است که این مشاهده نشان از جذب رطوبت توسط ژئوتکستایل و خاصیت زهکشی آن دارد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش رطوبت موجب کاهش مقاومت برشی فصل مشترک شده که این نتیجه مطابق با پژوهش‌های پیشین است [۳-۵]. در ۰/۲ درصد الیاف به دلیل افزایش بیشتر رطوبت، افت مقاومت بیش از سایر نمونه‌هاست.

۴-۵- اندرکنش خاک-ژئوتکستایل نوع ۲ در شرایط بارگذاری - باربرداری

آزمایش در شرایط بارگذاری - باربرداری با تنش قائم ۲۰۰ کیلوپاسکال در مرحله‌ی بارگذاری برای خاک، خاک به همراه ۰/۲ درصد و خاک به همراه ۰/۷ درصد الیاف تکرار و نتایج آن در شکل ۱۵ نشان داده شده است. تنش قائم در هنگام اعمال برش مشابه با آزمایش‌های قبل ۱۰۰ کیلوپاسکال بوده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش درصد الیاف مقاومت فصل مشترک نیز افزایش یافته است. این

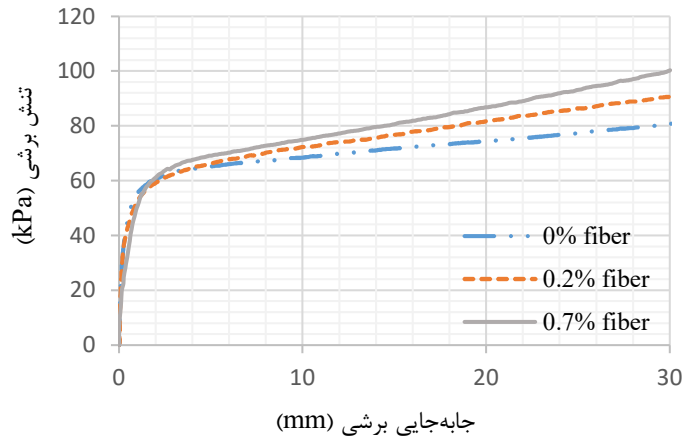
جدول ۷: مقاومت برشی مخلوط خاک و الیاف با درصد رطوبت‌های مختلف
Table ۷. Shear Strength of mixture of soil and fibers with different moisture content

رطوبت	مقاومت برشی (کیلوپاسکال)	درصد الیاف نمونه
۱۶/۵۳	۸۲/۱۷	۰
۱۸/۴۸	۷۸/۵۷	۰
۱۶/۲۵	۸۶/۷۹	۰/۲
۲۰/۲۷	۷۹/۲	۰/۲
۱۶/۸۱	۸۹/۶۸	۰/۷
۱۷/۴۱	۸۶/۲۴	۰/۷

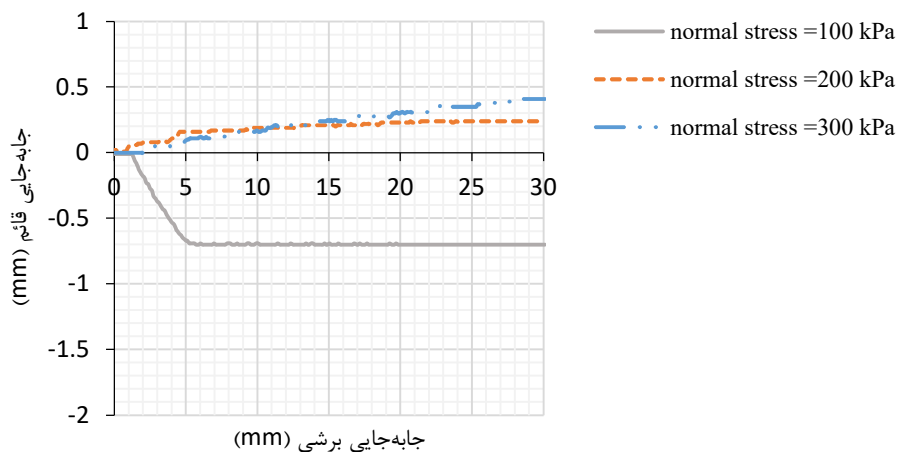
دارد. افزودن الیاف به خاک در جابه‌جایی‌های کمتر از ۵ میلی‌متر تأثیر چشمگیری بر تنش برشی ندارد و پس از وارد شدن به ناحیه‌ی خمیری و جابه‌جایی‌های بزرگ تأثیر الیاف بر مقاومت برشی ظاهر می‌گردد.

۴-۴-۱- اثر جهت قرارگیری ژئوتکستایل

ژئوتکستایل‌ها ممکن است در جهت طول و عرض رول تولید شده، دارای استحکام کششی متفاوتی باشند. بر اساس جدول ۳ ژئوتکستایل نوع ۱ نیز در جهت طولی و عرضی دارای استحکام کششی متفاوتی است. در این بررسی، برش در راستای طول رول اعمال و با نتایج برش در راستای عرضی رول ژئوتکستایل مقایسه شد. در این آزمایش نیز رطوبت موردبررسی رطوبت ۱۷ درصد، چگالی خشک خاک برابر با ۰/۸ چگالی خشک بیشینه‌ی حاصل از آزمایش تراکم استاندارد نظیر هر نمونه است. نمونه تا تنش قائم ۲۰۰ کیلو پاسکال به مدت ۲۴ ساعت بارگذاری و سپس تا ۱۰۰ کیلو پاسکال باربرداری شده و تحت تنش قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال برش انجام شده است. در جدول ۶ نتایج مقاومت برشی فصل مشترک در جهت طولی و عرضی ژئوتکستایل برای خاک و خاک الیاف‌دار با هم مقایسه شده است. با اعمال برش در جهت طول رول ژئوتکستایل، مقاومت برشی فصل مشترک برای خاک به همراه ۰، ۰/۲ و ۰/۷ درصد الیاف به ترتیب ۷/۴، ۴/۳، ۲/۸ درصد افزایش را نشان می‌دهد. با توجه به برابر بودن شرایط آزمایش‌ها، به نظر می‌رسد افزایش استحکام کششی ژئوتکستایل در افزایش مقاومت برشی فصل مشترک تأثیرگذار است. مشابه این نتایج در مطالعه‌ی



شکل ۱۵: تأثیر الیاف بر اندرکنش خاک-ژئوتکستایل نوع ۲ در رطوبت ۱۷ درصد و شرایط بارگذاری - باربرداری
 Fig.15. Effect of fibers on soil-geotextile type2 interaction ($\omega=17\%$ and loading - reloading conditions)



شکل ۱۶: تغییر شکل قائم نمونه‌های خاک بدون الیاف تحت برش
 Fig. 16. Vertical displacement of soil samples under shear

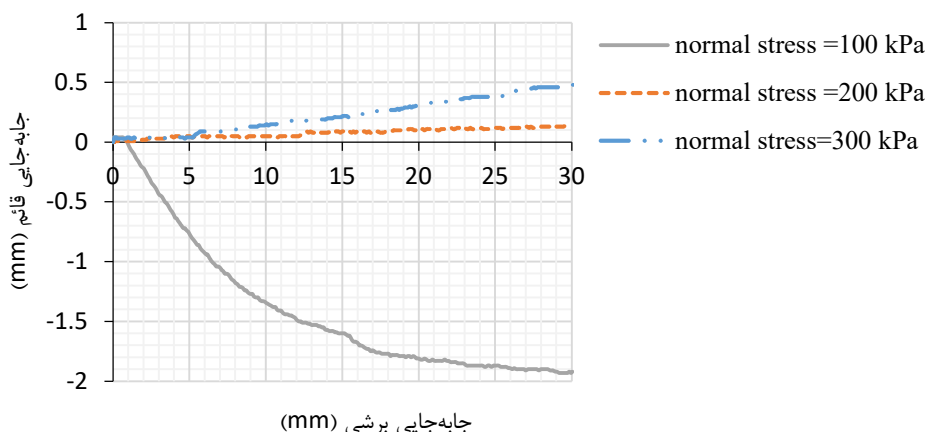
است به عنوان یکی از پارامترهای مهم در بررسی اندرکنش خاک - ژئوسنتتیک معرفی می‌گردد. در شرایط بارگذاری - بدون باربرداری، تنها نشست در نمونه مشاهده شده و میزان این نشست با افزایش تنش قائم افزایش یافته‌است. در شکل ۱۶-۱۸ تغییر حجم نمونه‌ها در شرایط مختلف آورده شده‌است. اتساع در هنگام برش به غلتش^۱ و قفل شدگی^۲ ذرات در فصل مشترک مربوط است. در نمونه‌هایی که تنها نشست مشاهده شده، قفل شدگی کافی ذرات خاک در میان الیاف ژئوتکستایل به وجود نیامده و اعمال یک پیش بارگذاری به نمونه‌ها باعث افزایش درصد تراکم و قفل شدگی بیشتر ذرات در سطح

افزایش برای ۰/۲ و ۰/۷ درصد الیاف به ترتیب ۱۱/۴ و ۲۳/۲ درصد بود. در مقایسه‌ی مقاومت برشی خاک-ژئوتکستایل نوع ۱ با خاک-ژئوتکستایل نوع ۲ تغییری زیادی وجود ندارد؛ اما در خاک الیاف‌دار برای ۰/۲ درصد الیاف ۴/۵ درصد و برای ۰/۷ درصد الیاف ۱۱/۹ درصد افزایش مقاومت در ژئوتکستایل نوع ۲ نسبت به ژئوتکستایل نوع ۱ مشاهده شده‌است. که این افزایش را می‌توان به استحکام کششی بیشتر ژئوتکستایل نوع ۲ مربوط دانست.

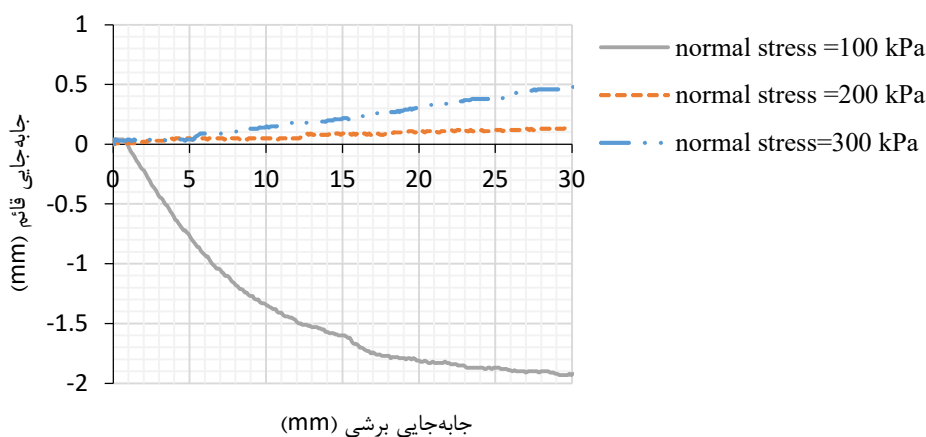
۴-۶- بررسی تغییر حجم نمونه در برش

جاب‌جایی قائم خاک که بیان‌گر تغییر حجم نمونه در طول برش

1 Rolling
 2 Interlocking



شکل ۱۷: تغییر شکل قائم نمونه‌های خاک به همراه ۰/۲ درصد الیاف
Fig.17. Vertical displacement of soil mix with 0.2% fiber samples



شکل ۱۸: تغییر شکل قائم نمونه‌های خاک به همراه ۰/۷ درصد الیاف
Fig.18. Vertical displacement of soil mix with 0.7% fiber samples

نتایج با یکدیگر مقایسه گردند. در شکل ۱۹ یک نمونه از آزمایش‌های تکرار شده برای خاک به همراه ۰/۷ درصد الیاف مسلح به ژئوتکستایل نوع ۱ در شرایط بارگذاری - باربرداری با تنش قائم ۲۰۰ کیلوپاسکال در مرحله بارگذاری و رطوبت ۱۷ درصد آورده شده‌است. مقایسه‌ی بین نتایج در بخش‌های پیشین بر اساس مقاومت برشی نهایی که متناظر جابه‌جایی ۳۰ میلی‌متر است، انجام شده‌است؛ بنابراین با توجه به شکل ۱۹ نتایج در آزمایشگاه با دقت قابل قبولی انجام شده‌است.

۶- نتیجه‌گیری

با هدف بهبود مقاومت برشی خاک رس- ژئوتکستایل، الیاف به خاک افزوده شد. آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس در شرایط

ژئوتکستایل خواهد شد؛ بنابراین در شرایط بارگذاری - باربرداری، در هنگام برش، تمایل به اتساع در نمونه‌ها مشاهده شده و افزایش تنش قائم در مرحله بارگذاری، میزان اتساع را افزایش داده‌است.

۵- بررسی دقت نتایج آزمایش

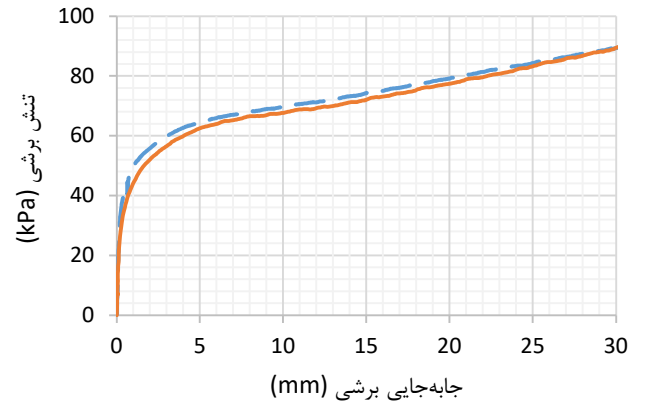
تکرارپذیری معیاری برای بیان درستی روش آزمایش محسوب می‌شود. در صورتی که با یک احتمال معین (مثلاً ۹۵ درصد) قدر مطلق اختلاف بین دو نتیجه‌ی آزمایش در شرایط یکسان از نظر نحوه‌ی آماده‌سازی نمونه‌ها، مجری آزمایش و دستگاه مورد استفاده از مقدار معینی (مثلاً ۵ درصد) کوچک‌تر باشد، آن آزمایش تکرار پذیر خواهد بود [۳۱]. بدین منظور لازم است برخی از آزمایش‌ها تکرار و

صرف نظر است.

۷. با بارگذاری - باربرداری اتساع نمونه‌ها در برش مشاهده می شود.

مراجع

- [1] S. Haeri, R. Noorzad, A. Oskoorouchi, Effect of geotextile reinforcement on the mechanical behavior of sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 18(6) (2000) 385-402.
- [2] N. Moraci, G. Cardile, D. Giofrè, M.C. Mandaglio, L.S. Calvarano, L. Carbone, Soil geosynthetic interaction: design parameters from experimental and theoretical analysis, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 1(2) (2014) 165-227.
- [3] M. Lopes, Soil-geosynthetic interaction *Geosynthetics and their Applications* ed SK Shukla, in, London: Thomas Telford, 2002.
- [4] Q. Yan, C. Li, Y. Mei, W. Deng, Study on the characteristics of geogrids/soil interface, in: *Mechanic Automation and Control Engineering (MACE)*, 2010 International Conference on, IEEE, 2010, pp. 1241-1248.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] A. Mahmood, N. Zakaria, F. Ahmad, Studies on geotextile/soil interface shear behavior, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 5 (2000).
- [8] Anubhav, P. Basudhar, Modeling of soil-woven geotextile interface behavior from direct shear test results, *Geotextiles and Geomembranes*, 28(4) (2010) 403-408.



شکل ۱۹: بررسی دقت نتایج آزمایش
Fig.19. accuracy control of test results

عادی و شرایط بارگذاری - باربرداری انجام پذیرفت. در این راستا از ضایعات نخ پلی پروپیلن در ترکیب با خاک و دو نوع ژئوتکستایل بدون بافت در مسلح سازی خاک استفاده شد. اثر تنش قائم، نوع و استحکام کششی ژئوتکستایل و درصد رطوبت بر مقاومت برشی فصل مشترک رس-ژئوتکستایل بررسی شد. در شرایط بارگذاری - باربرداری، تنش قائم در هنگام برش ۱۰۰ کیلوپاسکال بوده است. نتایج این مطالعه عبارتند از:

۱. با افزودن الیاف به خاک ضریب اندرکنش خاک-ژئوتکستایل افزایش می یابد. تحت تنش قائم ۱۵۰، ۱۰۰ و ۵۰ کیلوپاسکال ضریب اندرکنش از ۰/۶۹، ۰/۷۴ و ۰/۷۳ برای خاک بدون الیاف به ترتیب، به مقدار ۰/۷۵، ۰/۸۰ و ۰/۸۰ در نمونه ای با ۰/۷ درصد الیاف رسید.
۲. شرایط بارگذاری - باربرداری نمونه ها موجب افزایش مقاومت برشی خاک-ژئوتکستایل و خاک الیاف دار-ژئوتکستایل می شود.
۳. افزودن الیاف به خاک مقاومت فصل مشترک رس-ژئوتکستایل نوع ۱ را تا بیش از ۹ درصد در شرایط بارگذاری - باربرداری افزایش داد.
۴. استحکام کششی ژئوتکستایل نقش چشمگیری بر مقاومت برشی خاک دارد. در ژئوتکستایل نوع ۲ با استحکام کششی ۲ برابر نسبت به ژئوتکستایل نوع ۱ و در ۰/۷ درصد الیاف در ترکیب با خاک، مقاومت برشی فصل مشترک تا بیش از ۲۰ درصد افزایش یافت.
۵. با افزایش میزان رطوبت مقاومت برشی فصل مشترک خاک-ژئوتکستایل کاهش می یابد.
۶. تأثیر الیاف بر مقاومت خاک در تغییر شکل های کوچک قابل

- Polypropylene and Carbon Fibre Reinforced Cohesive Soils, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 7(20) (2014) 4327-4342.
- [20] A.S. Zaimoglu, T. Yetimoglu, Strength behavior of fine grained soil reinforced with randomly distributed polypropylene fibers, *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(1) (2012) 197-203.
- [21] ASTM D422-63, Standard test method for particle-size analysis of soils, (2002).
- [22] ASTM D854 – 10, Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer, ASTM International, (2010).
- [23] ASTM D427, Standard test method for shrinkage factors of soils by the mercury method, *Annual book of ASTM Standards*, 4 (2003) 21-24.
- [24] ASTM D4318, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, ASTM international, (2010).
- [25] D. ASTM D698-00a, Standard test methods for laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials, (2000) 1-7.
- [26] ASTM D2487, Testing, Materials, Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System), (2000).
- [27] S. Mali, B. Singh, Strength behaviour of cohesive soils reinforced with fibers, *International Journal of Civil Engineering Research*, 5(4) (2014) 353-360.
- [28] ASTM D5321/D5321M,, Standard test method for determining the shear strength of soil-geosynthetic and geosynthetic-geosynthetic interfaces by direct shear,(2014).
- [29] ASTM D3080, Testing, Materials, Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions, (1998).
- [30] J. Ghaffari, Experimental investigation of time effect on shear strength parameters of soil-geosynthetic interface, PhD thesis, K.N. Toosi university of
- [9] M.B. Hossain, M.Z. Hossain, T. Sakai, Interaction properties of geosynthetic with different backfill soils, *International Journal of Geosciences*, 3(05) (2012) 1033.
- [10] Anubhav, P. Basudhar, Interface behavior of woven geotextile with rounded and angular particle sand, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(12) (2013) 1970-1974.
- [11] Anubhav, H. Wu, Modelling of non-linear shear displacement behaviour of soil-geotextile interface, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 1(2) (2015) 19.
- [12] P. Vangla, M.L. Gali, Effect of particle size of sand and surface asperities of reinforcement on their interface shear behaviour, *Geotextiles and Geomembranes*, 44(3) (2016) 254-268.
- [13] 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.
- [15] M. Abedi, M. Arjmand, A. Hajiannia, Experimental study of the effect of geotextile layers on the improvement of soil-geogrid interaction in clay reinforced with geosynthetic, *International Conference on Civil Engineering , Architecture and Urban Cityscape*, (2016). (in persian).
- [16] S.M. Hejazi, M. Sheikhzadeh, S.M. Abtahi, A. Zadhoush, A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers, *Construction and building materials*, 30 (2012) 100-116.
- [17] C.S. Priya, S. Archana, A.B. Albert, A. Deeraj, Stabilization of clayey soil using polypropylene fiber, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(4) (2017) 1252-1255.
- [18] A. Estabragh, S. Ranjbari, A. Javadi, Properties of clay soil and soil cement reinforced with polypropylene fibers, in, *American Concrete Institute*, 2017.
- [19] C.A. Anagnostopoulos, D. Tzetzis, K. Berkettis, Evaluation of the Shear Strength Behaviour of

strength parameters of clay-geosynthetic interface,
Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, 27(108)
(2018). (in persian).

technology, (2013). (in persian).

[31] N. Mahboobimotlagh, A. Mahboobiardakani,
Evaluation of the effect of adding lime to shear

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

B. Ebrahimi Alavijeh, R. Pour-Hoseini Ardakani, Investigation of Shear Strength of Clay Soil – Geotextile by Adding the BCF Waste Fibers, Amirkabir J. Civil Eng., 52(8) (2020) 1907-1922.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15719.6008](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15719.6008)

