

# ارزیابی پارامترهای مقاومت برشی سطح مشترک بتن و آسفالت بازیافتی و ژئوگرید با استفاده از آزمایش برش مستقیم

حسین حیرتی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمود حسنلواد\* (دانشیار)

علیرضا اردکانی (دانشیار)

دانشکده فنی همدسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۱ (دوره ۲ - شماره ۱/۲، ص. ۳۰-۲۷، پژوهشی)

در پژوهش حاضر، خصوصیات مقاومت برشی سطح تماس مشترک مصالح بازیافتی، شامل بتن و آسفالت، با ژئوگرید به عنوان مصالح خاکریز جایگزین در سازه‌های خاک مسلح با استفاده از آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس بررسی شده است. در کنار مصالح بازیافتی بتن و آسفالت، از یک مصالح طبیعی با مشخصات فیزیکی و دانه‌بندی تقریباً یکسان با طبقه‌بندی SW جهت مقایسه استفاده شده است. سه نوع ژئوگرید تک‌سویه، به عنوان مصالح‌کننده آزمایش شدند و نتایج نشان داد که مصالح بازیافتی مذکور با زاویه اصطکاک داخلی بیشتر از ۴۰ درجه، پتانسیل خوبی برای استفاده در سازه‌های خاک مسلح دارند و می‌توان آن‌ها را با ملاحظات به جای مصالح طبیعی استفاده کرد، هر چند که تفاوت‌هایی در رفتار برشی دارند. آزمایش‌ها نشان دادند که مقاومت کششی ژئوگرید، تأثیر چندانی در مقاومت برشی سطح تماس ندارد. درگیری دانه‌ها با ژئوگرید باعث افزایش مقاومت برشی سطح تماس و ضریب اندرکنش شده است، به طوری که ضریب مقاومت برشی برای مصالح مذکور، بزرگ‌تر از ۱ به دست آمد که نشان‌دهنده‌ی اندرکنش قوی بین ژئوگرید و مصالح بازیافتی است.

واژگان کلیدی: ژئوگرید، اندرکنش، خاک مسلح، برش مستقیم بزرگ مقیاس، مصالح بازیافتی.

heiratyhosein.1993@gmail.com  
hassanlou@eng.ikiu.ac.ir  
a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir

## ۱. مقدمه

کشور ما نیز مستثنی از این قضیه نیست. سالانه، میلیون‌ها تن نخاله‌های ساختمانی و روسازی در ایران تولید می‌شود که فرجامی بهتر از مکان‌های دفن زباله<sup>۱</sup>، کنار جاده‌ها و دشت‌ها ندارد.<sup>[۲]</sup> آمار ارائه شده از سوی سازمان مدیریت پسماند حاکی از آن است که در شهر تهران روزانه بین ۳۳ تا ۳۵ هزار تن پسماند ساختمانی تولید می‌شود. در جدول ۱، میزان تولید متوسط نخاله‌ی ساختمانی از سال ۹۵ تا ۹۹ در شهر تهران ارائه شده است.<sup>[۳]</sup> از بارزترین مصالح بازیافتی می‌توان به سنگ‌دانه‌های بتن خردشده (RCA)<sup>۲</sup> و سنگ‌دانه‌های آسفالت بازیافتی روسازی (RAP)<sup>۳</sup> اشاره کرد که از بازسازی یا تخریب جاده‌های بتنی، باند فرودگاه‌ها، سازه‌های پل، ساختمان‌ها و آسفالت روسازی به دست می‌آیند.<sup>[۴]</sup> یکی از مهم‌ترین موانع استفاده‌ی مجدد از مصالح بازیافتی، برداشت عموم از این است که مصالح بازیافتی در مقایسه با سنگ‌های طبیعی، ضعف و دوام کمتری دارند. در حالی که این مسئله ممکن است تا حدی صحیح باشد؛ بنابراین باید قبل از استفاده از مصالح بازیافتی، رویکردی برای بهبود عملکرد مصالح مذکور اتخاذ شود. یکی از رویکردهای اشاره شده، انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی

استفاده‌ی صحیح از منابع طبیعی، یکی از ارکان اساسی توسعه‌ی پایدار جوامع مدرن است. کاهش استخراج منابع تجدیدناپذیر طبیعی، یک نگرانی دائمی در رابطه با حفظ محیط‌زیست است و استفاده از مصالح بازیافتی را تشویق می‌کند. هر ساله، تخریب و نوسازی ساختمان‌ها و راه‌ها، حجم زیادی از مصالح ضایعاتی را تولید می‌کنند. مصالح ضایعاتی بازیافتی، یکی از عوامل اصلی آلودگی محیط‌زیست هستند و از طرفی ذخیره و دیوی آن‌ها، سطح قابل توجهی از زمین‌های با ارزش را اشغال می‌کند. مطالعات نشان می‌دهد که نخاله‌های ساختمان، ۵۰٪ از حجم کل مصالح ضایعاتی دنیا را تشکیل می‌دهند.<sup>[۱]</sup> اخیراً مطالعات متعددی برای ارزیابی امکان استفاده از مصالح بازیافتی به عنوان مصالح جایگزین در کارهای مهندسی ژئوتکنیک، مانند: ساخت اساس و زیرساز جاده‌ها، بهسازی زمین، ستون‌های سنگی و سازه‌های خاک مسلح صورت گرفته است.<sup>[۲]</sup>

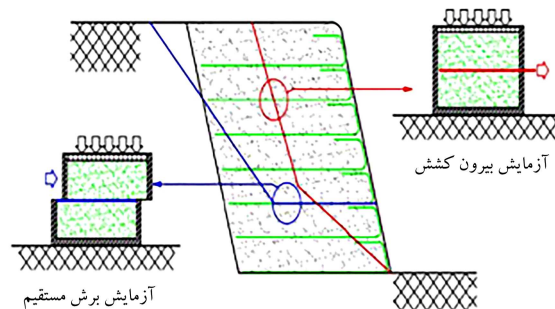
\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۵/۳۱، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۱/۱۶، پذیرش ۱۴۰۰/۱۲/۱۰

DOI:10.24220/J30.2022.59660.3065

جدول ۱. نرخ تولید متوسط نخاله‌های ساختمانی و عمرانی در شهر تهران (اعداد بر حسب تن).

سال	۹۵	۹۶	۹۷	۹۸	۹۹
متوسط	۵/۶۱	۵/۸۶	۵/۴۱	۳۵/۲	۳۲/۳



شکل ۱. مکانیسم اندرکنش بین خاک و ژئوستتیک.

است. [۴] آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس<sup>۴</sup>، یک جایگزین ارزان و مناسب برای آزمایش خاک‌های مسلح شده در یک محیط در مقایسه با آزمون‌های سه‌محورهی بزرگ مقیاس یا آزمون‌های میدانی است که نتایج خوبی را ارائه می‌دهد. آزمایش برش مستقیم، معایبی، از جمله: اجباری بودن صفحه‌ی برش، کرنش برشی غیریکنواخت در ارتفاع نمونه و توزیع غیریکنواخت تنش‌ها در صفحه‌ی برش دارد. [۵] ژئوگریدها<sup>۵</sup>، مصالح مسلح‌کننده‌ی ژئوستتیک هستند که از اندازه‌های مختلف چشمه تشکیل شده‌اند و نوارهای پلیمری عرضی و طولی دارند. ژئوگریدها، سختی خاک را از طریق درهم فرورفتگی ذرات در چشمه‌های ژئوگرید بهبود می‌بخشند. تماس بین ژئوگرید و مصالح متراکم، مقاومت در برابر برش سطح تماس را افزایش می‌دهد. رفتار سطح بین ژئوگرید - ذرات خاک به عوامل زیادی، از جمله: دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها و خصوصیات شکل‌ها، نوع و خصوصیات ژئوگرید، انرژی برای تراکم در هنگام نصب و شرایط بارگذاری بستگی دارد. [۶] یکی از موضوعات مهم کلیدی در طراحی سازه‌های خاک مسلح، اندرکنش<sup>۶</sup> بین خاک و مسلح‌کننده است که اغلب با استفاده از آزمایش بیرون کشش و برش مستقیم تعیین می‌شود. زمانی که مصالح دانه‌یی با ژئوگرید مسلح می‌شوند، مدهای گسیختگی مصالح ژئوگرید با پارگی، گسیختگی لغزشی و گسیختگی بیرون کشش همراه است. گسیختگی پارگی زمانی رخ می‌دهد که تنش کششی در ژئوگرید از تنش کششی آن بیشتر شود. از طرف دیگر، گسیختگی لغزشی به دلیل حرکت ذرات بر روی ژئوگرید اتفاق می‌افتد و توسط مقاومت برشی سطح تماس کنترل می‌شود. در گسیختگی بیرون کشش، ژئوگرید به سمت بیرون از توده‌ی خاک کشیده می‌شود. [۷] در شکل ۱، می‌توان مکانیسم گسیختگی یک شیب تند و مناسب‌ترین آزمون آزمایشگاهی را برای تعیین خصوصیات اندرکنش مشاهده کرد. [۸]

توهمایا<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۰۲)، مطالعاتی بر روی ویژگی‌های مقاومت برشی مصالح بازیافتی و بررسی عملکرد آن‌ها با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس با ابعاد ۳۰۵ × ۳۰۵ میلی‌متر بر روی مصالح بازیافتی با و بدون مسلح‌کننده انجام دادند و دریافتند که وجود مسلح‌کننده‌ها در مصالح بازیافتی مانند بتن خرد شده و بقایای ساختمانی خرد شده منجر به افزایش قابل توجه مقاومت در برابر برش مصالح شده است. علاوه بر این، تغییر شکل نمونه تا حدودی کنترل شده است. زاویه‌ی اصطکاک مصالح بازیافتی خرد شده بدون مسلح‌کننده در حالت مرطوب و خشک به ترتیب ۳۵ و ۳۹ درجه و هنگام مسلح شدن با ژئوگرید در حالت مرطوب و خشک

به ترتیب برابر با ۴۴ و ۴۹ درجه بوده است. [۴] رانجه<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۰۶)، مناسب بودن RCA را به عنوان مصالح خاکریز با نوارهای فلزی ارزیابی کردند و گزارش دادند که RCA، یک مصالح خاکریز مناسب برای استفاده در دیوارهای خاکی مکانیکی تثبیت شده (MSE)<sup>۹</sup> است. [۹] لیو<sup>۱۰</sup> و همکاران (۲۰۰۹)، اندرکنش ماسه و ژئوگرید را با آزمایش برش مستقیم ارزیابی کردند و دریافتند که اندرکنش بین خاک و ژئوستتیک شامل سه مکانیسم است که عبارت‌اند از: [۱۰]

۱. مقاومت برشی بین خاک ژئوستتیک؛

۲. مقاومت برشی داخلی خاک (داخل چشمه)؛

۳. مقاومت مقاوم نوارهای عرضی (مقاومت پاسیو).

آرول راجه<sup>۱۱</sup> و همکاران (۲۰۱۴)، با انجام آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس معمولی در بررسی خواص مقاومت برشی سطح تماس مصالح ساختمانی بازیافت شده و تخریب (C&D)<sup>۱۲</sup>، از جمله: سنگدانه‌های بتن بازیافت شده (RCA)، آسفالت روسازی بازیافتی (RAP) و آجر خرد شده (CB)<sup>۱۳</sup> با مسلح کردن توسط دو نوع ژئوگرید (دومحوره و سه‌محوره) به این نتیجه رسیدند که خصوصیات مقاومت برشی سطح تماس بیشینه<sup>۱۴</sup> و باقیمانده‌ی<sup>۱۵</sup> RCA غیرمسلح و مسلح با ژئوگرید بالاتر از مصالح CB و RAP بوده و ژئوگرید سه‌محوره نسبت به ژئوگرید دومحوره، مقاومت برشی سطح تماس بالاتری داشته است. همچنین نتایج آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس معمولی نشان داد که خواص مقاومت برشی سطح تماس مصالح بازیافتی مسلح شده به ژئوگرید کمتر از مصالح بازیافتی بدون مسلح‌کننده است. [۱۱] سلیمان بیگی و همکاران (۲۰۱۸)، خواص مکانیکی و هیدرولیکی سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی را برای استفاده به عنوان خاکریز در دیوارهای خاک مسلح (MSE) با دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس، دستگاه بیرون کشش و همچنین سه‌محوری زهکشی شده برای به دست آوردن خصوصیات مکانیکی اندرکنش مصالح RCA با ژئوستتیک‌های مختلف انجام دادند و دریافتند که RCA - ژئوگرید تک‌محوره، بالاترین زاویه‌ی اصطکاک سطح تماس را داشته است. RCA مسلح شده، ظرفیت بیرون کشش قابل مقایسه‌یی با شن و ماسه‌ی مسلح شده نشان داده است. [۱۲] سلیمان بیگی و همکاران (۲۰۱۹)، خواص مکانیکی سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی و آسفالت بازیافتی را برای استفاده به عنوان خاکریز در دیوارهای مکانیکی تثبیت شده ارزیابی کردند. ایشان آزمایش‌های سه‌محوری بزرگ مقیاس، برش مستقیم و بیرون کشش را برای بررسی اندرکنش مصالح مذکور با ژئوستتیک و نیز آزمایش سه‌محوری را برای ارزیابی پتانسیل خزش برای نمونه‌ی RAP انجام دادند. ژئوستتیک استفاده شده در پژوهش مذکور از نوع ژئوگرید (تک‌محوره و دومحوره) و یک نوع ژئوتکتایل بود.

نتایج ایشان نشان داد که مصالح بازیافتی RCA و RAP متراکم شده به ترتیب دارای زاویه‌ی اصطکاک داخلی ۴۹ و ۲۹ درجه بوده‌اند، که در محدوده‌ی گزارش شده در ادبیات است. همچنین مصالح مذکور، زاویه‌ی اصطکاک اندرکنش بالاتری با ژئوگرید نسبت به ژئوتکتایل به نمایش گذاشتند. هیچ لغزشی بین ژئوتکتایل - RCA و ژئوگرید - RCA مشاهده نشده و گسیختگی‌ها به دلیل پارگی ژئوتکتایل و ژئوگرید در طول آزمایش بیرون کشش بوده است. ضریب اندرکنش RCA نسبت به RAP با ژئوستتیک‌ها بیشتر بوده و همچنین ضرایب اندرکنش با افزایش تنش نرمال افزایش یافته است. نتایج حاصل از آزمایش خزش نشان داد که RAP متراکم شده، کرنش انحرافی زیادی را تحت تنش انحرافی متحمل شده از خود نشان داده است. ایشان استفاده از RAP و RCA در خاکریز دیوارهای خاک مسلح (MSE) را توصیه کرده‌اند، البته اگر و فقط اگر با ژئوگرید مسلح شود. برای جلوگیری از

سطح تماس مشترک مصالح و ژئوستنتیک‌ها و ضریب اندرکنش است. به عبارت دقیق‌تر، امکان استفاده از مصالح بتن و آسفالت بازیافتی به‌عنوان مصالح جایگزین در خاکریز دیوارهای خاک مسلح از نوآوری‌های پژوهش حاضر به‌شمار می‌آید.

## ۲. مصالح استفاده شده

### ۱.۲. مصالح خاکی

به منظور انجام پژوهش حاضر از دو نوع مصالح بازیافتی: سنگدانه‌های بتن بازیافتی (RCA) و سنگدانه‌های آسفالت بازیافتی (RAP)، و همچنین از مصالح طبیعی (NA) برای مقایسه استفاده شده است. در شکل ۲، تصویر مصالح استفاده شده مشاهده می‌شود. سنگدانه‌های بتن بازیافتی از مکعب‌های بتنی حاصل از نمونه‌گیری از ساختمان‌ها از آزمایشگاه استحکام بتن واقع در استان قزوین تهیه شده‌اند. مکعب‌های بتنی مذکور، دارای مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال با عمل‌آوری ۹۰ روزه بودند. مکعب‌های بتنی در دستگاه خردکن در کارخانه‌ی آسفالت استان قزوین در ۱۵ کیلومتری جاده‌ی بوئین‌زهر خرد شدند. سنگدانه‌های آسفالت بازیافتی از اداره‌ی راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ی استان قزوین تهیه شدند. آن‌ها از تراشیدن روسازی جاده‌ها (بزرگراه‌ها، جاده‌های اصلی) توسط دستگاه آسفالت تراش با یک‌بار عبور ماشین تا عمق بیشینه‌ی ۲۰ سانتی‌متر برداشته شدند. مصالح طبیعی از آزمایشگاه بتن دانشگاه بین‌الملل امام خمینی (ره) تهیه شده‌اند. آزمایش‌های فیزیکی، همچون: دانه‌بندی، تعیین چگالی دانه‌های جامد ( $G_s$ )، جذب آب، درجه pH به منظور تعیین ویژگی‌های مصالح و همچنین برای تعیین وزن مخصوص بیشینه و رطوبت بهینه، آزمایش تراکم اصلاح شده طبق استانداردهای مرتبط انجام شده‌اند. خصوصیات فیزیکی مصالح در جدول ۲ ارائه شده‌اند. به منظور ارزیابی و مقایسه‌ی بهتر هر سه مصالح، دانه‌بندی تقریباً یکسان در نظر گرفته شده است.



الف) RCA؛



ب) RAP؛



ج) NA.

شکل ۲. تصویر مصالح خاکی استفاده شده.

گسیختگی خزش RAP متراکم‌شده، بیشینه‌ی تنش انحرافی در خاکریز باید به  $80\%$  مقاومت فشاری RAP محدود شود.<sup>[۱۳]</sup> مهرجاردی و همکاران (۲۰۲۰)، مطالعاتی برای ارزیابی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مصالح CDW<sup>۱۶</sup> برای استفاده در زیرساز جاده‌ها انجام دادند. ایشان از نخاله<sup>۱۷</sup> و سنگدانه‌ی بتن بازیافتی (RCA) که از محل دفن زباله‌ی ابعلی در استان تهران پس از جداسازی مصالح زائد به‌دست آمده بود، استفاده کردند. آزمایش‌هایی چون دانه‌بندی، حدود اتربرگ، نسبت باربری کالیفرنیا، و برش مستقیم و نیز چندین آزمایش بارگذاری چرخه‌ی (سیکلی) برای ارزیابی اثربخشی مسلح‌کننده‌ی ژئوسل در ظرفیت تحمل مصالح CDW انجام دادند و دریافتند که خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مصالح CDW با بیشتر ضوابط و معیارهای استاندارد‌ها برای استفاده به‌عنوان مصالح زیرساز در ساخت جاده‌ها قابل قبول است.<sup>[۱۴]</sup>

سودپنگ<sup>۱۸</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، برای ارزیابی رفتار برشی سطح تماس بین سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی و ژئوگرید در کاربردهای روسازی، با استفاده از آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس (۲۰۴ × ۳۰۵ × ۳۰۵ میلی‌متر)، اثر اندازه‌ی چشمه، مقاومت کششی ژئوگرید و دانه‌بندی را در اندرکنش ژئوگرید و مصالح بازیافتی بتن بررسی کردند. ایشان از سه نوع ژئوگرید دوجوره با اندازه‌های مختلف چشمه و مقاومت کششی متفاوت و دو نوع نمونه‌ی بتن بازیافتی با دانه‌بندی‌های متفاوت استفاده کردند و دریافتند که: (۱) مقاومت کششی ژئوگریدها، تأثیر کمی در مقاومت برشی سطح تماس دارد، زیرا ژئوگریدها در طول آزمایش برش به حالت گسیختگی نمی‌رسند. (۲) اندازه‌ی ذرات مصالح بتن بازیافتی و اندازه‌ی چشمه‌ی ژئوگرید در مقاومت برشی تأثیرگذار است. عرض چشمه‌ی بزرگ‌تر باعث بیشتر شدن مقاومت برشی در سطح تماس می‌شود. (۳) ژئوگرید از حرکات ذرات جلوگیری می‌کند، لذا سُر خوردن و داخل هم فرو رفتن ذرات RCA بیشتر می‌شود که این امر با رفتار اتساعی ذرات در جابه‌جایی عمودی در مقابل جابه‌جایی برشی قابل‌مشاهده است.<sup>[۷]</sup>

اومچای<sup>۱۹</sup> و همکاران (۲۰۲۱)، نیز اثر نسبی اندازه‌ی سنگ‌دانه‌های آسفالت بازیافتی و چشمه‌های ژئوگرید را در پارامترهای مقاومت برشی سطح مشترک به کمک آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس بررسی کردند.<sup>[۱۵]</sup> هر چقدر اطلاعات در مورد سطح تماس ژئوستنتیک‌ها و خاک طبیعی در دسترس است، مطالعات انجام شده در مورد رفتار برشی سطح تماس مصالح بازیافتی بتن خرد شده‌ی بازیافتی و آسفالت بازیافتی روسازی برای کاربرد خاکریز خاک مسلح محدود است. علی‌رغم پیشرفت‌های زیاد در اصول مهندسی ژئوتکنیک، هنوز در مورد خاک‌های دست‌خورده، نخاله‌ها و توده‌هایی از این قبیل و اینکه آیا مصالح مذکور الزامات ژئوتکنیکی موردنیاز در کارهای ژئوتکنیکی را برآورده می‌کنند یا خیر، چالش وجود دارد. مطالعات زیادی در مورد نخاله‌های ساختمانی و روسازی، از جمله بتن و آسفالت انجام شده است که عمدتاً مربوط به تولید سنگ‌دانه‌ها برای استفاده در بتن،<sup>[۱۷،۱۶]</sup> و تهیه‌ی سنگ‌دانه‌های لایه‌ی زیرساز و اساس جاده‌ها،<sup>[۱۸،۱۹]</sup> و ساخت اجزاء بتن مسلح غیرسازه‌ی بوده‌اند.

اهمیت کلی موضوع این است که آیا از حجم عظیم نخاله‌ی ساختمانی و روسازی که رهاسازی آن در طبیعت و انباشت آن باعث آلودگی محیط‌زیست می‌شود و عموماً به‌عنوان زباله تلقی می‌شود، علاوه بر استفاده‌ی موارد ذکر شده، می‌توان به‌عنوان مصالح خاکی باربر در پروژه‌های شیروانی‌های خاکی و یا به‌عنوان مصالح خاکریز سازه‌های خاک مسلح استفاده کرد یا خیر؟ بنابراین هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی امکان استفاده از مصالح بازیافتی بتن و آسفالت خرد شده به‌عنوان مصالح خاکریز در دیوارهای خاک مسلح با رویکرد بررسی عملکرد مقاومت برشی

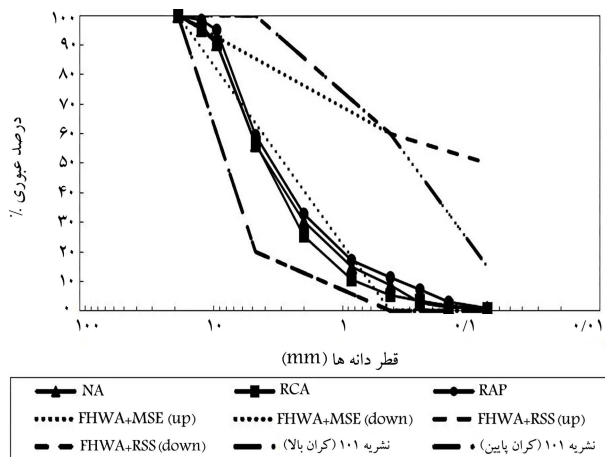
جدول ۲. خصوصیات فیزیکی مصالح خاکی.

نمونه	NA	RCA	RAP
D <sub>10</sub> (mm)	۰/۵۱	۰/۸	۰/۳۳
D <sub>30</sub> (mm)	۱/۹۸	۲/۴	۱/۷
D <sub>50</sub> (mm)	۴/۰۸	۴/۱۵	۳/۷۷
D <sub>60</sub> (mm)	۵/۲۶	۵/۱۸	۴/۲۸
C <sub>u</sub>	۱۰/۲۱	۶/۴۵	۱۴/۳۹
C <sub>G</sub>	۱/۴۳	۱/۰	۱/۸
G <sub>S</sub>	۲/۶۸	۲/۶	۲/۴۴
طبقه‌بندی خاک (USCS)	SW	SW	SW
درصد ذرات ریزتر از الک ۲۰۰	۰/۸	۰/۷	۰/۸
جذب آب	۳/۲	۴/۱	۱/۱
pH	۷/۳۶	۱۰/۷	۷/۸۲

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی ژئوگریدهای مورد آزمایش.

ژئوگرید	GP۱	GP۲	GP۳
مواد	PET	PET	PET
پوشش	PVC*	PVC	PVC
نوع	تک سویه	تک سویه	تک سویه
مقاومت کششی نهایی در جهت طولی (kN/m)	۱۱۰	۶۰	۶۰
مقاومت کششی نهایی در جهت عرضی (kN/m)	۳۰	۲۰	۲۰
کرنش در مقاومت کششی اسمی در جهت طولی (%)	۱۲	۱۲	۱۲
سختی طولی ژئوگرید در کرنش ۵٪	۸۶۰	۳۴۰	۵۶۰
اندازه‌ی چشمه ژئوگرید در جهت عرضی (mm)	۲۵	۲۵	۲۰
اندازه‌ی چشمه ژئوگرید در جهت طولی (mm)	۳۳	۳۳	۲۰
ضخامت (mm)	۲	۲	۲

\*PolyVinyl Chloride

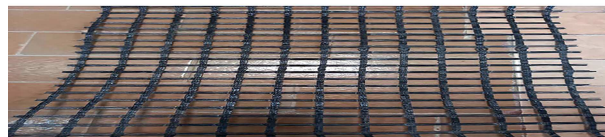


شکل ۴. منحنی دانه‌بندی مصالح و محدوده‌ی دانه‌بندی خاکریز.

طبق استاندارد FHWA<sup>[۲۰]</sup> و نشریه‌ی ۱۰۱<sup>[۲۱]</sup>، خاکریز استفاده شده در دیوارهای خاکی مکانیکی تثبیت شده (MSEW) و شیب‌های خاک مسلح (RSS)<sup>[۲۱]</sup> دارای یک محدوده‌ی دانه‌بندی است. آزمایش دانه‌بندی طبق استاندارد ASTM ۴۲۲-۸۷<sup>[۲۲]</sup> انجام شده است. منحنی دانه‌بندی خاک استفاده شده حاصل از آزمایش دانه‌بندی در شکل ۴ مشاهده می‌شود. براساس استاندارد USCS (سیستم طبقه‌بندی یونیفاید)، خاک استفاده شده به عنوان SW نام‌گذاری شد. مطابق شکل اخیر، دانه‌بندی هر سه مصالح استفاده شده، در محدوده‌ی مورد نظر آیین‌نامه بوده است، اما برای محدوده‌ی دانه‌بندی FHWA برای دیوارهای خاک مسلح (MSE)، دانه‌بندی مصالح مقداری جزئی از محدوده خارج بوده است. طبق نشریه‌ی ۱۰۱، اندازه‌ی بزرگ‌ترین دانه‌ی خاکریز تا ۱۰ سانتی‌متر می‌تواند افزایش یابد. در این حالت، باید عدم آسیب‌دیدگی ژئوستنتیک‌ها در اثر استفاده از مصالح درشت‌دانه در قطعات آزمایشی بررسی شود. بهتر است سنگدانه‌های بزرگ‌تر از ۳۸ میلی‌متر (۱/۵ اینچ)، کمتر از ۲۰٪ مصالح خاکریزی را تشکیل دهند. آیین‌نامه‌ی



الف) GP۲



ب) GP۳

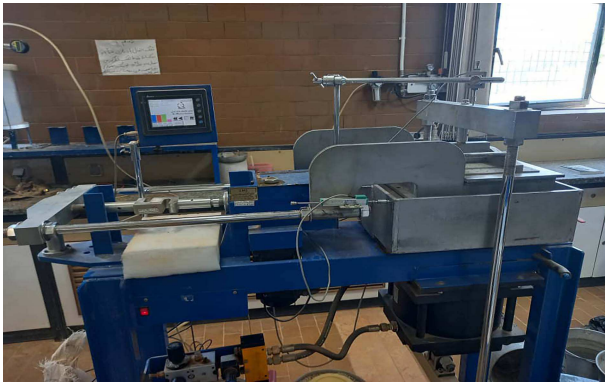


ج) GP۱

شکل ۳. تصویر ژئوگرید مصرفی.

## ۲.۲. ژئوگرید

در پژوهش حاضر، سه نوع ژئوگرید تک‌سویه (PET) با نام‌های تجاری GPGRID ۱۱۰/۳۰، GPGRIR ۶۰/۳۰ و GPGRID ۶۰/۲۰ برای مسلح کردن مصالح بازیافتی - طبیعی و همچنین برای انجام آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس که از نخ‌های پلی‌استر با مقاومت کششی بالا توسط یک روکش پلیمری سیاه پوشانده شده، استفاده شده است. سه نوع ژئوگرید مذکور، مقاومت‌های کششی قابل‌توجهی را در کرنش‌های کوچک ایجاد می‌کنند. ژئوگریدها با مقاومت بالا در هر دو جهت طول رول (جهت دستگاه MD) و امتداد عرض دستگاه (که معمولاً آن را با نام جهت عرضی CD می‌نامند) بافته می‌شوند. ژئوگریدهای مصرفی از شرکت ژئوپارسیان تهیه شده‌اند. در شکل ۳، تصویر ژئوگریدهای استفاده شده در پژوهش حاضر مشاهده می‌شود. ژئوگریدهای مصرفی، ساختار هندسی یکسان و چشمه‌ها و مقاومت‌های کششی متفاوت دارند. در جدول ۳، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ژئوگریدها که توسط شرکت ژئوپارسیان تهیه شده است، ارائه شده است. برای سهولت از نام‌های GP۱، GP۲ و GP۳ به ترتیب برای ژئوگرید GPGRID ۱۱۰/۳۰، GPGRID ۶۰/۲۰ و GPGRID ۶۰/۳۰ استفاده شده است.



شکل ۶. دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس موجود در آزمایشگاه.

اندازه‌گیری و نتایج توسط یک سیستم رایانه‌ای (DATA LOGGER) ثبت شده است.

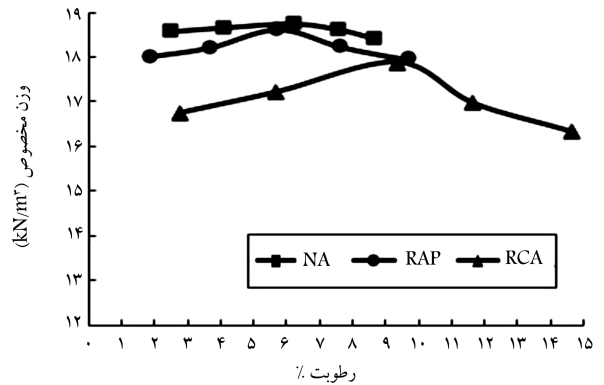
#### ۴. روش تهیهی نمونه

مراحل آماده‌سازی نمونه به این شرح بوده است:

الف) در تهیهی نمونه‌ها از وزن مخصوص خشک بیشینه به دست آمده از آزمایش تراکم اصلاح شده استفاده شده است که مقدار وزن مخصوص بیشینه حاصل از آزمایش تراکم اصلاح شده در ۹۵٪ ضرب شده است تا نمونه‌هایی با تراکم نسبی (RC) <sup>۲۲</sup> به دست آید. مقدار به دست آمده در حجم جعبه‌ی دستگاه برش مستقیم ضرب شده و مقدار وزن کل نمونه‌ی موردنیاز برای هر سری آزمایش به دست آمده است (طبق آیین‌نامه‌ی FHWA و نشریه‌های ۱۰۱ و ۳۰۸، کمیته‌ی میزان کوبیدگی در دیوارهای خاک مسلح و شیب خاک مسلح (RSS و MSE) ۹۵٪ است).

ب) بعد از تعیین وزن هر نمونه با توجه به تراکم موردنیاز از مصالح دانه‌بندی شده به میزان محاسبه شده در یک سینی ریخته شده است، تا به صورت دستی کاملاً مخلوط و همگن شود، سپس میزان درصد رطوبت بهینه به مخلوط اضافه و به مدت ۱۰ دقیقه مصالح مخلوط شده‌اند تا رطوبت به همه‌ی دانه‌ها برسد.

ج) در ادامه، جعبه‌ی برش به ۵ بخش مساوی تقسیم شده است که هر قسمت به ارتفاع ۳ سانتی‌متر بوده است. پیچ‌های جعبه محکم شدند تا از حرکت جعبه هنگام ساخت نمونه جلوگیری شود. پس از آماده شدن مخلوط، مخلوط به ۵ قسمت مساوی تقسیم شد و هر قسمت در جعبه‌ی برش ریخته و هر لایه با کوبه‌ی مخصوص تا رسیدن به درجه‌ی تراکم موردنظر متراکم شد. تعداد ضربات برای رسیدن به تراکم موردنظر طی یک سری آزمایش‌های مقدماتی و به صورت سعی و خطا تعیین شد (۲۰ الی ۲۸). طبق استاندارد ASTM D۵۳۲۱، لایه‌های خاک باید به‌گونه‌ی ریخته شوند که در مرز دو لایه در صفحه‌ی برش قرار نگیرند. پس از ریختن لایه‌ی دوم و کوبیدن آن، ژئوگرید روی نمونه قرار گرفت، به طوری که از یک طرف توسط یک گیره محکم و از طرف دیگر آزاد بود. براساس استاندارد ASTM D۵۳۲۱، هنگام قرار دادن ژئوگرید در دستگاه، باید صاف و بدون جمع‌شدگی در ۱ الی ۲ میلی‌متری پایین‌تر از صفحه‌ی برش قرار گیرد. لایه‌های سوم، چهارم و پنجم به ترتیب ریخته و متراکم شدند. باید به این نکته توجه داشت هر لایه که کوبیده می‌شود، قبل از رفتن به لایه‌ی بعدی، باید سطح آن شیاردار شود تا درگیری و یکنواختی لایه‌ها مهیا شود. طبق توصیه‌ی آیین‌نامه‌ی کل، سطح



شکل ۵. نمودار تراکم مصالح.

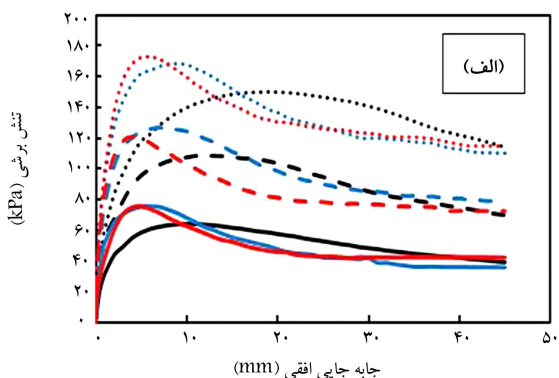
جدول ۴. مقادیر وزن مخصوص خشک بیشینه و رطوبت بهینه.

نمونه	وزن مخصوص خشک بیشینه (kN/m <sup>3</sup> )	رطوبت بهینه (%)
NA	۱۸/۸	۶/۲
RCA	۱۷/۸۸	۹/۳۵
RAP	۱۸/۶	۵/۷۵

FHWA، اندازه‌ی بزرگ‌ترین دانه‌ی خاکریز خاک مسلح با ژئوستنتیک را تا ۱۹ میلی‌متر (۳/۴ اینچ) توصیه می‌کند. برای استفاده از دانه‌ها با اندازه‌ی بزرگ‌تر، باید آزمایش‌های مربوط به عدم آسیب‌دیدگی ژئوستنتیک‌ها بررسی شود. برای تعیین وزن مخصوص خشک بیشینه و رطوبت بهینه از آزمایش تراکم اصلاح شده مطابق ضوابط استاندارد ASTM D۱۵۵۷<sup>[۲۲]</sup> استفاده شده است. در شکل ۵ و در جدول ۴، مقادیر وزن مخصوص بیشینه خشک و رطوبت بهینه ارائه شده است. برای تعیین چگالی ویژه ذرات جامد خاک از استاندارد ASTM D۸۵۴-۸۷<sup>[۲۴]</sup> استفاده شده است. استاندارد اخیر برای ذرات جامدی کاربرد دارد که از الک شماره ۴ (۴/۷۵ میلی‌متر) عبور کرده باشند که با استفاده از یک پیکنومتر، مقدار چگالی ویژه تعیین شده است. هنگامی که خاک حاوی ذرات بزرگ‌تر از الک ۴/۷۵ میلی‌متر باشد، باید از روش آزمون ASTM C۱۲۷<sup>[۲۵]</sup> برای ذرات جا مانده بر روی الک ۴ (۴/۷۵ میلی‌متر) استفاده کرد و میانگین آن را به عنوان مقدار چگالی ویژه در نظر گرفت. برای محاسبه‌ی جذب آب از استانداردهای ASTM C۱۲۷<sup>[۲۵]</sup> و ASTM C۱۲۸<sup>[۲۶]</sup> استفاده شده است. درجه PH مصالح موردنظر توسط استاندارد ASTM D۴۹۷۲<sup>[۲۷]</sup> تعیین شده است. میزان PH مصالح خاکریز طبق نشریه‌های ۱۰۱ و ۳۰۸ بین ۱۰-۵ و طبق آیین‌نامه‌ی FHWA برای ژئوستنتیک‌ها از نوع PET و PP/HDPE به ترتیب  $3 < PH < 9$  و  $PH > 3$  و مصالح NA، RCA و RAP به ترتیب ۷/۳۶، ۷/۱۰ و ۷/۸۲ بوده است.

#### ۳. دستگاه برش مستقیم

برای ارزیابی مقاومت برشی سطح تماس بین مصالح خاکی و مسلح کننده‌های ژئوگرید از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس مطابق شکل ۶ استفاده شده است. جعبه‌ی دستگاه دارای ابعاد ۱۵ × ۳۰ × ۳۰ سانتی‌متر بوده و تمام الزامات و ابعاد کمیته‌ی طبق آیین‌نامه‌ی ASTM D۵۳۲۱<sup>[۲۸]</sup> برآورده شده است. دستگاه استفاده شده به صورت پنوماتیک بوده و نیروی افقی توسط یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲ تن وارد شده و جابه‌جایی‌های افقی و قائم توسط جابه‌جایی‌سنج (LVDT)



(الف)



(ب)

شکل ۷. الف) نحوه‌ی نصب ژئوگرید در صفحه‌ی برش، ب) نحوه‌ی گیره‌ی ژئوگرید.

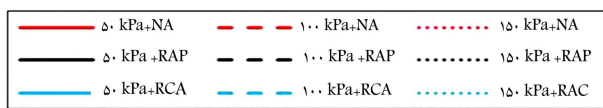
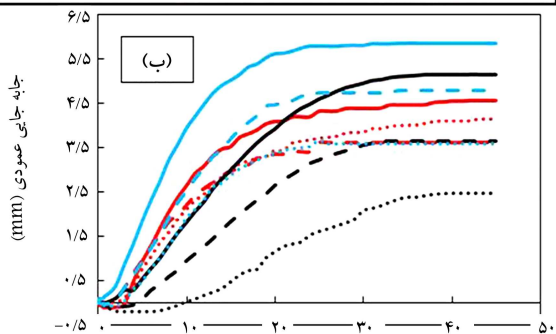
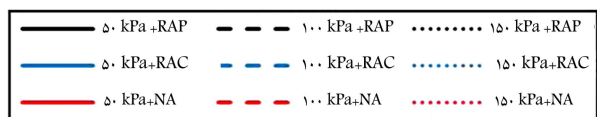
کوبه‌ی تراکم باید کوچک‌تر یا مساوی نصف مساحت جعبه باشد. پس از تراکم لایه‌ی آخر، سطح آن کاملاً صاف شده است، به طوری که ۱/۵ میلی‌متر از بالای جعبه‌ی برش فاصله داشته باشد. سپس درپوش جعبه روی نمونه گذاشته شد و با ۳۰ ضربه‌ی چکش پلاستیکی و انرژی تراکمی یکسان کوبیده شد، تا لبه‌ی فوقانی کلاهک با سطح فوقانی جعبه در یک تراز قرار بگیرد. در شکل ۷، نحوه‌ی گیره‌ی ژئوگرید و نحوه‌ی نصب آن در صفحه‌ی برش مشاهده می‌شود.

## ۵. انجام آزمایش

پس از ساخت نمونه و متراکم کردن آن در جعبه‌ی برش، نوبت به تنظیم گنج‌های اندازه‌گیری و اعمال بار قائم و افقی برای آزمایش می‌رسد. برای هر حالت مسلح شده و مسلح نشده، سه آزمایش تحت تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰، و ۱۵۰ کیلوپاسکال با سرعت بارگذاری افقی یک میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است. آیین‌نامه، محدودیت سرعت برش را بین ۰/۲۵ - ۶/۳۵ میلی‌متر در دقیقه در نظر گرفته است. به دلیل اینکه مصالح استفاده شده، از نوع دانه‌ی بی بوده و شرایط آزمایش به صورت اشباع نبوده است، بنابراین سرعت وارد کردن جابه‌جایی برشی، تأثیر چندانی در یافته‌های به‌دست آمده از آزمایش‌ها ندارد؛<sup>[۲۹]</sup> و به منظور هماهنگی و مقایسه‌ی نتایج با دیگر مطالعات انجام شده، در تمامی آزمایش‌ها از نرخ کرنش ۱ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. توسط فشار باد، اهرم بارگذاری قائم روی صفحه‌ی صلب بارگذاری قرار گرفت و گنج‌های افقی و قائم در مکان موردنظر نصب شدند. تنش قائم موردنظر به مدت ۱۵ دقیقه به نمونه وارد شده است، تا نشست نمونه به صورت کامل انجام گیرد. سپس پیچ‌های جعبه‌ی برش باز و آزمایش شروع شد. استاندارد ASTM D5۳۲۱ جابه‌جایی برشی ۲۵ تا ۷۵ میلی‌متر را توصیه می‌کند که در پژوهش حاضر، جابه‌جایی ۴۵ میلی‌متر که معادل ۱۵٪ طول نمونه است، در نظر گرفته شده است، به طوری که پس از آن دستگاه متوقف شده است.

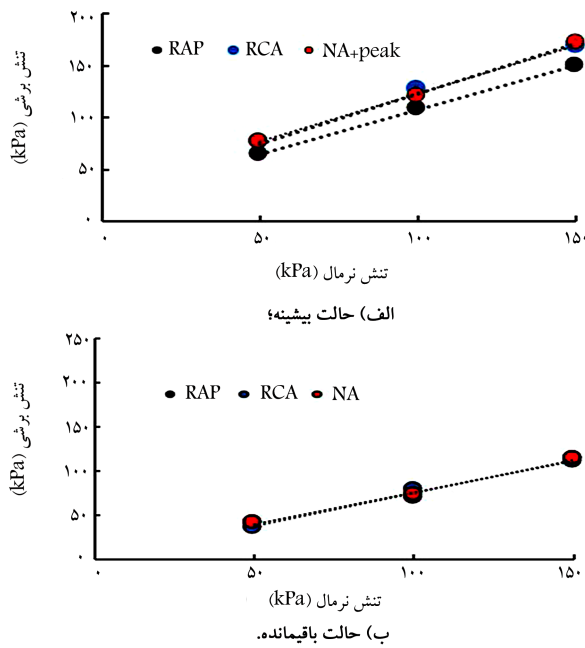
## ۶. تفسیر نتایج

همان‌طور که گفته شد، در ابتدا ۹ آزمایش برش مستقیم در حالت غیرمسلح انجام شد، تا پارامترهای مقاومت برشی مصالح (زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی) به دست آید. در شکل ۸، منحنی تنش برشی و جابه‌جایی عمودی در مقابل جابه‌جایی افقی مصالح RCA، NA و RAP غیرمسلح مشاهده می‌شود. مطابق شکل اخیر، با افزایش تنش نرمال، تنش برشی پیک افزایش یافته است

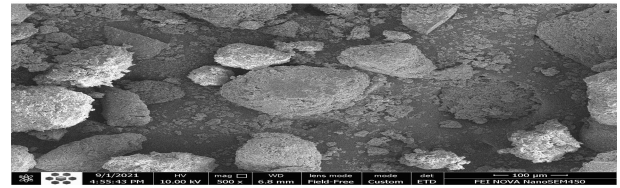
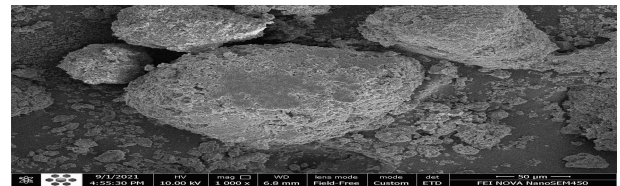
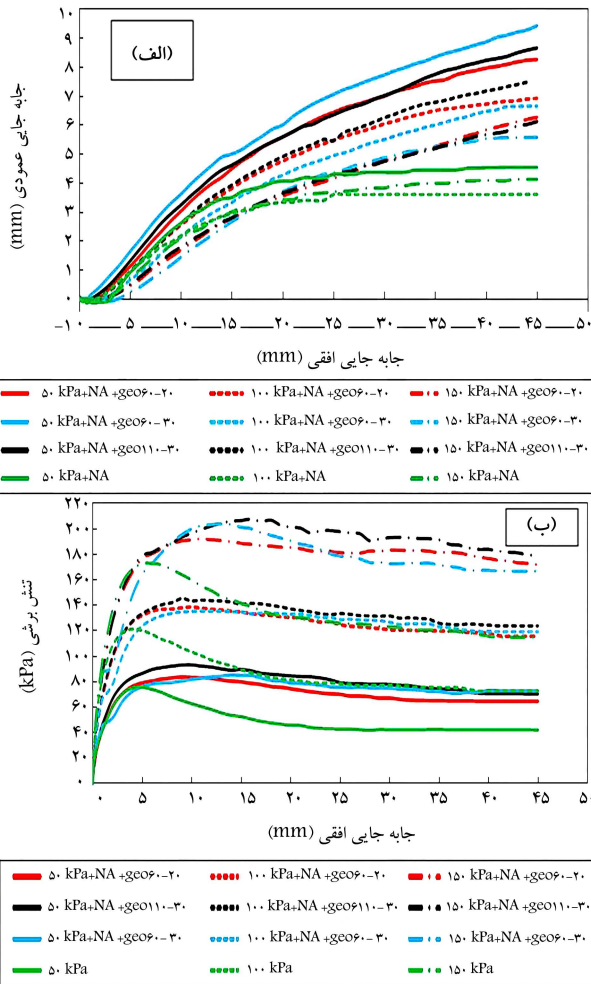


شکل ۸. الف) منحنی مقاومت برشی - جابه‌جایی افقی، ب) منحنی جابه‌جایی عمودی - جابه‌جایی عمودی مصالح بازیافتی و طبیعی غیرمسلح.

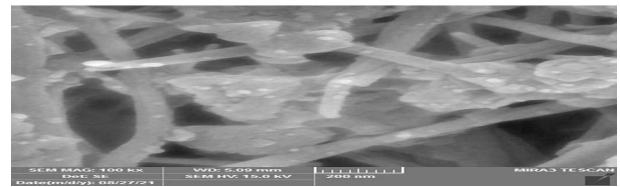
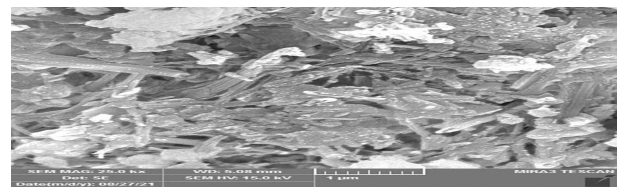
و رفتار نرم شوندگی کرنشی تقریباً در تمام نمونه‌ها مشاهده می‌شود. در تنش نرمال ۵۰ کیلوپاسکال، مصالح NA و RCA رفتار مشابه به یکدیگر دارند، به طوری که در جابه‌جایی افقی حدوداً ۶ میلی‌متر به مقاومت برشی بیشینه رسیده و تا جابه‌جایی حدوداً ۲۵ میلی‌متر، مقاومت کاهش یافته و در نهایت تا جابه‌جایی ۴۵ میلی‌متر، روند ثابتی را ادامه داده است. رفتار مصالح RAP کمی متفاوت بوده است، به طوری که با افزایش سربار، در جابه‌جایی افقی بزرگ‌تری به مقاومت بیشینه رسیده و سپس با شیب ملایم‌تری نسبت به مصالح NA و RCA، مقاومت کاهش یافته است. انتظار می‌رود سطح دانه‌های بتن بازیافتی زبرتر باشد. در عین حال زبری سطح دانه‌ها باعث درگیری بیشتر دانه‌ها خواهد شد که این امر باعث افزایش مقاومت برشی بیشینه می‌شود. در مقابل، سطح دانه‌های آسفالتی، ظاهراً نرم و صاف‌تر است و درگیری آن‌ها کمتر خواهد بود. احتمالاً وجود قیر بر سطح سنگ‌دانه‌های آسفالتی مانع از درگیری و اصطکاک بین دانه‌های آسفالت شده و در نهایت باعث کاهش مقاومت برشی شده است. تصاویر الکترونی (SEM) مصالح آسفالتی - بتنی - با اندازه‌های متفاوت به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود. در ابتدای آزمایش، انقباض اولیه‌ی جزئی رخ داده است. با اینکه مصالح با تراکم ۹۵٪ ساخته شده‌اند، ولی مقداری فضای خالی بین دانه‌ها وجود دارد که باعث شده است دانه‌ها ابتدا مقداری به هم نزدیک شوند و سپس کاهش حجم دهند.



شکل ۱۱. نمودار پوش گسیختگی برای مصالح RAP و RCA، NA.



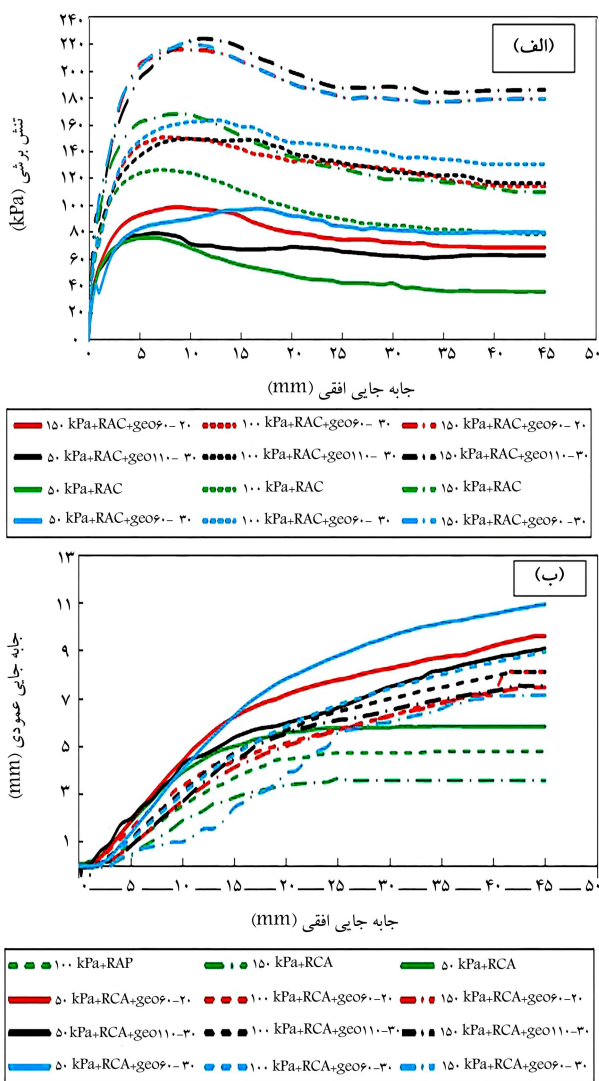
شکل ۹. تصاویر الکترونی (SEM) سنگدانه‌های آسفالتی.



شکل ۱۰. تصاویر الکترونی (SEM) سنگدانه‌های بتنی.

در ادامه، دانه‌ها روی هم غلتیده و لغزیده‌اند و این مکانیزم باعث ایجاد افزایش حجم (اتساع) شده است. با افزایش تنش نرمال تمایل به اتساع کاهش می‌یابد. مصالح زیررمانند بتن بازیافتی تمایل به اتساع بیشتری دارند، در صورتی که مصالح با دانه‌های صاف‌تر، مانند آسفالت بازیافتی، تمایل به اتساع کمتری دارند. مصالح طبیعی نیز رفتاری بینابینی دارند. به عبارتی، رشد بلورهای سیمان روی دانه‌ها منجر به زبرتر شدن و افزایش اتساع و لایه‌ی قیر روی دانه‌ها منجر به صاف‌تر شدن سطح دانه‌ها و کاهش اتساع می‌شود. به‌طور کلی، مقدار نرم‌شوندگی کمتر از دو مورد دیگر بوده است که احتمالاً دلیل آن همان پوشش قیری است که سطح دانه‌ها را پوشانده و دانه‌های نسبتاً صاف‌تری را ایجاد کرده و درگیری دانه‌ها را کاهش داده است. ولی به‌طور کلی، مقدار تنش باقیمانده در انتهای آزمایش برای هر سه نمونه تفاوت زیادی با هم نداشتند. همین‌طور دو نمونه‌ی طبیعی و بتن بازیافتی رفتار مشابهی داشتند. نمودار پوش گسیختگی مقاومت برشی پیشینه و باقی‌مانده در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. زاویه‌ی اصطکاک پیشینه برای مصالح RCA، RAP و NA به ترتیب برابر با ۴۵/۵، ۴۲/۵ و ۴۰/۶ درجه بوده است. در حالت باقیمانده، مقدار اخیر به ترتیب برابر با ۳۶/۵، ۳۶/۵ و ۳۵/۷ درجه بوده است. میزان چسبندگی برای مصالح NA برابر با ۲۴ کیلوپاسکال و برای مصالح بازیافتی RCA و RAP به ترتیب ۳۱/۲ و ۲۲ کیلوپاسکال بوده است. دلیل افزایش چسبندگی را می‌توان به وجود پوشش قیر روی سنگ‌دانه‌های RAP و همچنین ملات سیمان روی مصالح بتن خردشده‌ی RCA مرتبط دانست، که با اضافه شدن رطوبت، مقداری چسبندگی ظاهر می‌شود. هر چند این چسبندگی می‌تواند چسبندگی ظاهری (به دلیل تقریب خط پوش گسیختگی غیرخطی) هم باشد.

همچنین در شکل ۱۲، نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی مصالح NA



شکل ۱۳. الف) منحنی مقاومت برشی - جابه‌جایی افقی، ب) منحنی جابه‌جایی قائم - جابه‌جایی افقی برای مصالح RCA با و بدون مسلح‌کننده.

برشی بیشینه‌ی RCA غیرمسلح برای سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال به ترتیب در جابه‌جایی‌های ۷، ۷ و ۹ میلی‌متر رخ داده است، که تقریباً نزدیک به هم هستند. در حالی که با مسلح‌کننده، مقاومت برشی بیشینه در جابه‌جایی‌های ۷ الی ۱۳ میلی‌متر رخ داده است. نکته‌ی دیگر در مصالح اخیر آن است که کاهش مقاومت در حالت غیرمسلح نسبت به مصالح طبیعی NA با شیب کمتری صورت گرفته و رفتار مصالح در حالت مسلح، تقریباً شبیه به حالت غیرمسلح بوده است. همچنین اختلاف مقاومت برشی بیشینه و باقی‌مانده در حالت مسلح و غیرمسلح کم بوده است. رابطه‌ی بین جابه‌جایی افقی در برابر جابه‌جایی عمودی نیز نشان از رفتار اتساعی است و در شرایط مسلح و در سطح تماس مشترک مصالح و ژئوگرید همانند مصالح طبیعی، مسئله تشدید شده است.

در شکل ۱۴ الف، نمودار مقاومت برشی در برابر جابه‌جایی افقی برای مصالح RAP در حالت مسلح و غیرمسلح مشاهده می‌شود. رفتار مصالح RAP نسبت به مصالح RCA و NA متفاوت است. مقاومت برشی مصالح RAP غیرمسلح تا جابه‌جایی افقی ۱۱ الی ۱۹ میلی‌متر افزایشی بوده و بعد از آن در جابه‌جایی‌های افقی بیشتر، مقدار کمی دچار افت شده است. در حالی که افت مقاومت نسبت

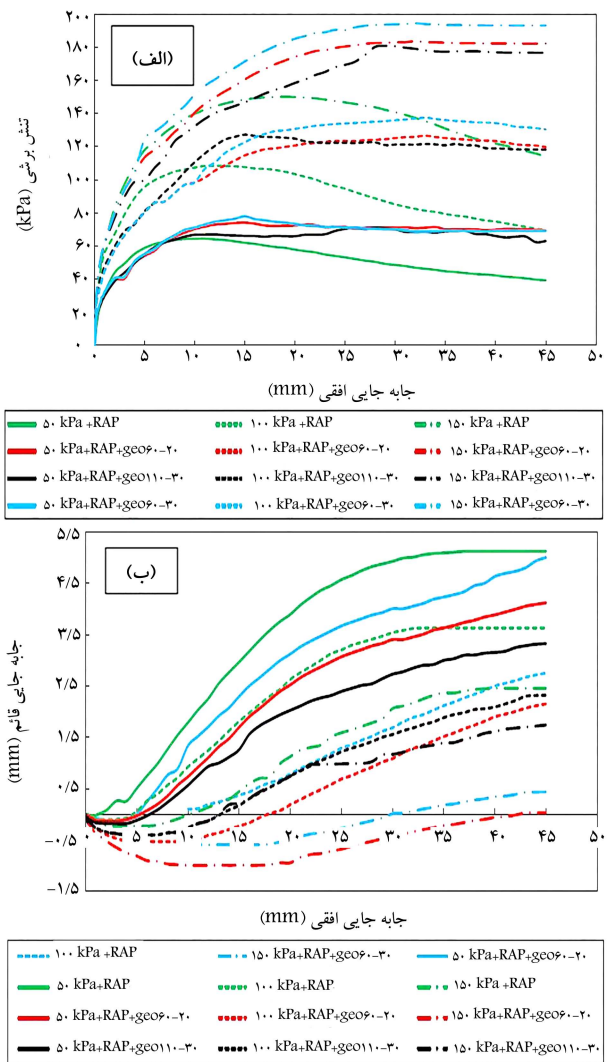
در حالت مسلح و غیرمسلح مشاهده می‌شود که با افزایش تنش نرمال، مقاومت برشی برای NA+GP۱، NA+GP۲، NA+GP۳، NA افزایش یافته است. در نمونه‌ی غیرمسلح، با اعمال جابه‌جایی، مقاومت برشی افزایش یافته و پس از رسیدن به تنش برشی بیشینه در جابه‌جایی (تقریباً ۵ میلی‌متر)، در ادامه با افزایش جابه‌جایی (تقریباً تا ۲۳ میلی‌متر) مقاومت کاهش یافته و سپس تا پایان آزمایش روند ثابتی به خود گرفته است. رفتار اخیر، نشان‌دهنده‌ی رفتار نرم‌شونده است. شکل مذکور به وضوح نشان می‌دهد که مسلح ساختن نمونه‌ها باعث افزایش مقاومت برشی شده است. نکته‌ی قابل توجه این است که پس از مسلح کردن مصالح NA با ژئوگریدهای GP۱، GP۲ و GP۳، رفتار نمونه متفاوت از حالت مسلح نشده است، به طوری که در تنش‌های نرمال ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال، مقاومت برشی در جابه‌جایی تقریباً ۱۱ میلی‌متر به بیشینه‌ی خود رسیده است، ولی در تنش ۱۵۰ کیلوپاسکال در جابه‌جایی ۱۷ میلی‌متر به مقدار بیشینه رسیده است. همچنین رفتار مصالح از حالت نرم‌شونده تقریباً به حالت سخت‌شونده تبدیل شده است. مقاومت برشی بیشینه‌ی سطح تماس در تنش‌های نرمال ۵۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال در ژئوگرید GP۱ نسبت به ژئوگریدهای GP۲ و GP۳ بیشتر بوده است؛ در حالی که در تنش نرمال ۱۰۰ کیلوپاسکال، مقاومت‌های برشی تقریباً نزدیک به هم بوده‌اند. همان‌طور که بیان شد، سه عامل: اصطکاک دانه‌ها با سطح ژئوگرید، درگیری دانه‌های متراکم در داخل چشمه‌ها و نوارهای عرضی می‌توانند در میزان افزایش مقاومت نقش داشته باشند؛ اما دانستن اینکه کدام عامل نسبت به دیگری نقش بیشتری دارد، کمی پیچیده است. به‌طور کلی می‌توان دلیل افزایش مقاومت برشی در سطح مشترک را به درگیری دانه‌های متراکم با نوارهای عرضی و همچنین قفل و بست دانه‌های خاک داخل چشمه‌های ژئوگرید مرتبط دانست. یکی از عوامل تأثیرگذار و مهم که احتمالاً نقش اصلی را در افزایش مقاومت دارد، اصطکاک بین سنگ‌دانه‌ها و سطح ژئوگرید است. نسبت فضای خالی به سطح کل ژئوگرید برای ژئوگریدهای GP۱، GP۲ و GP۳ به ترتیب برابر با ۰/۶۴، ۰/۷۴ و ۰/۷۲ بوده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نسبت مذکور برای ژئوگرید GP۱ کمتر بوده است، یعنی میزان فضای خالی کمتری داشته است که باعث شده مقاومت اصطکاک‌کی اثر بیشتری در افزایش مقاومت در ژئوگرید GP۱ داشته باشد. نمودار جابه‌جایی افقی در مقابل جابه‌جایی عمودی نمونه‌ها نشان می‌دهد که در ابتدای آزمایش، یک انقباض عمودی اولیه‌ی جزئی رخ داده و سپس نمونه شروع به افزایش حجم (اتساع) کرده است. مقدار اتساع در مصالح NA بدون مسلح‌کننده، کمتر از مقدار آن در سطح تماس بوده است. قفل و بست شدن دانه‌ها با ژئوگرید باعث رفتار اتساعی بیشتر شده است. با افزایش تنش نرمال، میزان اتساع کاهش یافته است. در واقع، در نمونه‌ی غیرمسلح، امکان لغزش و جابه‌جایی دانه‌ها در سطح برش راحت‌تر صورت می‌گیرد، در حالی که در حالت‌های مسلح، امکان لغزش دانه‌های گیر کرده در داخل چشمه‌ها به راحتی امکان ندارد و به ناچار دانه‌ها باید از داخل چشمه به سمت بالا حرکت و امکان لغزش و چرخش پیدا کنند که این عمل منجر به اتساع نمونه می‌شود. هر چند مقدار اتساع با افزایش سربار کاهش می‌یابد و در ژئوگریدهای مختلف به دلیل مقاومت‌های متفاوت سیم‌های عرضی باهم متفاوت است. در واقع، همین عامل باعث افزایش مقاومت هم می‌شود.

در شکل ۱۳، نتایج آزمایش برای نمونه‌ی RCA در حالت مسلح و غیرمسلح مشاهده می‌شود. نتایج تقریباً شبیه به مصالح طبیعی است. ولی نکته‌ی قابل توجه این است که در تنش‌های نرمال ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال، ژئوگرید GP۳ مقاومت بیشتری نسبت به ژئوگریدهای GP۱ و GP۲ و در تنش ۱۵۰ کیلوپاسکال ژئوگرید GP۱ نسبت به دو ژئوگرید دیگر مقاومت برشی بیشتری از خود نشان داده است. مقاومت



می‌رسد که به دلیل کوچک‌تر بودن چشمه‌ی ژئوگرید، بهترین قفل و بست ایجاد شده است. بنابراین ژئوگرید مانع از لغزیدن دانه‌ها بر روی یکدیگر شده و همین امر باعث افزایش درگیری دانه‌های داخل چشمه‌ها شده است. همچنین مصالح مذکور بالاترین اندرکنش (۱/۲۵) را با ژئوگرید GP۳ داشته‌اند. نمودار جابه‌جایی عمودی در برابر جابه‌جایی افقی در شکل ۱۴ ب نشان می‌دهد که برعکس دو مصالح قبلی، سطح مشترک آسفالت بازیافتی، رفتار انقباضی‌تری نسبت به خود مصالح داشته است. این اتفاق احتمالاً به دلیل وجود پوششی از لایه‌ی قیری در روی سنگدانه‌ها و صاف‌تر بودن سطح آن‌ها نسبت به دو مصالح قبلی است. در جدول ۵، خلاصه‌ی نتایج آزمایش‌ها با و بدون ژئوگرید ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزودن ژئوگرید، میزان مقاومت برشی افزایش یافته است. میزان افزایش درصد مقاومت در مصالح طبیعی (NA) با ژئوگرید GP۱ نسبت به ژئوگریدهای GP۲ و GP۳ بیشتر بوده است، به طوری که در تنش نرمال ۱۵۰ کیلوپاسکال میزان افزایش مقاومت، ۲۰/۳۵٪ بوده است، که نسبت به تنش‌های نرمال ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال کمتر است. در حالی که افزایش درصد مقاومت در مصالح بازیافتی بتن (RCA) و آسفالت (RAP) با ژئوگرید GP۳ نسبت به ژئوگریدهای GP۲ و GP۳ بیشتر است، به طوری که در مصالح بتنی و آسفالتی به ترتیب در تنش‌های نرمال ۱۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال، بیشترین افزایش درصد مقاومت را داشته است. بنابراین شاید مقایسه‌ی رفتار سه نوع مصالح مذکور چندان درست نباشد، چرا که شکل ذرات (دانه‌ها) و پوشش سطح سنگدانه‌ها، زبری و جنس پوشش سطح آن‌ها با یکدیگر متفاوت است. انتظار می‌رود سطح دانه‌های بتن بازیافتی زبرتر باشد (شکل ۱۰)، درعین‌حال پوشش سطح دانه‌ها شکننده‌تر باشد.

زبری سطح دانه‌ها باعث درگیری بیشتر آن‌ها با یکدیگر خواهد شد. همچنین سطح دانه‌های آسفالت صاف و دارای قیر است (شکل ۹) که درگیری بین دانه‌ها کمتر خواهد بود. بنابراین، اینکه اصطکاک بین دانه‌ها بیشتر است یا اصطکاک بین دانه‌ها - ژئوگرید، سؤال راحتی نیست؛ لذا رسیدن به نتیجه‌ی نهایی در مورد اثر نسبت سطح باز به کل ژئوگرید و یا اندازه‌ی چشمه‌ها، نیازمند آزمایش‌های بیشتر و دقیق‌تری است. ذکر این نکته لازم است که دانه‌های سه نوع مصالح نیز با یکدیگر متفاوت بوده و منشأ یکسانی نداشته‌اند. احتمالاً مصالح آسفالت بازیافتی در درازمدت، رفتار خزشی از خود نشان می‌دهند، لذا در مواردی که تغییرشکل‌های سازی خاکی محدودیت داشته باشد، باید به این موضوع توجه داشت؛ هر چند بحث خزش در مصالح بازیافتی و روند و مقدار آن نیاز به پژوهش‌های ویژه و بیشتری دارد، چرا که فقط سطح دانه‌ها با لایه‌ی قیر پوشیده شده است. مطالعات انجام شده در زمینه‌ی پارامترهای مقاومت برشی و اندرکنش مصالح بازیافتی با ژئوگرید بیشتر در بحث زیرساز جاده‌ها و روسازی انجام شده و تعداد خیلی کمی از پژوهشگران بر روی استفاده‌ی مجدد از مصالح بازیافتی در خاکریز دیوارهای خاک مسلح پرداخته‌اند. تفاوت پژوهش حاضر با پژوهش‌های انجام شده توسط سودینگ<sup>۲۳</sup> و همکاران (۲۰۲۰) و یودومچای<sup>۲۴</sup> و همکاران (۲۰۲۱) این است که مصالح بازیافتی انتخاب شده، بومی هستند و همچنین با توجه به شرایط و اقلیم جغرافیایی، نوع منبع تولید نخاله‌های ساختمانی می‌تواند متفاوت باشد. ذکر این نکته ضروری است که هر یک از پژوهشگران اشاره شده، فقط روی یکی از مصالح بازیافتی مطالعه کرده‌اند، در حالی که در پژوهش حاضر هر دو نوع مصالح بازیافتی (آسفالت و بتن بازیافتی) و مصالح طبیعی برای مقایسه استفاده شده‌اند. همچنین تفاوت‌هایی از نظر دانه‌بندی مصالح و نوع ژئوگرید با نوشتارهای ذکر شده وجود دارد.



شکل ۱۴. الف) منحنی مقاومت برشی - جابه‌جایی افقی، ب) منحنی جابه‌جایی قائم - جابه‌جایی افقی برای مصالح RAP با و بدون مسلح‌کننده.

به دو مصالح دیگر با شیب خیلی ملایمی کاهش پیدا کرده است. وقتی مصالح با ژئوگرید، مسلح شده‌اند، افزایش مقاومت در جابه‌جایی‌های بزرگ‌تری رخ داده و با روند نسبتاً ثابت تا جابه‌جایی ۴۵ میلی‌متر ادامه یافته است. به عبارتی دیگر، رفتار سطح مشترک در مصالح ذکر شده، سخت‌شونده بوده است. مصالح RAP مقاومت برشی بالاتری با ژئوگرید GP۳ داشته‌اند. نسبت BGG/D۵۰ برای ژئوگریدهای GP۱، GP۲ و GP۳ به ترتیب برابر با ۶/۶۳، ۶/۶۳ و ۵/۳ بوده است. در شکل ۹، تصاویر الکترونی (SEM) از سنگدانه‌های آسفالت بازیافتی مشاهده می‌شود. با توجه به تصاویر مذکور، وجود قیر در سطح دانه‌ها می‌تواند نتایج متفاوتی نسبت به سنگدانه‌های بتنی و طبیعی از خود نشان دهد. با توجه به نتایج در حالت غیرمسلح، احتمالاً وجود قیر در سطح سنگدانه‌ها باعث نرم‌تر شدن سنگدانه‌ها شده و همین امر باعث کاهش اصطکاک دانه به دانه شده و به دنبال آن مقاومت برشی کاهش یافته است؛ در صورتی که هنگام مسلح کردن با ژئوگرید، در مقاومت برشی سطح تماس، افزایش قابل‌توجهی رخ داده است. مصالح آسفالتی با ژئوگرید GP۳، مقاومت برشی سطح تماس بیشتری را ایجاد کرده‌اند و همچنین مقدار فضای خالی برای ژئوگرید GP۳، ۷۲/۰ بوده است. این‌طور به نظر

جدول ۵. مقادیر پارامترهای مقاومت برشی.

چسبندگی $kPa (c)$		زاویه اصطکاک $(\varphi)$ (درجه)		مصالح
باقیمانده	بیشینه	باقیمانده	بیشینه	
۳/۷	۲۴	۳۶	۴۵	NA
۱۰	۲۹	۴۶/۹	۴۷/۳	NA + geo $6^{\circ}/2^{\circ}$
۱۵	۲۴	۴۷/۶	۴۸/۸	NA + geo $11^{\circ}/3^{\circ}$
۲۳	۲۲	۴۳/۵	۴۹/۷	NA + geo $6^{\circ}/3^{\circ}$
۱	۳۱/۲	۳۶/۶	۴۲/۷	RCA
۲۴/۷	۳۷/۷	۴۱/۶	۴۹/۶	RCA + geo $6^{\circ}/2^{\circ}$
۱۶	۱۵	۴۶	۵۲	RCA + geo $11^{\circ}/3^{\circ}$
۲۴/۷	۳۷/۷	۴۴/۷	۵۱/۱	RCA + geo $6^{\circ}/3^{\circ}$
۴	۲۲	۳۶/۷	۴۰/۶	RAP
۱۱	۱۹	۴۸	۴۷	RAP + geo $6^{\circ}/2^{\circ}$
۵/۵	۱۹	۴۸/۶	۴۷/۶	RAP + geo $11^{\circ}/3^{\circ}$
۶/۷	۲۰	۵۰	۴۹/۲	RAP + geo $6^{\circ}/3^{\circ}$

جدول ۶. مقادیر ضریب اندرکنش سطح تماس مصالح با ژئوگریدهای مصرفی.

میانگین	تنش نرمال ( $kPa$ )			نمونه
	۱۵۰	۱۰۰	۵۰	
۱/۱	۱/۱	۱/۱۱	۱/۱۲	NA + geo $6^{\circ}/2^{\circ}$
۱/۲۱	۱/۲	۱/۱۹	۱/۱۶	NA + geo $11^{\circ}/3^{\circ}$
۱/۱۱	۱/۱۴	۱/۱۲	۱/۰۹	NA + geo $6^{\circ}/3^{\circ}$
۱/۲۵	۱/۲۶	۱/۲۵	۱/۲۵	RCA + geo $6^{\circ}/2^{\circ}$
۱/۱۳	۱/۲۲	۱/۱۵	۱/۰۲	RCA + geo $11^{\circ}/3^{\circ}$
۱/۲۹	۱/۳۲	۱/۲۹	۱/۲۸	RCA + geo $6^{\circ}/3^{\circ}$
۱/۱۸	۱/۲۲	۱/۱۷	۱/۱۵	RAP + geo $6^{\circ}/2^{\circ}$
۱/۱۸	۱/۲۲	۱/۱۷	۱/۱۵	RAP + geo $11^{\circ}/3^{\circ}$
۱/۲۵	۱/۲۹	۱/۲۶	۱/۲۱	RAP + geo $6^{\circ}/3^{\circ}$

همان‌طور که مشخص است، مصالح بازیافتی، کمینه‌ی پارامترهای مقاومت برشی را زمانی که با ژئوگرید مسلح می‌شوند، تأمین می‌کنند. ضریب اندرکنش بین خاکریز و مسلح‌کننده، یکی از پارامترهای کلیدی در طراحی سازه‌های خاک مسلح است و می‌تواند به عنوان ضریب اصطکاک خاک مسلح بیان شود. ضریب اندرکنش را می‌توان به‌عنوان نسبت بیشینه‌ی مقاومت برشی در حالت مسلح به بیشینه‌ی مقاومت برشی در حالت غیرمسلح طبق رابطه‌ی ۱ تحت همان فشار نرمال ( $\sigma$ ) تعریف کرد. از آنجا که هر آزمایش برش مستقیم، ۳ بار و تحت ۳ سربار مختلف و شرایط مشابه انجام شده است، ضریب اندرکنش از میانگین سه سربار ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال به‌دست آمده است. اندرکنش بین مسلح‌کننده و خاکریز خاک مسلح باعث می‌شود که دیوارهای خاک مسلح، بارگذاری و تغییرشکل قابل‌توجهی را تحمل کنند و مانند یک واحد انعطاف‌پذیر عمل

## ۷. پارامترهای مقاومت برشی سطح تماس و ضریب

### اندرکنش

پارامترهای مقاومت برشی، در حالت مسلح و غیرمسلح در جدول ۶ ارائه شده‌اند. پارامترهای مذکور با رسم پوش گسیختگی براساس نتایج آزمایش برش مستقیم به دست آمده‌اند. همان‌طور که در جدول اخیر مشاهده می‌شود، مصالح طبیعی در حالت غیرمسلح نسبت به مصالح بازیافتی به دلیل تیزگوشگی و زبری سطح دانه‌های آن، بیشترین زاویه‌ی اصطکاک داخلی را داشته و زمانی که مسلح‌کننده اضافه شده است، زاویه‌ی اصطکاک سطح تماس افزایش یافته است. خاک‌های دانه‌ی مانند شن و ماسه‌ی متراکم، معمولاً دارای مقادیر زاویه‌ی اصطکاک بیشینه‌ی ۴۰ تا ۴۸ درجه و مقادیر زاویه‌ی اصطکاک باقیمانده ۳۲ الی ۳۶ درجه هستند.<sup>[۳۰]</sup>

جدول ۷. خلاصه‌ی نتایج آزمایش برش مستقیم با و بدون مسلح‌کننده.

نمونه	مسلح‌کننده	مقاومت برشی بیشینه			جابه‌جایی متناظر با مقاومت			افزایش مقاومت (%)		
		(kPa)			برشی بیشینه (mm)					
		۱۵۰	۱۰۰	۵۰	۱۵۰	۱۰۰	۵۰	۱۵۰۰	۱۰۰	۵۰
		(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)
	NA	۱۷۲/۷	۱۲۱	۷۵/۵	۶	۴	۵	-	-	-
مصالح طبیعی	NA+GP۱	۲۰۷	۱۴۵	۸۷	۱۷	۹	۱۰	۲۰/۳۵	۱۹	۱۶
	NA+GP۲	۱۹۲	۱۳۸	۸۳	۱۱	۱۲	۹	۱۱/۶۲	۱۴	۱۰
	NA+GP۳	۲۰۳	۱۳۵	۸۵	۱۳	۱۱	۱۴	۱۸	۱۱/۵	۱۳/۳
	RCA	۱۶۸	۱۲۶/۷	۷۶	۹	۷	۶	-	-	-
مصالح بتنی باز یافتی	RCA+GP۱	۲۱۰	۱۴۹	۷۹	۷	۱۰	۷	۲۵	۱۸/۲۵	۵/۳
	RCA+GP۲	۲۱۶	۱۵۰	۹۹	۷	۸	۹	۲۸/۶	۱۹	۳۲
	RCA+GP۳	۲۲۲	۱۶۳	۹۷	۱۰	۱۳	۱۷	۳۲	۲۹/۴	۲۹/۳
	RAP	۱۵۰	۱۰۸	۶۴	۱۹	۱۲	۱۱	-	-	-
مصالح آسفالتی باز یافتی	RAP+GP۱	۱۸۰	۱۲۷	۷۱	۲۹	۱۶	۲۶	۲۰	۱۷/۵	۱۱
	RAP+GP۲	۱۸۳	۱۲۶	۷۴	۳۲	۳۳	۱۵	۲۲	۱۶/۶	۱۵/۶
	RAP+GP۳	۱۹۴	۱۳۷	۷۸	۳۲	۳۳	۱۵	۲۹/۳	۲۶/۸۵	۲۱/۸

کنند. [۳۱]

$$\alpha = T_{rience} / T_{unreinforce} \quad (1)$$

که در آن،  $\alpha$  ضریب مقاومت برشی سطح تماس،  $T_{rience}$  مسلح شده و  $T_{unreinforce}$  مسلح نشده به ترتیب مقاومت برشی بیشینه‌ی سطح تماس بین نمونه‌ی خاکی و ژئوگرید و نمونه‌ی خاک خالی است. در صورتی که ضریب اندرکش کمتر از ۵/۰ باشد، بدین معنی است که پیوند بین خاک و ژئوستتیک، ضعیف و اگر بیشتر از ۱ باشد، اتصال قوی بین خاک و ژئوستتیک برقرار است. [۳۱] در جدول ۷، مقادیر ضریب مقاومت برشی سطح تماس ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب مذکور برای هر سه مصالح بزرگ‌تر از ۱ است که بیانگر اندرکش قوی بین مصالح و ژئوگریدهاست.

برشی ژئوگرید نوع GP ۱۱۰/۳۰ و GP ۶۰/۲۰ به ترتیب برابر با ۱۱۰ و ۶۰ کیلو نیوتن در متر است. اندازه‌ی چشمه‌ها ۲۵ × ۳۳ میلی‌متر با عرض چشمه‌ی یکسان برای هر دو نوع ژئوگرید بوده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، مقاومت کششی تأثیر چندانی در مقاومت برشی سطح تماس ندارد، زیرا گسیختگی ژئوگرید بعد از آزمایش برش مشاهده نشده است. نوسان‌های مختصری که گاهی بین نمودارها مشاهده می‌شود، احتمالاً به دلیل خطاهای آزمایش است. سودپنگ و همکاران (۲۰۱۸)، نیز تأثیر مقاومت کششی ژئوگرید را در مصالح RCA بررسی کردند و دریافته‌اند که مقاومت کششی ژئوگرید تأثیر چندانی در مقاومت برشی سطح تماس ندارد. [۶] لذا می‌توان گفت تا زمانی که پارگی در ژئوگرید رخ ندهد، مقاومت کششی ژئوگرید، تأثیر قابل توجهی در اندرکش آن با خاک ندارد.

## ۹. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، به کمک آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس، ابتدا رفتار برشی دو نوع مصالح باز یافتی به عنوان جایگزین مصالح طبیعی، شامل: بتن و آسفالت باز یافتی در کنار یک مصالح طبیعی با دانه‌بندی مشابه و با طبقه‌بندی ماسه‌ی خوب دانه‌بندی شده بررسی شده است. سپس رفتار سطح مشترک مصالح مذکور با سه نوع ژئوگرید با هدف استفاده از مصالح باز یافتی در دیوارهای حائل خاک مسلح

## ۸. تأثیر مقاومت کششی ژئوگرید در مقاومت برشی

### اندرکش

تأثیر مقاومت کششی ژئوگرید در مقاومت برشی سطح تماس با مقایسه‌ی نتایج آزمایش با ژئوگریدهای GP GRID ۱۱۰/۳۰ و GP GRID ۶۰/۲۰ در شکل ۱۵ برای مصالح NA، RCA و RAP مشاهده می‌شود. مقاومت کششی در جهت

بررسی شده است. اهم نتایج حاصل به این شرح است:

۱. مصالح بازیافتی شامل بتن و آسفالت خرد شده دارای مقاومت برشی خوبی هستند و می توانند با ملاحظاتی به عنوان جایگزین مصالح طبیعی در دیوارهای حائل خاک مسلح استفاده شوند، هر چند رفتار برشی آن‌ها کمی متفاوت است. مصالح آسفالت بازیافتی نسبت به مصالح طبیعی و بتن بازیافتی، مقاومت برشی کمتری دارند. دلیل این امر را می توان به وجود پوشش قیر بر روی سنگدانه های آسفالت بازیافتی نسبت داد که باعث کاهش اصطکاک می شود. به دلیل اینکه لایه ی سطحی مصالح آسفالتی، نرم تر است، لذا رفتار حجمی آن انقباضی تر از مصالح طبیعی و بتن بازیافتی است.

۲. به طور کلی درگیری مناسب مصالح دانه یی بازیافتی با ژئوگرید، منجر به افزایش مقاومت برشی سطح مشترک مصالح مذکور و ژئوگرید نسبت به خود مصالح شده است. رفتار برشی مصالح طبیعی و بتن از حالت نرم شونده کمی به حالت سخت شونده در سطح مشترک تبدیل شده است. این روند در مورد آسفالت شدیدتر بوده است. همچنین رفتار حجمی سطح مشترک مصالح طبیعی و بتن بازیافتی با ژئوگرید، اتساعی تر از خود مصالح بوده است، این موضوع در مورد آسفالت به دلیل وجود پوشش قیر بر سطح دانه ها که باعث صاف تر شدن سنگ دانه ها می شود، برعکس است. با افزودن ژئوگرید، مقاومت برشی سطح تماس مصالح آسفالتی به دلیل درگیری بیشتر دانه ها در چشمه های ژئوگرید و جلوگیری از لغزیدن دانه ها بر روی یکدیگر افزایش یافته است.

۳. به طور کلی، مصالح بازیافتی بتن و آسفالت، کمینه ی پارامترهای مقاومت برشی را زمانی که با ژئوگرید مسلح می شوند، تأمین می کنند. همچنین ضریب اندرکش سطح مشترک مصالح بازیافتی بتن و آسفالت با ژئوگرید بیشتر برابر با ۱ بوده است که نشان از اصطکاک و درگیری مناسب آن‌ها دارد.

۴. مقاومت کششی ژئوگریدها تأثیر زیادی در مقاومت برشی سطح تماس مشترک بین مصالح و ژئوگرید ندارد؛ زیرا گسیختگی ژئوگرید در پایان آزمایش برش مستقیم مشاهده نشده است.

در انتها باید یادآور شد در استفاده از مصالح بازیافتی مذکور، مخصوصاً آسفالت بازیافتی، باید به رفتار خزشی آن‌ها توجه کرد.

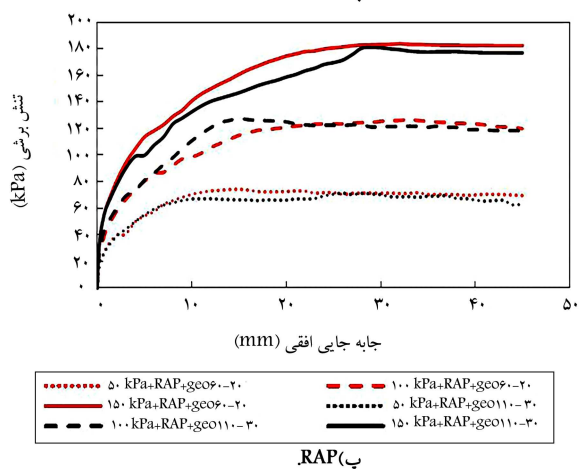
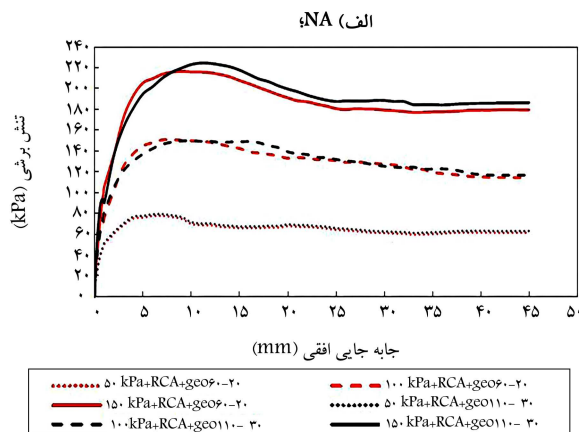
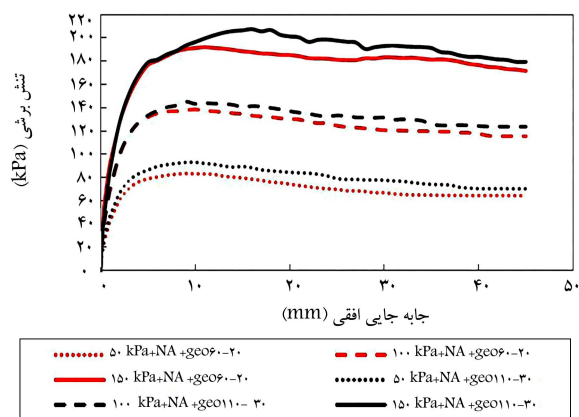
## تقدیر و تشکر

در نهایت، از شرکت ژئوپارسیان به دلیل تولید و در اختیار گذاشتن ژئوگریدهای استفاده شده در پژوهش حاضر، تشکر و قدردانی می شود.

## پانویسها

1. land fill
2. recycled concrete aggregate (RCA)
3. reclaimed asphalt pavement (RAP)
4. large direct shear test

5. Geogrid
6. interface
7. Touahamia
8. Rathje
9. mechanically stabilized earth (MSE)
10. Liu



شکل ۱۵. تأثیر مقاومت کششی ژئوگرید در مقاومت برشی سطح تماس.

11. Arulrajah
12. construction & demolition
13. crushed brick
14. peak
15. residual
16. construction and demolition waste (CDW)
17. waste soil
18. Suddepong
19. Udomchai
20. natural materials (NA)
21. reinforced soil slopes
22. relative compaction (RC)
23. Suddeponge
24. Udomchai

## منابع (References)

1. Oikonomou, N.D. "Recycled Concrete aggregates", *Cement and Concrete Composites*, **27**(2), pp. 315-318 (2005).
2. Touahamia, M., Sivakumar, V. and McKelvey, D. "Shear strength of reinforced-recycled material", *Construction and Building Materials*, **16**(6), pp. 331-339 (2002).
3. Nejad, M. "Program for recycling construction debris of worn tissue renovation projects using software HAZUS (Sangolch neighborhood, 12th District of Tehran), 2ed Conference on Environmental Planning and Management, (in Persian) (2012).
4. <https://pasmand.tehran.ir>
5. Bakeer, R., Abdel-Rahman, A.H. and Napolitano, P.J. "Geotextile friction mobilisation during field pullout test", *Geotext. Geomembranes*, **16**, pp. 73-85 (1998).
6. Palmeira, E.M. "Soil-geosynthetic interaction: Modelling and analysis", *Geotextiles and Geomembranes*, **27**(5), pp. 368-390 (2009).
7. Suddepong, A., Sari, N., Horpibulsuk, S. and et al. "Interface shear behaviours between recycled concrete aggregate and geogrids for pavement applications", *International Journal of Pavement Engineering*, **21**(2), pp. 228-235 (2020).
8. Jewell, R.A., Milligan, G.W.E. and Dubois, D. "Interaction between soil and geogrids", *Polymer Grid Reinforcement*, Thomas Telford Publishing, pp. 1830 (1984).
9. Rathje, E., Rauch, A., Trejo, D. and et al. "Evaluation of crushed concrete and recycled asphalt pavement as backfill for mechanically stabilized earth walls", *CTR Technical Report 0-4177-3* (2006).
10. Liu, C.N., Zornberg, J.G. and Chen, T.C. "Behavior of geogrid-sand interface in direct shear mode", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **135**(12), pp. 1863-1871 (2009).
11. Arulrajah, A., Rahman, M.A., Piratheepan, J. and et al. "Evaluation of interface shear strength properties of geogrid-reinforced construction and demolition materials using a modified large-scale direct shear testing apparatus", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **26**(5), pp. 974-982 (2014).
12. Soleimanbeigi, A., Tanyu, B.F., Aydilek, A.H. and et al. "Evaluation of recycled concrete aggregate backfill for geosynthetic-reinforced MSE walls", *Geosynthetics International*, **26**(4), pp. 396-412 (2019).
13. Soleimanbeigi, A. and Likos, W. "Mechanical properties of recycled concrete aggregate and recycled asphalt pavement reinforced with geosynthetics", In *Geo-Congress 2019: Earth Retaining Structures and Geosynthetics* (pp. 284-292), Reston, VA: American Society of Civil Engineers (Mar. 2019).
14. Mehrjardi, G.T., Azizi, A., Haji-Azizi, A. and et al. "Evaluating and improving the construction and demolition waste technical properties to use in road construction", *Transportation Geotechnics*, **23**(7), pp. 1-13 (2020).
15. Udomchai, A., Hoy, M., Suddepong, A. and et al. "Generalized interface shear strength equation for recycled materials reinforced with geogrids", *Sustainability*, **13**(16), pp. 1-16 (2021).
16. Silva, R.V., Brito, J. and Dhir, R.K. "Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production", *Construction and Building Materials*, **65**, pp. 201-217 (2014).
17. Rao, A., Jha, K.N. and Misra, S. "Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete", *Resources, Conservation and Recycling*, **50**(1), pp. 71-81 (2007).
18. Herrador, R., Perez, P. and Garach, L. "Use of recycled construction and demolition waste aggregate for road course surfacing", *Journal of Transportation Engineering*, **138**(2), pp. 182-190 (2011).
19. Poon, C.S. and Chan, D. "Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base", *Construction and Building Materials*, **20**(8), pp. 578-585 (2006).
20. FHWA, "Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes", In: Berg, R.R. Christopher, B.R. Samtani, N.C. (Eds.), *FHWA-NHI-10e024*, Federal Highway Administration, USA (2010).
21. Publication No. 101, "Technical and General Specifications of the Road", Second Review, Vice President for Strategic Planning and Supervision (in Persian) (2013).
22. ASTM D422-87, "Standard test method for particle-size analysis of soils (Withdrawn 2016)", *ASTM International* (2016).
23. ASTM D1557, "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>))", *ASTM International* (2012).
24. ASTM 854-87 D, "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer", *ASTM International* (2016).
25. ASTM C127, "Test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate 2", *ASTM International* (2015).
26. ASTM C128-15, "Standard test method for relative density (Specific Gravity) and absorption of fine aggregate", *ASTM International* (2015).

27. ASTM D4972-19, "Standard test methods for pH of soils", ASTM International (2013).
28. ASTM D5321, Standard test method for determining the coefficient of soil and geosynthetic or geosynthetic and geosynthetic friction by the direct shear method", ASTM Designation: D5321-02. ASTM (2002).
29. Moradi, D., *Comprehensive Handbook of soil Mechanics soil Engineering and Geotechnics Laboraories* (2019).
30. Sivakugan, N. and Das, B.M. "Geotechnical engineering: a practical problem solving approach", *Fort Lauderdale, FL: J. Ross Publishing* (2010).
31. Berg, R., Christopher, B. and Samtani, N. "Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes-volume I", Federal Highway Administration (FHWA), Washington D.C. (2009).