

## بررسی پارامترهای مقاومت برشی ماسه مسلح به EVA بر اساس آزمایش برش مستقیم

مسعود عامل سخی<sup>۱\*</sup>، مهسا میری<sup>۲</sup> و مرتضی جیریایی شراهی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران  
<sup>۲</sup>دانش آموخته گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران  
<sup>۳</sup>دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۲)

### چکیده

تثبيت و تسليح خاک‌ها از دیرباز نقش مهمی در علوم عمرانی به خصوص در علم ژئوتکنیک ایفا کرده‌است و با گذشت زمان و نیاز به زمینی مقاوم‌تر و با ثبات‌تر برای تحمل بارهای ثقلی و نیروهای برشی بیشتر، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار گردیده‌است. هم‌چنین در سال‌های اخیر با ورود محیط‌زیست به صنعت ساخت‌وساز، با هدف کاهش اثرات نامطلوب ضایعات صنعتی و نخاله‌های ساختمانی بر محیط زندگی افراد و حفظ محیط‌زیست برای آیندگان، در بسیاری از موارد باعث کاهش هزینه‌های اقتصادی پروژه‌ها نیز می‌گردد. در این پژوهش، به تسليح خاک ماسه‌ای در دو حالت سست و نیمه متراکم با استفاده از ماده ضایعاتی صنعتی پلیمری با نام کامل اتیلن-وینیل استات (EVA: Ethylene-Vinyl Acetate) با هدف بررسی اثر این ماده افزودنی بر پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه‌ای پرداخته شده‌است. آزمایش‌ها در درصدهای مختلف وزنی EVA (۰، ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵)، بدون افزودن رطوبت و به شیوه درصد وزنی صورت گرفته‌است. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه برش مستقیم کوچک مقیاس انجام گرفته و نتایج بدست آمده نشان می‌دهد افزودن این ماده ضایعاتی به خاک در دو تراکم مختلف باعث افزایش هر دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح شده‌است که اثر آن بر روی زاویه اصطکاک مشهودتر بوده و اثر افزایش مقاومت برشی آن بر خاک سست بیشتر از خاک متراکم است؛ با این وجود مقدار بهینه، در ۱٪ افزودنی برای هر دو حالت سست و نیمه متراکم اتفاق می‌افتد.

**کلید واژه:** بهسازی خاک، ماسه، ماده ضایعاتی، اتیلن-وینیل استات (EVA)، برش مستقیم، محیط‌زیست

## ۱ مقدمه

با وجود پیشرفت جوامع و گسترش راه‌ها و ساختمان‌های بلند و دیگر سازه‌ها، نیاز به زمینی مقاوم‌تر و مستحکم‌تر برای احداث پی سازه‌ها، بستر جاده‌ها، سدها و ... با مقاومت کافی بیش از پیش اهمیت پیدا کرده است، بنابراین تثبیت و تسلیح خاک‌های سست اعم از رسی و یا ماسه ای مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. همچنین بازیافت و دفع ضایعات و نخاله‌های صنعتی از مشکلات اصلی محیط زیست به شمار می‌رود که باقی ماندن آنها در محیط زندگی انسان‌ها و موجودات کره زمین باعث آسیب رساندن به زیستگاه طبیعی آنها می‌شود. امروزه سعی می‌شود با هدف افزایش مقاومت و ظرفیت بباری خاک، از مواد ضایعاتی در تثبیت و تسلیح خاک استفاده گردد تا با این روش به حفظ محیط زیست نیز کمک شود. پژوهشگران حوزه ژئوتکنیک بر روی راهکارهای گوناگونی از روش‌های سنتی تا مدرن برای بهسازی، تسلیح و تثبیت انواع خاک‌ها مطالعه و تحقیق کرده‌اند. از جمله این روش‌ها شامل: روش تزریق شیمیایی، تراکم دینامیک، استفاده از تسمه‌ها و ژئوتکستایل‌ها، میخ گذاری، اختلاط خاک با مواد مختلف هم‌چون پلاستیک، الیاف و ... می‌توان اشاره نمود. استفاده از هر کدام از این روش‌ها در پروژه‌ها وابسته به شرایط آن از قبیل نوع خاک، قرارگیری زمین موردنظر، دسترسی آسان به مصالح تسلیح و ... می‌باشد. استفاده از تراشه لاستیک‌های فرسوده یکی از راهکارهای زیست محیطی در خصوص بهسازی خاک ماسه‌ای با مصالح دورریز است (Amel-Sakhi, 2001). لانگ و همکاران (۲۰۱۹) برای بهسازی و تثبیت خاک‌های نرم بستر راه آهن پرسرعت که از نظر سلامت ساختاری و دوام بسیار مهم است، به بررسی اثر افزودن ضایعات محلی ذغال سنگ به خاک ضعیف پرداختند که سبب افزایش فشاری نمونه‌ها شد (Long et al., 2019). استفاده از سیستم‌های خاک ژئوستنتیک به عنوان روشی دیگر جهت جایگزینی برای خاکریزهای

معمولی، به ویژه برای خطوط سریع السیر راه آهن، به دلیل مساحت پایه کوچکتر نسبت به خاکریزهای معمولی محبوبیت پیدا کرده است (Esen et al., 2021). لیکن یکی از موارد مهم و اثرگذار، هزینه‌های اقتصادی پروژه‌ها می‌باشد که در سال‌های اخیر سعی شده است با استفاده از مواد ضایعاتی هم‌چون پلاستیک‌ها، لاستیک، پودر آهن و ... علاوه بر تقویت خصوصیات خاک، باعث کاهش هزینه‌ها نیز بشود. اختلاط پودر آهن به عنوان ماده ارزان قیمت با خاک‌های رمنده است که باعث بهبود خصوصیات این خاک و کاهش نشست فروریزی هنگام مرطوب شدن، می‌شود و نسبت بهینه پودر آهن در این نوع خاک‌ها، ۵٪ تا ۶٪ وزنی خاک می‌باشد (Alshaba et al., 2018). در شرایط کمبود خاک‌های دانه‌ای مناسب در محل‌های مختلف، الیاف پسته بیرونی نارگیل و خاکستر بادی به دلیل در دسترس بودن زیاد به عنوان مواد زائد و حفظ منابع طبیعی در تقویت مشخصات خاک نیز استفاده شده‌است و با استفاده از آزمایش برش مستقیم، نتایج نشان داد مقاومت برشی افزودن ۲ درصد الیاف نارگیل و ۱۰ درصد خاکستر بادی مخلوط شده، ۱/۵ تا ۲ برابر مقاومت برشی خاک بدون افزودنی می‌باشد (Praveen and Kurre, 2020). در پژوهشی دیگر، به دلیل نگرانی‌های زیست محیطی و مشکلات مالی الیاف مصنوعی، به بهبود رفتار ژئوتکنیکی مخلوط خاک رس و ماسه با اختلاط الیاف کناف با استفاده از برش مستقیم بزرگ و آزمایش تراکم پرداخته شد. نتایج نشان داد افزودن مقدار مشخصی از الیاف کناف به مخلوط ماسه و رس باعث بهبود انعطاف پذیری مخلوط و بهبود پارامترهای مقاومت برشی شده، در نتیجه افزودن مقدار مناسب الیاف طبیعی مانند الیاف کناف را می‌توان به عنوان یک راه حل اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست دانست (EsmailpourShirvani et al., 2019). استفاده از مواد زائد پلاستیکی در زمینه مهندسی عمران، یکی از راه‌حل‌های مناسب برای کمک به دفع

زباله‌ها به خصوص پلاستیک‌ها می‌باشد. در پژوهشی قطعات زباله‌های پلاستیکی با دو نوع خاک (خاک رس و خاک ماسه‌ای) با نسبت‌های مختلف مخلوط (۶، ۴، ۲، ۰) ۸، درصد وزنی) کردند. برای دو نوع خاک، پارامترهای مقاومت برشی (مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) نمونه‌های تقویت شده و غیرتقویت شده با قطعات پلاستیکی توسط دستگاه برش مستقیم مورد بررسی قرار گرفت. طبق آزمایش‌های تجربی، قطعات زباله‌های پلاستیکی به دلیل افزایش اصطکاک داخلی باعث افزایش قابل توجهی در مقاومت خاک‌های ماسه‌ای و رسی می‌شود اما درصد افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه‌ای کمی بیشتر از خاک رس است (Nsaiif, 2013). بختی و همکاران با افزودن الیاف تایر لاستیک به خاک رس بنتونیت نشان دادند که مقدار شکل‌پذیری با افزایش مقدار الیاف لاستیک افزایش می‌یابد (Bekhiti et al., 2013). علاوه بر تاثیر نوع مواد بر خصوصیات خاک، شکل ظاهری و ابعاد نیز می‌تواند بر بهسازی موثر باشد؛ از این رو اکبری مهر و همکاران برای ارزیابی مقاومت برشی خاک رسی مخلوط با ضایعات لاستیک از سه شکل مختلف لاستیک از جمله گرانول، چیپس، الیاف و پودر استفاده کردند. آزمایش‌های مختلفی از جمله تراکم، تک محوری، برش مستقیم و آزمایش‌های سه محوری برای ارزیابی پارامترهای ژئوتکنیکی مخلوط خاک و لاستیک با هدف بررسی میزان افزودنی لاستیک، ابعاد و فرم لاستیک بوده‌است. نتایج نشان داد مقاومت مخلوط حاوی خرده لاستیک در مقایسه با مخلوط حاوی پودر لاستیک تحت تنش‌های مختلف ۱۰-۲۵٪ افزایش یافت و الیاف لاستیک مقاومت بالاتری نسبت به سایر اشکال لاستیک دارند. با توجه به کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک نمونه‌های مخلوط و مقاومت برشی بهینه مخلوط، استفاده از ضایعات لاستیک برای کاربردهای مختلف مهندسی ژئوتکنیک، مانند مواد پرکننده، توصیه می‌شود (Akbarimehr et al., 2020). در پژوهشی دیگر مهدی‌پور و همکاران به مطالعه رفتار ماسه مسلح شده توسط تراشه‌های کف‌پوش‌های لاستیکی ضایعاتی با نسبت طول به عرض مختلف و سه درصد حجمی مختلف و در تراکم‌های متفاوت پرداختند. که نتایج نشان داد با افزایش درصد حجمی مواد افزودنی عدد ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR) افزایش یافته و هم‌چنین نسبت طول به عرض نقش موثری در تغییرات پارامتر CBR دارد (Mehdipour et al., 2010). بررسی اثر استفاده از ضایعات پلاستیکی یکبار مصرف در بهبود ظرفیت باربری خاک ماسه‌ای نشان داد که با قراردادن قطعات پلاستیکی در خاک، ظرفیت باربری افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند و مقادیر بهینه بین ۲ تا ۲/۵ درصد می‌باشد (Hooshyar and Rostami, 2018). تثبیت نانوکربنات کلسیم با خاک CL و تسلیح آن با ضایعات الیاف فرش نشان داد که افزودن نانوذرات به خاک رس باعث بهبود خصوصیات خاک رس می‌شود و علاوه بر این، ضایعات الیاف فرش سختی خاک را افزایش می‌دهد (Choobbasti et al., 2019). هم‌چنین افزودن براده آلومینیم به خاک CL تأثیر فراوانی بر روی وزن مخصوص خشک بیشینه مخلوط رس و ذرات آلومینیم ندارد ولی باعث کاهش چشم‌گیر وزن مخصوص بیشینه در مخلوط رس و ذرات پلی‌اتیلن بازیافتی می‌شود (Safar Razavizadeh, 2014). اثر بهسازی خاک با استفاده از الیاف پلی‌استر بر پارامترهای مقاومت برشی خاک با استفاده از تست برش مستقیم، سبب بهبود قابل توجه خاک SC شده‌است. هم‌چنین مقدار بهینه این الیاف ۱٪ گزارش شده‌است (Nguyena et al., 2015). تسلیح خاک رس با استفاده از الیاف پلیمر تایر بازیافت شده و الیاف شیشه نیز نشان داد بالاترین افزایش مقاومت برای الیاف تایر ۰.۵٪ و الیاف شیشه ۱٪ گزارش شده است و فراتر از آن مقاومت کاهش می‌یابد (Valipour et al., 2020). افزودن الیاف پلی‌پروپیلن جهت بررسی تأثیر درصد وزنی و طول بر روی

زباله‌ها به خصوص پلاستیک‌ها می‌باشد. در پژوهشی قطعات زباله‌های پلاستیکی با دو نوع خاک (خاک رس و خاک ماسه‌ای) با نسبت‌های مختلف مخلوط (۶، ۴، ۲، ۰) ۸، درصد وزنی) کردند. برای دو نوع خاک، پارامترهای مقاومت برشی (مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) نمونه‌های تقویت شده و غیرتقویت شده با قطعات پلاستیکی توسط دستگاه برش مستقیم مورد بررسی قرار گرفت. طبق آزمایش‌های تجربی، قطعات زباله‌های پلاستیکی به دلیل افزایش اصطکاک داخلی باعث افزایش قابل توجهی در مقاومت خاک‌های ماسه‌ای و رسی می‌شود اما درصد افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه‌ای کمی بیشتر از خاک رس است (Nsaiif, 2013). بختی و همکاران با افزودن الیاف تایر لاستیک به خاک رس بنتونیت نشان دادند که مقدار شکل‌پذیری با افزایش مقدار الیاف لاستیک افزایش می‌یابد (Bekhiti et al., 2013). علاوه بر تاثیر نوع مواد بر خصوصیات خاک، شکل ظاهری و ابعاد نیز می‌تواند بر بهسازی موثر باشد؛ از این رو اکبری مهر و همکاران برای ارزیابی مقاومت برشی خاک رسی مخلوط با ضایعات لاستیک از سه شکل مختلف لاستیک از جمله گرانول، چیپس، الیاف و پودر استفاده کردند. آزمایش‌های مختلفی از جمله تراکم، تک محوری، برش مستقیم و آزمایش‌های سه محوری برای ارزیابی پارامترهای ژئوتکنیکی مخلوط خاک و لاستیک با هدف بررسی میزان افزودنی لاستیک، ابعاد و فرم لاستیک بوده‌است. نتایج نشان داد مقاومت مخلوط حاوی خرده لاستیک در مقایسه با مخلوط حاوی پودر لاستیک تحت تنش‌های مختلف ۱۰-۲۵٪ افزایش یافت و الیاف لاستیک مقاومت بالاتری نسبت به سایر اشکال لاستیک دارند. با توجه به کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک نمونه‌های مخلوط و مقاومت برشی بهینه مخلوط، استفاده از ضایعات لاستیک برای کاربردهای مختلف مهندسی ژئوتکنیک، مانند مواد پرکننده، توصیه می‌شود (Akbarimehr et al., 2020).

خوردگی موثر بوده و استحکام کششی آن به میزان قابل توجهی افزایش یافته است (Peng et al., 2021). سعیدی کیا و مدنی به بررسی تأثیر جایگزینی ۱۵/۵ و ۲۵ درصد اتیلن وینیل استات و وینیل استات بر خواص مخلوط های پایه سیمان آلومینات کلسیم پرداختند. نتایج نشان می دهد اتیلن وینیل استات با نسبت پلیمر به سیمان ۵ و ۲۵ درصد، عملکرد مطلوبی نسبت به وینیل استات داشته و در ۱۵٪ جایگزینی، این دو پلیمر عملکرد یکسانی از خود نشان داده اند (SaediKia and Madani, 2018). از آنزیم اوره آز برای تثبیت خاک ماسه استفاده شده است و اثر مثبت آن به اثبات رسیده است (Yousefi et al., 2021). در پژوهش آزمایشی دیگری کاربرد ژئولیت و دانه های تاپر فرسوده بر تثبیت خاک ماسه مورد مطالعه قرار گرفت (Soltani et al., 2022). در مطالعه آزمایشگاهی دیگری اثرات بهبود رفتار مقاومتی خاک رس در اثر استفاده از خاکستر باگاس، خاکستر پوسته برنج و خاکستر پوسته بادام مشاهده گردید (Amelsakhi and Ebrahimi, 2022). استفاده از ضایعات بتنی در افزایش مقاومت برشی ماسه با استفاده از آزمایش برش مستقیم بزرگ بررسی شده است و اثر مثبت استفاده از این مصالح که اگر در طبیعت رها گردد مشکلات محیط زیستی فراوانی به وجود می آورد مطالعه شده است (Amelsakhi and Tehrani, 2023). میری و همکاران به استفاده از مصالح پلیمری و تأثیر مثبت آن با استفاده از آزمایش سی بی آر پرداختند که به عنوان یک مسلح کننده ارزان میتواند مورد استفاده قرار گیرد (Miri et al., 2023). با توجه به اهمیت و گستردگی استفاده از افزودنی های مختلف به منظور بهسازی خاک، هدف از این پژوهش بررسی اثر تسلیح به روش اختلاط بر مقاومت خاک ماسه ای با استفاده از مواد ضایعاتی پلیمری اتیلن-وینیل استات (EVA) در درصدهای وزنی مختلف و در دو نوع تراکم مختلف خاک است. لازم به ذکر است از این مصالح تاکنون در صنعت کفش، تولید اسباب بازی، لوازم خانگی،

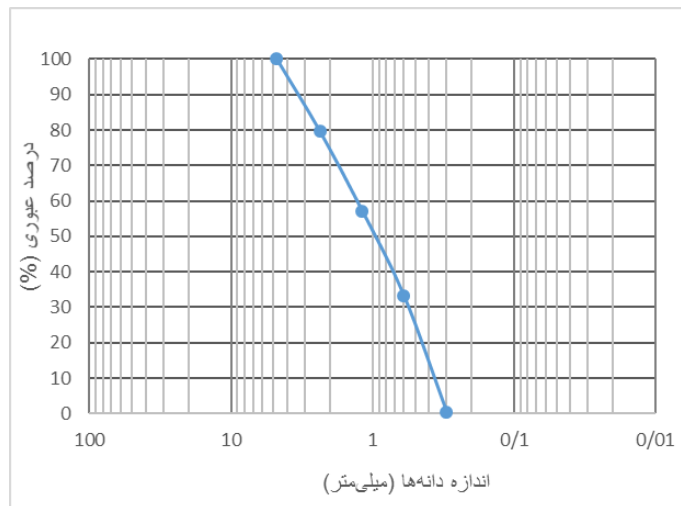
ترک خوردگی یک خاک رس ماسه دار با مقادیر مختلف سیمان تثبیت شده، نشان داد با افزایش درصد وزنی الیاف، تنش حداکثر افزایش و هم چنین با افزایش مقدار سیمان، تأثیر الیاف بر تغییر شکل کاهش یافت (Cristelo et al., 2017). هم چنین در تحقیقی دیگر برای تثبیت شن و ماسه با استفاده از الیاف پلی پروپیلن، در ۰/۸٪ افزودنی، مقاومت فشاری و کششی به ترتیب ۱۰۸/۰۷٪ و ۲۹۵/۴۲٪ افزایش یافت (Liu et al., 2017). به منظور بررسی رفتار مکانیکی ماسه بابلرس تقویت شده با سیمان همراه با مسلح کننده های الیاف گونی، پلی اتیلن ترفتالات و پلی پروپیلن آزمایش هایی صورت پذیرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد در هر دو آزمایش برش مستقیم و سه محوری، افزودن الیاف به ماسه سیمانی مقاومت حداکثر و کرنش گسیختگی را افزایش و سختی را کاهش داد. در هر دو آزمایش برش مستقیم و سه محوری، الیاف پلی پروپیلن نسبت به الیاف نوار پلی اتیلن ترفتالات تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت برشی ماسه سیمانی شده داشت (Malidarreh et al., 2017). علاوه بر اختلاط مواد با خاک برای بهسازی خاک های سست، افزودن مواد شیمیایی و پلیمری یکی دیگر از روش های تثبیت خاک های مسئله دار می باشد که می توان به پژوهش های میرزابابایی و همکاران (۲۰۱۷) در زمینه تأثیر دو ماده افزودنی شیمیایی پلی (وینیل الکل) و اسید کربوکسیلیک تتر ۴،۳،۲،۱ بوتان بر روی مقاومت یک نمونه خاک رس منبسط شونده (Mirzababaei et al., 2017) و مطالعات رضایی ملک و همکاران جهت تثبیت خاک سیلتی با استفاده از یک پلیمر مایع فعال شده مرطوب از خانواده عمومی متیلن دیفنیل دیازوسیانات اشاره نمود (Rezaeimalek et al., 2017). در پژوهشی دیگر، به علت عملکرد مکانیکی ضعیف خاک های سیلتی به تقویت آن با استفاده از کاه گندم و پلی وینیل الکل (PVA) جهت بهبود مشخصات ژئوتکنیکی خاک پرداختند. نتایج نشان می دهد خاک سیلتی تقویت شده با دو مواد مذکور در برابر

تجدیدناپذیر بوده، به کارگیری آن‌ها در زمینه عمرانی، کمک شایانی به محیط زیست می‌نماید.

## ۲ مشخصات مصالح و آزمایشها

### ۲-۱ مشخصات مصالح مورد استفاده

خاک مورد مطالعه از نوع خاک دانه‌ای با دانه بندی مشخص (رد شده از الک #۴ تا مانده روی الک #۵۰) است که به عنوان خاک پایه در آزمایشها مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس سیستم طبقه بندی متحد، این خاک از نوع ماسه بدانه‌بندی شده می‌باشد. شکل ماسه، منحنی دانه بندی و ویژگی‌های آن به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. منحنی دانه بندی خاک.

جدول ۱. مشخصات خاک.

Cu	Cc	D <sub>60</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>10</sub>	G <sub>s</sub>	میانگین خاک	نام خاک (Unified)	نوع خاک
۳/۷۸	۰/۶۳	۱/۴	۰/۵۷	۰/۳۷	۲/۶۵	SP	ماسه	

نیز منحنی مخلوط خاک و ۱۰ درصد وزنی EVA به عنوان یک نمونه ارائه شده است.

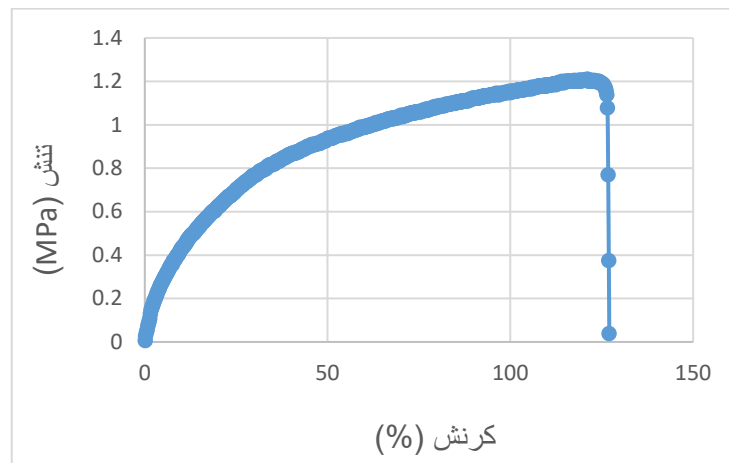
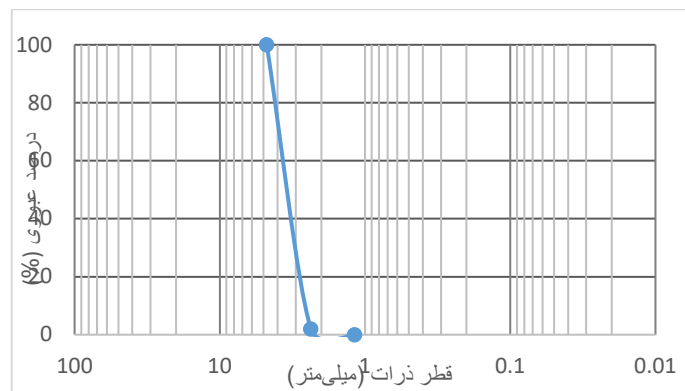
همچنین آزمون کشش برای چندین نمونه EVA با استفاده از دستگاه SANTAM STM-20 و سرعت ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است که میانگین نتایج آن در جدول ۲ آمده است. منحنی تنش- کرنش مهندسی بر اساس

تولید لوله، تولید خودرو و ... استفاده شده است لذا حجم انبوه این مصالح، محققین این مقاله را بر آن داشت تا از این مصالح به نگاه مصالح بازیافتی برای تسلیح خاک ماسه استفاده نمایند. در واقع با توجه به جامد بودن این ماده افزودنی، یک روش آسان، سریع و بدون تغییر بافت خاک است. طبق بررسی‌های انجام شده، تاکنون تلاش چندانی در زمینه بهسازی خاک‌های ماسه‌ای با استفاده از قطعات خرد شده EVA نسبت به مواد دیگر پلیمری انجام نشده است. هم چنین با توجه به ضایعاتی بودن این ماده، باعث کاهش هزینه‌های اقتصادی در زمینه بهسازی پروژه‌های عمرانی می‌گردد و به دلیل آن که بسیاری از مواد پلیمری

مواد تسلیح کننده مورد استفاده در این تحقیق با نام کامل اتیلن-وینیل استات (Ethylene-Vinyl Acetate) به عنوان ماده ضایعاتی صنعتی پلیمری می‌باشد. به منظور اختلاط مواد EVA با خاک، در قطعات تقریباً مساوی و هم‌اندازه خرد شده‌اند که تصویر و منحنی دانه بندی آن به ترتیب در شکل ۲ آمده است. در شکل ۳ منحنی دانه بندی EVA و



شکل ۲. مواد خرد شده EVA.



شکل ۴. نمودار رفتار ماده EVA.

جدول ۲. نتایج میانگین آزمایش کشش EVA در لحظه شکست.

نوع مصالح	مدول الاستیسیته (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	کرنش شکست (%)	حین کرنش بعد از شکست (%)
اتیلن-وینیل استات (EVA)	۲/۹۲	۱/۱۴	۱۲۹/۴۸	۹۳/۹۲

آوردن پارامترهای مقاومتی خاک ( $C$  و  $\phi$ )، حداقل احتیاج به آزمایش تحت سه تنش قائم متفاوت می‌باشد. تنش قائم از تقسیم میزان نیرو قائم بر سطح مقطع نمونه حاصل می‌شود و در طول آزمایش ثابت در نظر گرفته می‌شود. در این آزمایش از چهار تنش قائم ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال استفاده شده‌است.

نمونه‌های مورد آزمایش قرار گرفته، در قسمت تحلیل نتایج با حروف اختصاری نشان داده است که به شرح زیر می‌باشد:

SP: خاک ماسه‌ای بدانه بندی شده

L: تراکم خاک در حالت سست

s-d: تراکم خاک در حالت نیمه متراکم

درصدهای پس از L و یا s-d نشان دهنده میزان درصد افزودنی می‌باشد.

اعداد پس از SP در آزمایش برش مستقیم نشان دهنده تنش قائم نمونه می‌باشد.

به عنوان مثال: SP100\_L 2.5% : خاک سست ماسه‌ای

در ۲/۵٪ افزودنی در تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال

### ۳ بحث و نتایج

#### ۳-۱ خاک سست و نیمه متراکم ماسه‌ای بدون افزودنی

جهت بررسی اثرات EVA بر روی خاک ماسه‌ای با استفاده از آزمایش‌های برش مستقیم، ابتدا پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه‌ای غیر مسلح (خاک پایه) در دو حالت سست و نیمه متراکم بدست آمده است. این دو تراکم در وزن مخصوص‌های سست ( $\gamma = 16/1 \text{ KN/m}^3$ ) و نیمه متراکم ( $\gamma = 17 \text{ KN/m}^3$ ) تعیین شده‌اند. جدول ۳ نتایج پارامترهای مقاومتی خاک ماسه‌ای پایه (بدون افزودنی) را در دو تراکم مختلف نشان می‌دهد.

با توجه به مقدار چسبندگی ناچیز حاصل از آزمایش برش مستقیم برای خاک ماسه‌ای در دو حالت مختلف،

مقادیر نیرو اعمالی-ازدیاد طول رسم می‌شود که نشان دهنده رفتار ماده تحت کشش است، شکل ۴ یک نمونه از رفتار ماده را بر اساس تنش- کرنش نشان می‌دهد.

#### ۲-۲ نحوه آماده سازی و شیوه انجام آزمایش برش مستقیم

در این تحقیق بر اساس انجام آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص خشک حداقل و نیز وزن مخصوص خشک حداکثر، دو وزن مخصوص  $\gamma = 16.1 \text{ KN/m}^3$  به عنوان وزن مخصوص حداقل و نیز  $\gamma = 17 \text{ KN/m}^3$  به عنوان وزن مخصوص حداکثر برای این نمونه خاک بدست آمد. در ادامه تمامی آزمایش‌های برش مستقیم بر روی این دو وزن مخصوص مختلف صورت گرفته است. در ادامه در این مقاله به اختصار به این دو وزن مخصوص حداقل و حداکثر، به اختصار تراکم سست و نیمه متراکم گفته شده است.

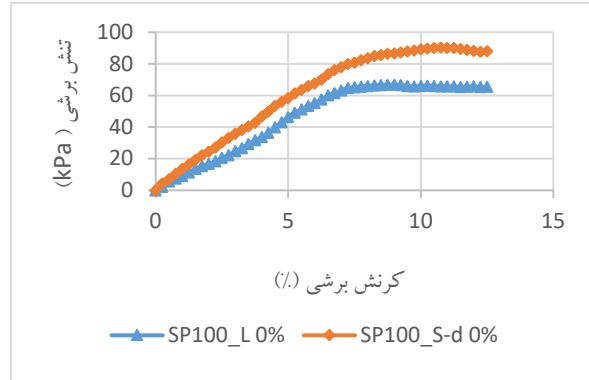
آزمایش‌های برش مستقیم بر روی خاک ماسه‌ای در دو تراکم مختلف سست ( $\gamma = 16.1 \text{ KN/m}^3$ ) و نیمه متراکم ( $\gamma = 17 \text{ KN/m}^3$ ) و در حالات بدون استفاده از مسلح کننده و با استفاده از مسلح کننده EVA در درصدهای مختلف وزنی انجام گرفته است. تراکم‌های سست و نیمه متراکم با توجه به آزمایش‌های تراکم و حداقل وزن مخصوص، تعیین گردیده و تمامی نمونه‌ها در حالت خشک و بدون افزودن رطوبت انجام شده‌است. آزمایش برش مستقیم مطابق استاندارد ASTM-D3080 صورت پذیرفت. نمونه به صورت تصادفی و خشک، باروش تراکم ریزشی در جعبه برش ۱۰\*۱۰ ریخته می‌شود و باید نمونه تا ارتفاعی مشخص قرار می‌گرفت. اگر ارتفاع نمونه مخلوط از آن ارتفاع بیشتر شود باید متراکم گردد تا میزان تراکم نمونه ثابت باشد. پس از گذاشتن بار قائم مورد نظر بر روی جعبه برش، سرعت حرکت دستگاه ۱ میلی‌متر بر دقیقه برای حرکت نیمه بالایی جعبه بر روی نیمه پایینی جعبه تنظیم نموده که با یک سرعت ثابت حرکت نماید. برای بدست

برشی - تنش قائم برای خاک پایه (بدون افزودنی) در دو تراکم مختلف ارائه شده است.

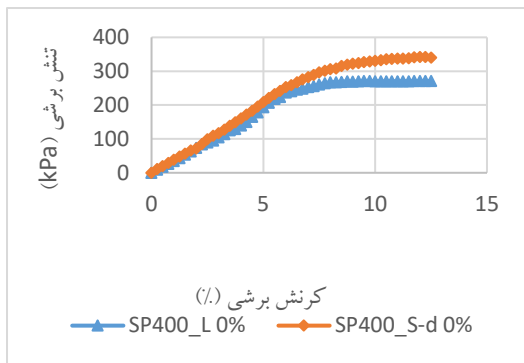
می توان آن ها را صفر در نظر گرفت. در شکل ۵ نمودارهای تنش برشی - کرنش برشی در تنش های قائم مختلف (۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلو پاسکال) و در شکل ۶ نمودار تنش



(ب)



(الف)

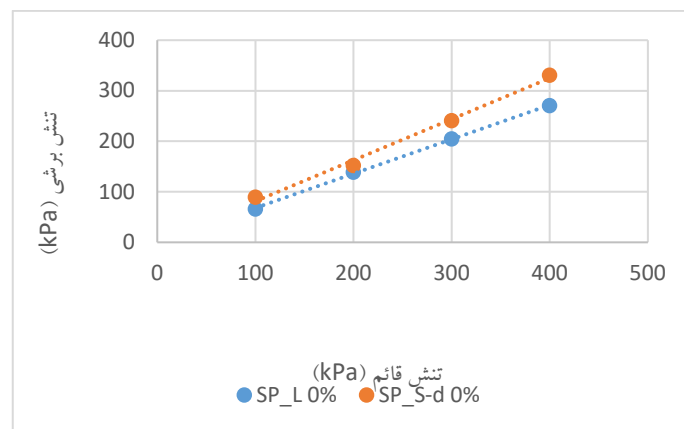


(د)



(ج)

شکل ۵. نمودار تنش برشی-کرنش برشی ماسه در حالت سست و نیمه متراکم در تنش های قائم مختلف: (الف) تنش قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال؛ (ب) تنش قائم ۲۰۰ کیلو پاسکال؛ (ج) تنش قائم ۳۰۰ کیلو پاسکال؛ (د) تنش قائم ۴۰۰ کیلو پاسکال.



شکل ۶. نمودار تنش برشی-تنش قائم ماسه در حالت سست و نیمه متراکم.

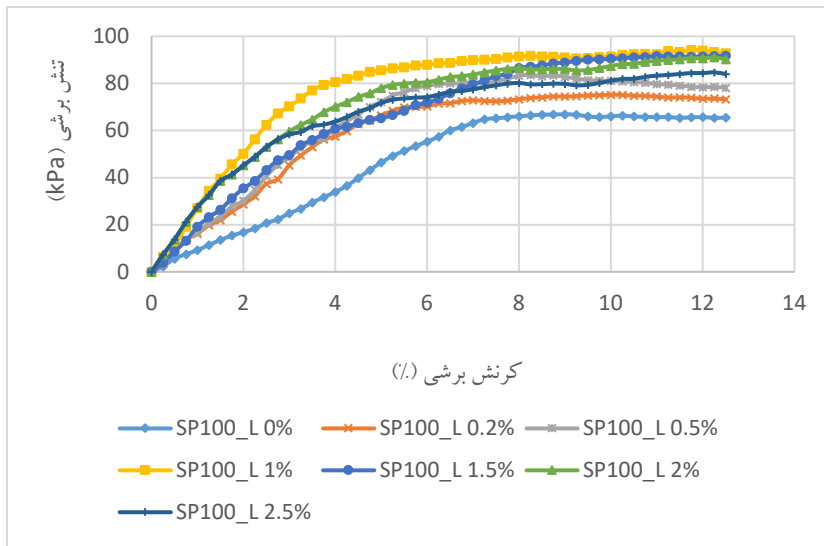
جدول ۳. مقایسه پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه‌ای پایه (بدون افزودنی) در دو حالت سست و نیمه متراکم.

حالت خاک	سست	نیمه متراکم
چسبندگی (kPa)	۰/۰۵	۰/۱
زاویه اصطکاک داخلی خاک (درجه)	۳۴	۳۹

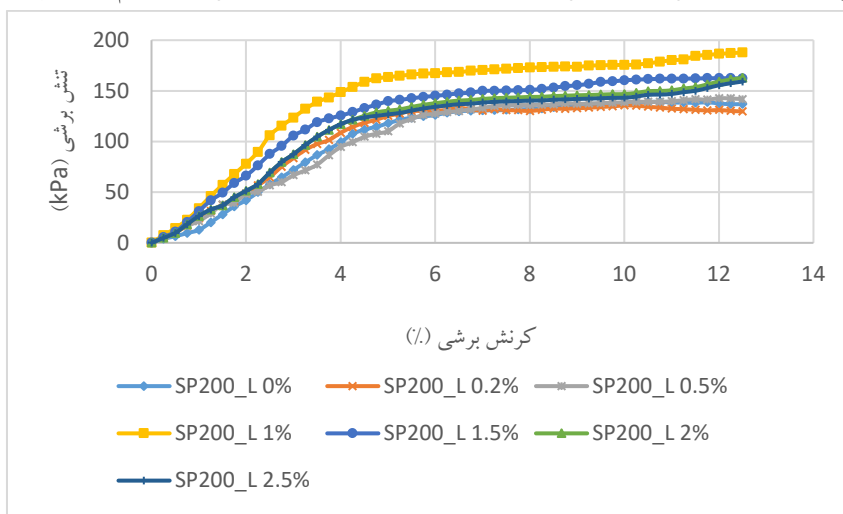
### ۲-۳ اثر افزودن EVA به خاک ماسه‌ای سست

در این قسمت به نتایج آزمایش‌های برش مستقیم بر روی مخلوط خاک سست و EVA پرداخته می‌شود. آزمایش‌ها بر روی خاک ماسه‌ای سست در درصد‌های مختلف وزنی EVA (۰، ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵) انجام گرفت.

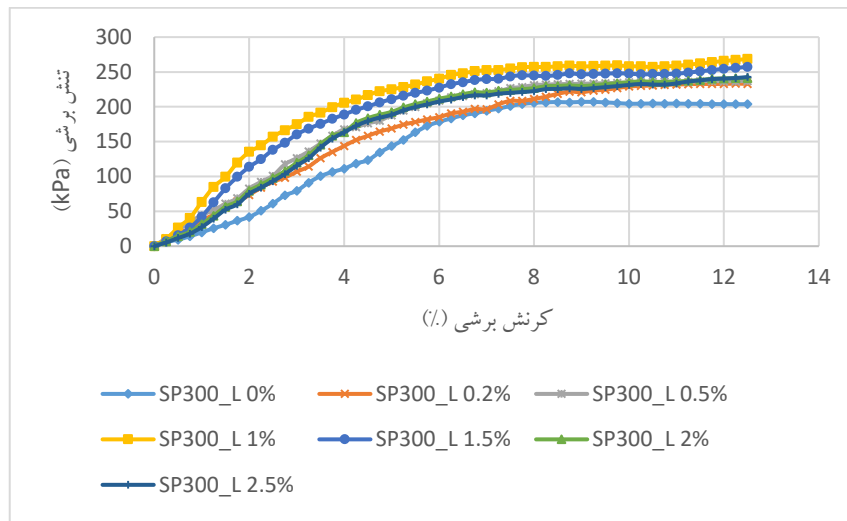
شکل‌های ۷ الی ۱۰ نشان دهنده نمودارهای تنش برشی- کرنش برشی مخلوط خاک سست و ماده افزودنی در درصد‌های مختلف تحت تنش‌های قائم ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال و شکل ۱۱ نیز نشان دهنده نمودار تنش برشی- تنش قائم نشان داده‌است.



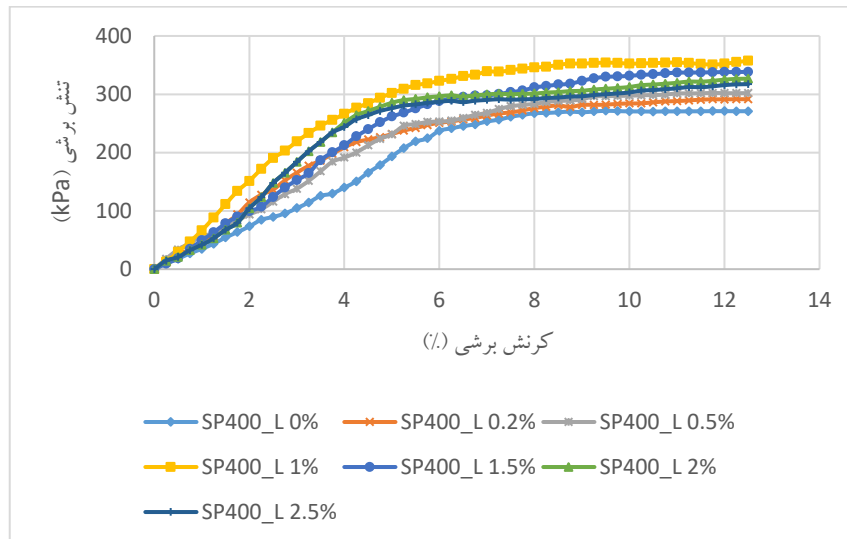
شکل ۷. نمودار تنش برشی- کرنش برشی ماسه سست در درصد‌های مختلف مواد افزودنی در تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال.



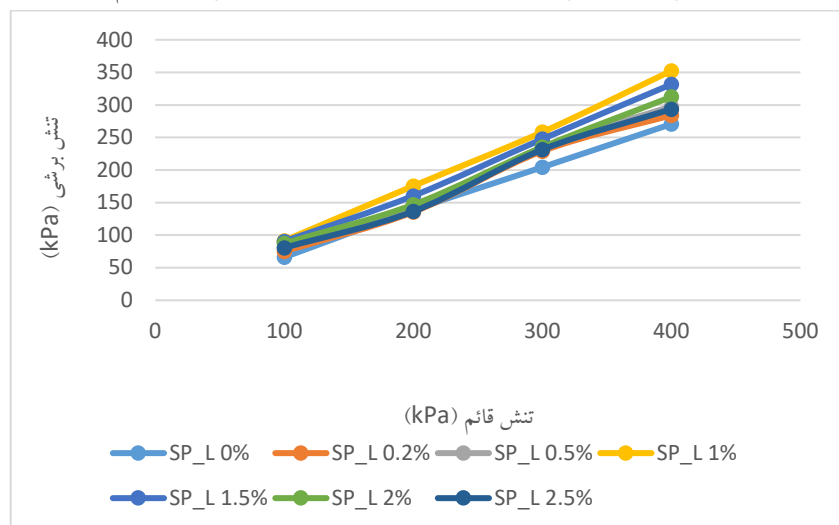
شکل ۸. نمودار تنش برشی- کرنش برشی ماسه سست در درصد‌های مختلف مواد افزودنی در تنش قائم ۲۰۰ کیلوپاسکال.



شکل ۹. نمودار تنش برشی- کرنش برشی ماسه سست در درصدهای مختلف مواد افزودنی در تنش قائم ۳۰۰ کیلوپاسکال.



شکل ۱۰. نمودار تنش برشی- کرنش برشی ماسه سست در درصدهای مختلف مواد افزودنی در تنش قائم ۴۰۰ کیلوپاسکال.

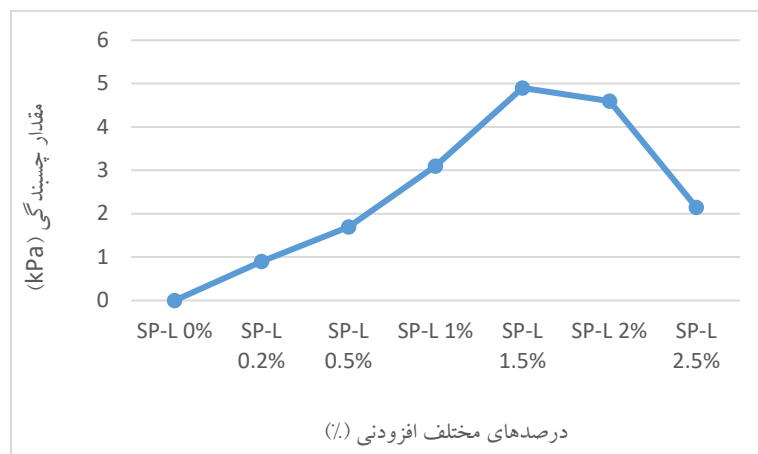


شکل ۱۱. نمودار تنش برشی- تنش قائم ماسه سست در درصدهای مختلف مواد افزودنی.

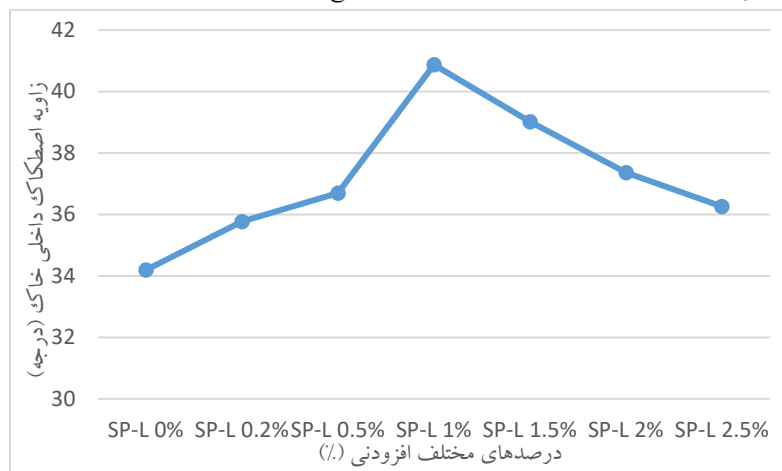
در خاک غیرمسلح پس از آن که خاک به مقاومت برشی حداکثر خود می‌رسد، تقریباً این مقاومت ثابت مانده و یا حتی مقداری کاهش می‌یابد، اما در خاک‌های مسلح شده، مقاومت برشی عموماً به طور صعودی افزایش می‌یابد. هم‌چنین افزودن این مسلح کننده به خاک باعث شده خاک مسلح نسبت به خاک غیرمسلح (خاک پایه) در کرنش افقی برابر، تنش برشی بیشتری تحمل کند، بنابراین افزودن این مسلح کننده، شکل پذیری نمونه را نیز افزایش می‌دهد. در شکل‌های ۱۲ و ۱۵ به ترتیب مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های خاک مسلح و پایه و مسلح شده در خاک سست ماسه‌ای ارائه شده‌اند.

با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان دریافت افزودن EVA به خاک سست ماسه‌ای، باعث افزایش مقاومت برشی نمونه‌های مسلح شده در درصد‌های مختلف افزودنی نسبت به خاک پایه (غیر مسلح) شده‌است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد بیشترین افزایش در مقدار تنش برشی، مربوط به خاک مسلح به ۱٪ وزنی EVA بوده است. نکته جالب توجه در شکل‌های ۷ الی ۱۰ این است که در تمام مقادیر تنش‌های قائم نیز، این افزایش بهینه در درصد وزنی یک درصد مشاهده شده‌است.

در تفسیر چرایی این افزایش می‌توان گفت که افزودن مواد EVA به خاک، باعث تغییر رفتار خاک از حالت ترد و شکننده به رفتاری نرم و انعطاف پذیرتر می‌شود، چرا که



شکل ۱۲. نمودار مقدار چسبندگی خاک سست ماسه‌ای مسلح شده بر حسب درصد‌های مختلف EVA.



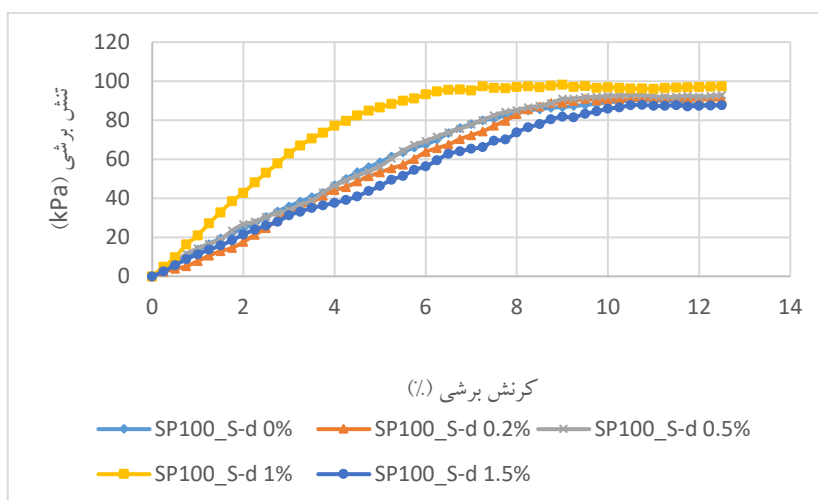
شکل ۱۳. نمودار زاویه اصطکاک داخلی خاک سست ماسه‌ای مسلح شده بر حسب درصد‌های مختلف EVA.

درصدهای ۰/۲، ۰/۵ و ۱ و به ترتیب ۳۵/۷۷، ۳۶/۷ و ۴۰/۸۷ درجه می‌باشد؛ اما بعد از ۱٪ افزودنی که به مقدار حداکثر خود می‌رسد، در ۲ و ۲/۵ درصد به ترتیب به ۳۷/۳۶ و ۳۶/۲۶ درجه کاهش یافت. لازم به یادآوری است زاویه اصطکاک داخلی خاک پایه برای ماسه سست برابر ۳۴/۱۹ درجه می‌باشد.

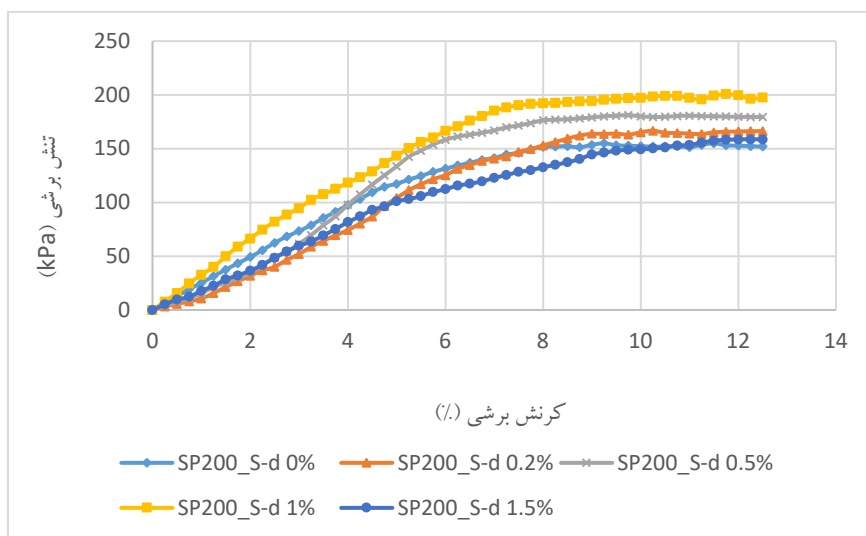
**۳-۳ اثر افزودن EVA به خاک نیمه متراکم ماسه‌ای**  
 نتایج حاصل از افزودن EVA به خاک ماسه‌ای در حالت نیمه متراکم نیز همانند حالت سست، باعث بهبود پارامترهای مقاومت برشی خاک می‌گردد. این آزمایش‌ها در درصدهای ۰، ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ افزودنی انجام گرفت اما در درصدهای ۲ و ۲/۵ به دلیل عدم تراکم تا نقطه مورد نظر و تغییر وزن مخصوص آن، نتایج مربوطه آن‌ها حذف گردید. دلیل این مطلب، حجم بالای مقدار EVA و عدم امکان تراکم مورد نظر می‌باشد. شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ نمودارهای تنش برشی - کرنش افقی تحت تنش‌های قائم ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال و شکل ۱۸ نمودار تنش برشی - تنش قائم اختلاط خاک نیمه متراکم مسلح به EVA را نشان می‌دهد.

افزایش دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بر مقاومت برشی خاک اثر گذاشته و در نهایت باعث بهبود کیفیت خاک می‌شود. با توجه به دو نمودار ۱۲ و ۱۳ می‌توان نتیجه گرفت که افزودن مواد EVA به خاک ماسه‌ای سست باعث افزایش هر دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک شده‌است؛ ولی یکی از نکات مهم و جالب توجه در این تحقیق این است که تاثیر این افزودنی بر پارامتر چسبندگی نسبت به زاویه اصطکاک داخلی خاک بیشتر است که در نهایت باعث افزایش مقاومت برشی خاک مسلح به EVA می‌گردد. چسبندگی در درصدهای ۰/۲، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ به ترتیب ۰/۹، ۱/۷، ۳/۱ و ۴/۹ کیلوپاسکال افزایش یافت ولی در مقادیر ۲ و ۲/۵ درصد به ترتیب ۴/۶ و ۲/۱۵ کیلوپاسکال کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه بیش‌ترین و کم‌ترین میزان چسبندگی در ۱/۵ و ۰/۲ رخ داده که نسبت به خاک پایه افزایش چسبندگی داشته و نشان از تاثیر مثبت این ماده افزودنی بر پارامتر چسبندگی خاک دارد.

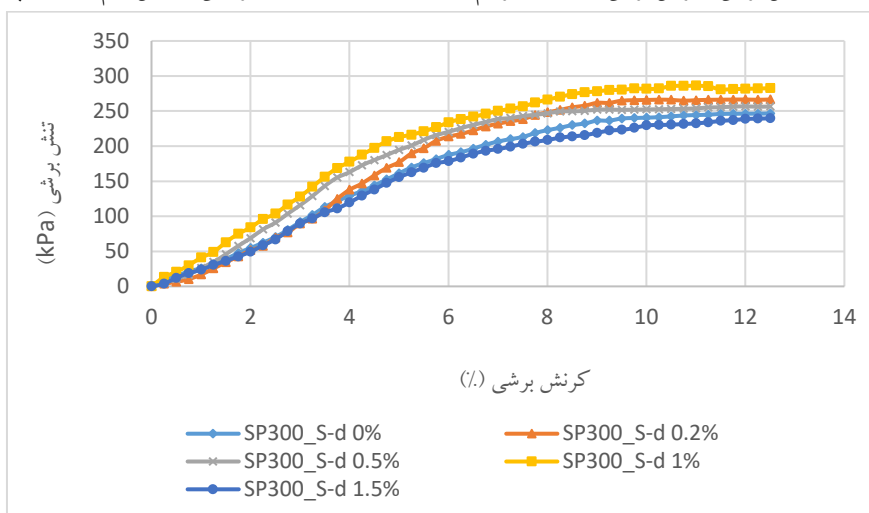
همانطور که نتایج نشان می‌دهد اثر افزودن EVA به خاک باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح می‌شود. با افزایش درصدهای افزودنی مسلح کننده، زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح افزایش یافته که در



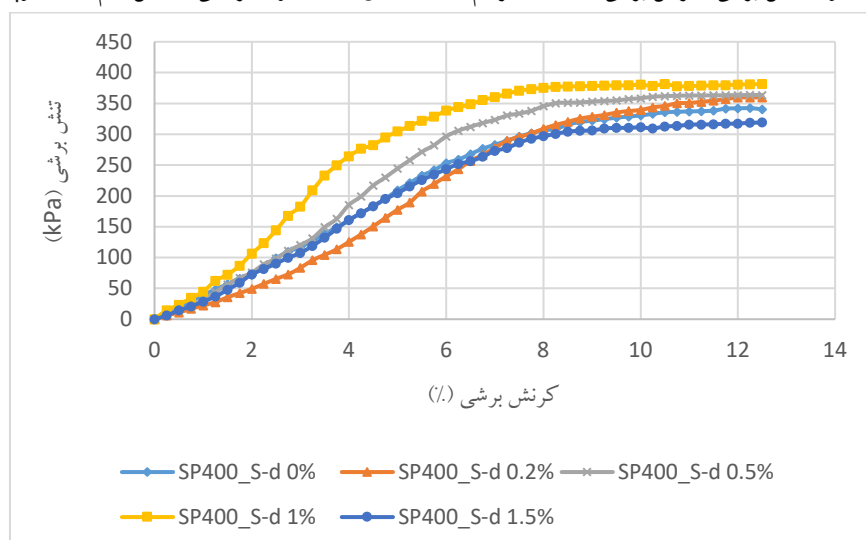
شکل ۱۴. نمودار تنش برشی - کرنش برشی ماسه نیمه متراکم در درصدهای مختلف مواد افزودنی در تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال.



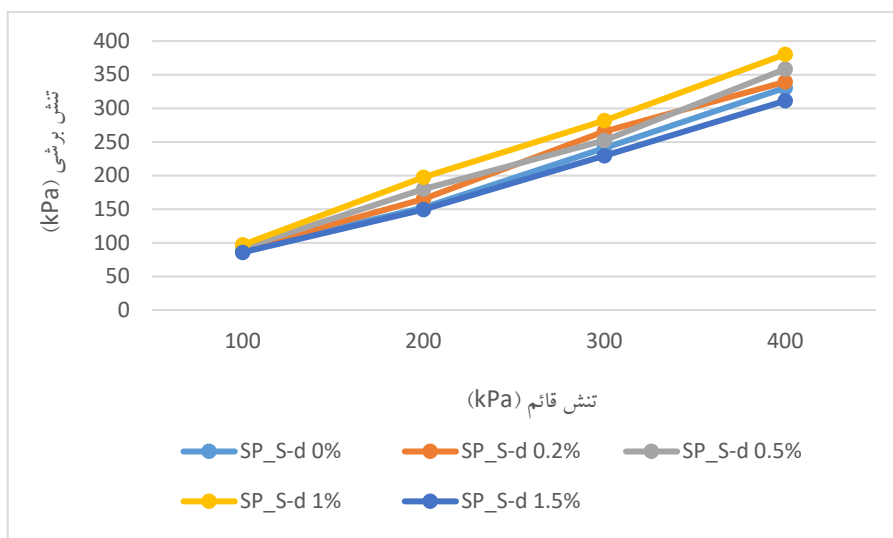
شکل ۱۵. نمودار تنش برشی - کرنش برشی ماسه نیمه متراکم در درصد‌های مختلف مواد افزودنی در تنش قائم ۲۰۰ کیلوپاسکال.



شکل ۱۶. نمودار تنش برشی - کرنش برشی ماسه نیمه متراکم در درصد‌های مختلف مواد افزودنی در تنش قائم ۳۰۰ کیلوپاسکال.



شکل ۱۷. نمودار تنش برشی - کرنش برشی ماسه نیمه متراکم در درصد‌های مختلف مواد افزودنی در تنش قائم ۴۰۰ کیلوپاسکال.

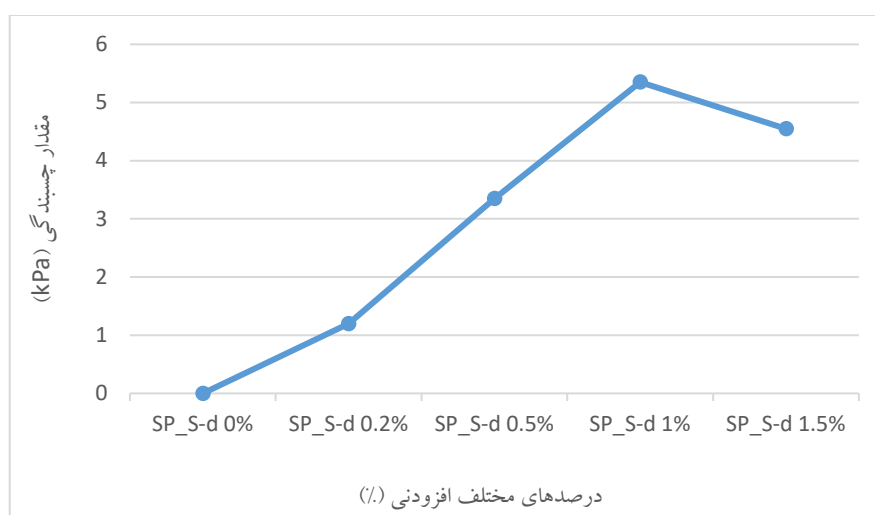


شکل ۱۸. نمودار تنش برشی - تنش قائم ماسه نیمه متراکم در درصدهای مختلف مواد افزودنی.

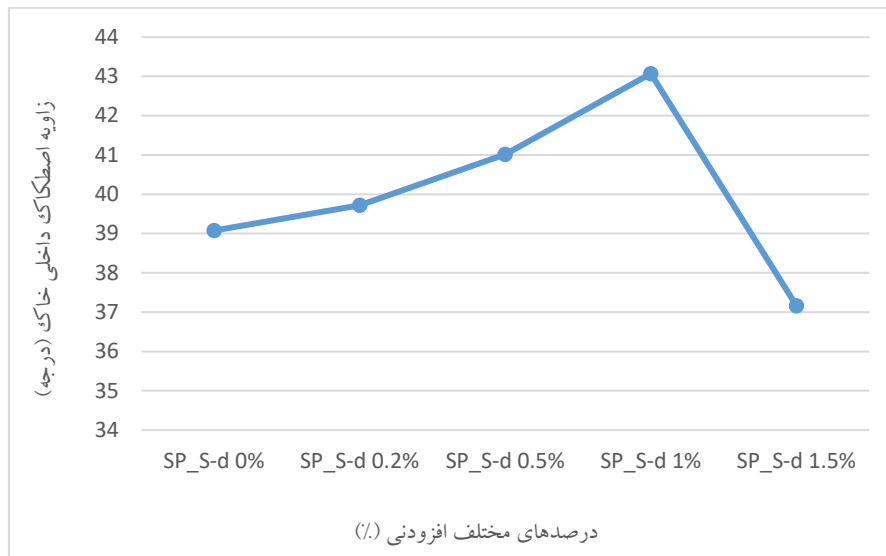
مشهودتر است. نتایج برش مستقیم نشان داد که افزایش مسلح کننده در ۱/۵٪ وزنی، باعث کاهش مقاومت برشی شده است.

در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ به ترتیب تغییرات مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه‌ای نیمه متراکم مسلح به EVA بر حسب درصدهای مختلف افزودنی نشان داده شده‌است.

با توجه به نتایج بدست آمده در این بخش، می‌توان دریافت افزودن EVA به خاک ماسه‌ای نیمه متراکم باعث تغییر در مقاومت برشی نمونه های مسلح شده در درصدهای مختلف افزودنی نسبت به خاک پایه (غیر مسلح) شده‌است. این تغییرات در درصدهای ۰/۲ و ۰/۵ درصد افزایشی است اما شاید بتوان اینگونه بیان نمود که مقادیر افزایش آن چندان زیاد نیست در حالیکه در ۱٪ افزودنی به مقدار حداکثر خود رسیده و نسبت به دو درصد قبلی، افزایش در مقاومت برشی



شکل ۱۹. نمودار مقدار چسبندگی خاک نیمه متراکم ماسه‌ای مسلح شده در درصدهای مختلف EVA.



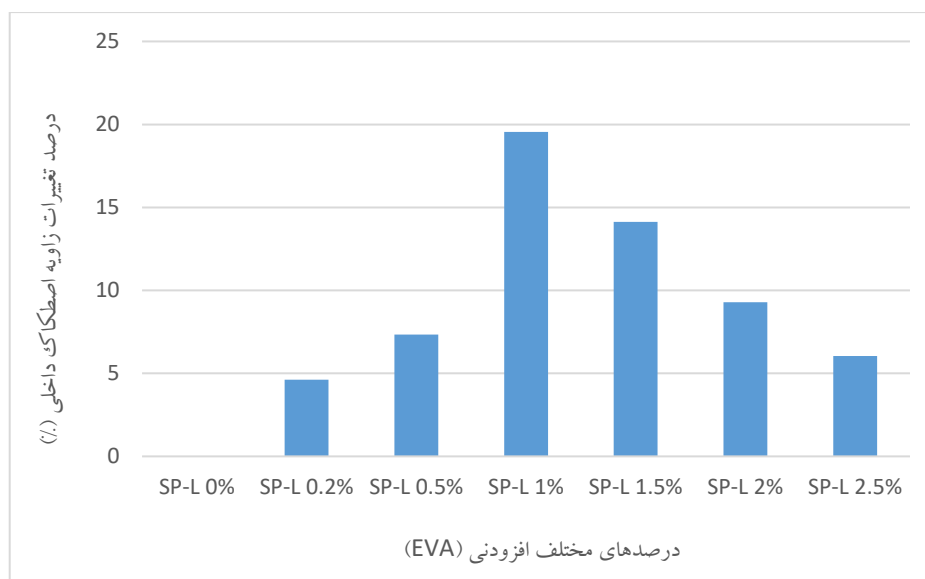
شکل ۲۰. نمودار زاویه اصطکاک داخلی خاک نیمه متراکم ماسه‌ای مسلح شده در درصدهای مختلف EVA.

است که نسبت به خاک پایه نیمه متراکم افزایش زاویه اصطکاک مسلح را به همراه داشته است. پس از ۱٪ افزودنی که حداکثر زاویه اصطکاک مسلح در حالت نیمه متراکم است؛ در ۱/۵٪ افزودنی، زاویه اصطکاک خاک به ۳۷ درجه کاهش می‌یابد. می‌توان علت کاهش زاویه اصطکاک داخلی و در نتیجه کاهش مقاومت این درصد را این گونه تفسیر نمود که با افزایش درصد خرده قطعات EVA، تماس خاک و EVA کاهش و تماس قطعات EVA با خودشان افزایش می‌یابد که این مطلب باعث کاهش زاویه اصطکاک مخلوط خاک و EVA می‌شود.

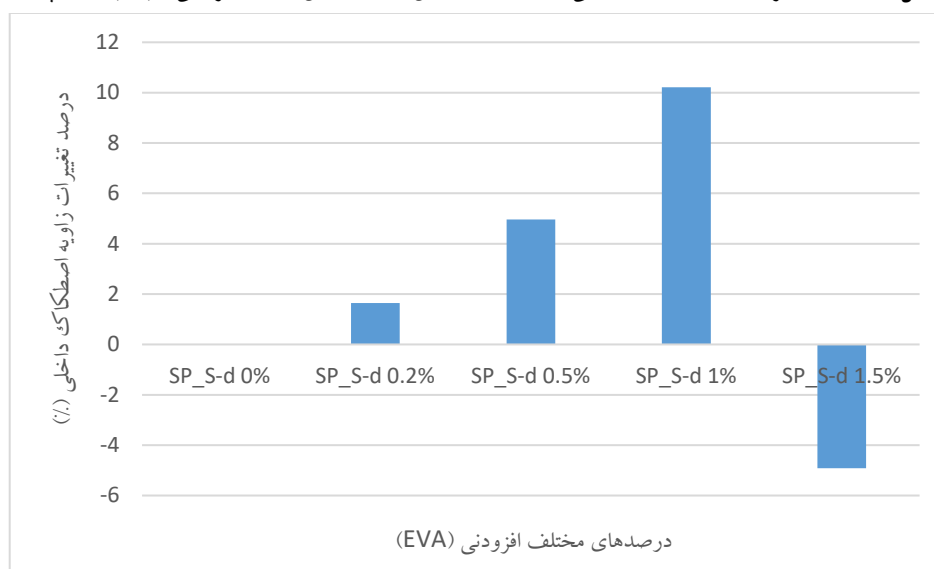
**۳-۴ مقایسه درصد تغییرات زاویه اصطکاک داخلی مسلح برای دو حالت ماسه سست و نیمه متراکم**  
در این قسمت به بررسی درصد تغییرات زاویه اصطکاک داخلی درصدهای مختلف نمونه‌های مسلح نسبت به خاک ماسه‌ای غیر مسلح (خاک پایه) برای دو حالت تراکم خاک ماسه‌ای پرداخته می‌شود. شکل‌های ۲۱ و ۲۲ این تغییرات را به ترتیب برای حالت سست و نیمه متراکم نشان می‌دهند.

شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان می‌دهند که اثر افزودن EVA به خاک ماسه‌ای نیمه متراکم، باعث افزایش پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح (به جز ۱/۵٪ افزودنی که در ادامه توضیح داده خواهد شد) بشود. لازم به ذکر است که همانند نتایج ماسه سست، تاثیر این مسلح کننده بر پارامتر چسبندگی نسبت به زاویه اصطکاک داخلی بیشتر بوده است.

نتایج بدست آمده نشان داد که چسبندگی در درصدهای وزنی ۰/۲ و ۰/۵ به ترتیب ۱/۲ و ۳/۳۵ کیلوپاسکال افزایش یافت که اختلاف این دو درصد در حالت نیمه متراکم بیشتر از حالت سست می‌باشد. هم چنین در ۱٪ افزودنی به بیشترین چسبندگی خود به مقدار ۵/۳۵ کیلوپاسکال رسید اما در ۱/۵٪ افزودنی چسبندگی به مقدار ۴/۵۵ کیلوپاسکال کاهش یافت. همانطور که انتظار می‌رود اختلاط ماده افزودنی و خاک ماسه‌ای نیمه متراکم باعث ایجاد تغییرات در زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌شود؛ البته این تغییرات در ۰/۲٪ وزنی علیرغم افزایشی بودن آن مشهود نبوده و زاویه اصطکاک خاک به ۴۰ درجه می‌رسد و هم چنین در درصدهای وزنی ۰/۵ و ۱ درصد به ترتیب ۴۱ و ۴۳ درجه



شکل ۲۱. درصد تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک سست ماسه‌ای در درصدهای مختلف افزودنی نسبت به خاک پایه.



شکل ۲۲. درصد تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک نیمه متراکم ماسه‌ای در درصدهای مختلف افزودنی نسبت به خاک پایه.

داشته اند. به عبارت دیگر در تمامی درصدهای وزنی، افزایش زاویه اصطکاک خاک مسلح نسبت به خاک غیرمسلح مشاهده می‌گردد و از سوی دیگر، مقدار بهینه در افزایش زاویه اصطکاک، مربوط به یک درصد وزنی مسلح کننده EVA بوده است.

با توجه به شکل ۲۲ اثر افزودنی EVA بر درصد تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در حالت نیمه متراکم ماسه‌ای،

با توجه به شکل، ۲۵ درصد تغییرات زاویه اصطکاک داخلی مخلوط خاک سست ماسه‌ای و EVA در ۰/۲، ۰/۵ و ۱ درصد به ترتیب ۴/۶۲، ۷/۳۴ و ۱۹/۵۴ درصد بوده که در این درصدها نمودار روند صعودی داشته و در ۱٪ افزودنی به اوج خود می‌رسد؛ در درصدهای ۱/۵، ۲ و ۲/۵ به ترتیب ۱۴/۱۳، ۹/۲۸ و ۶/۰۵ درصد نسبت به خاک پایه با وجود قرار گرفتن در قسمت نزولی نمودار، تاثیر مثبت

دست آمده در حد قابل قبولی قرار دارد. هم چنین نمونه‌های که اختلاف آن‌ها با نمونه اصلی بیشتر بود، آزمایش برای بار سوم و چهارم تکرار شد و میانگین نتایج مورد قبول آن‌ها ارائه گردید.

#### ۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش به تسلیح خاک ماسه‌ای با استفاده از مواد ضایعاتی اتیلن-وینیل استات (EVA) در دو حالت سست و نیمه متراکم پرداخته شد. آزمایش برش مستقیم برای مخلوط خاک سست ماسه‌ای و EVA در درصد‌های وزنی ۰، ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۵/۲، هم چنین برای مخلوط خاک نیمه متراکم ماسه‌ای و مواد افزودنی (EVA) در درصد‌های وزنی ۰، ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۱/۵ انجام گرفت. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه برش مستقیم کوچک و به صورت خشک و به شیوه درصد وزنی انجام گرفت که نتایج آن به شرح زیر می‌باشد:

۱. اثر نمونه‌های مسلح شده خاک سست ماسه‌ای با EVA در تمامی درصد‌ها، باعث افزایش مقاومت برشی نسبت به خاک غیرمسلح سست شده است.

۲. افزودن EVA به خاک نیمه متراکم ماسه‌ای باعث بهبود مقاومت برشی در درصد‌های ۰/۲، ۰/۵ و ۱ درصد شده اما در درصد وزنی ۱/۵٪ باعث کاهش مقاومت برشی شده است.

۳. اضافه نمودن مواد ضایعاتی EVA به خاک باعث افزایش کرنش نظیر گسیختگی نمونه‌ها می‌شود که نشان دهنده افزایش شکل پذیری نمونه‌ها می‌باشد.

۴. افزودن مسلح کننده در درصد‌های مختلف به خاک سست ماسه‌ای باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی نسبت به خاک غیرمسلح سست می‌شود که در ۱٪ افزودنی با میزان ۴۰/۸۷ بیشترین زاویه اصطکاک داخلی را از خود نشان می‌دهد.

در ۰/۲، ۰/۵ و ۱ درصد افزودنی به ترتیب ۱/۶۴، ۴/۹۶ و ۱۰/۲۱ درصد به صورت افزایشی می‌باشد که در ۰/۲٪ نسبت به دو درصد دیگر، درصد تغییرات ناچیزی می‌باشد. هم چنین در ۱/۵٪ افزودنی، ۴/۹۱٪ اثر منفی بر روی زاویه اصطکاک داخلی، نسبت به خاک پایه داشته و مقاومت خاک نیز کاهش می‌یابد.

همانطور که شکل‌های ۲۵ و ۲۶ نشان می‌دهند تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در هر دو حالت سست و نیمه متراکم، در ۱٪ افزودنی بیشترین تغییرات مثبت نسبت به خاک پایه هر کدام از تراکم‌ها را دارا می‌باشند. لازم به ذکر است که تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک سست مسلح، ۹/۳۳٪ بیشتر از حالت متراکم می‌باشد که این مطلب به خوبی نشان می‌دهد که اثر مثبت افزودن مسلح کننده در خاک ماسه سست، اثرگذاری به مراتب بیشتر و بهتری نسبت به حالت نیمه متراکم داشته است. در انتها به صورت خلاصه می‌توان در مورد نحوه عملکرد این مصالح و اثر آن بر تغییر پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه اینگونه بیان نمود که این مصالح به عنوان مسلح کننده در بین دانه‌های ماسه قرار می‌گیرند و باعث افزایش در هم قفل شدگی ذرات ماسه و خود می‌شوند. این اثر قفل شدگی ذرات را که یکی از پارامترهای مهم در بحث خاک مسلح است می‌توان به افزایش دو پارامتر چسبندگی خاک مسلح و نیز به زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح نسبت داد. در این تحقیق، افزایش قابل ملاحظه زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح به EVA تاکید بر اثر مثبت و مسلح کننده این مصالح در خاک ماسه است.

#### ۳-۵ تکرارپذیری نتایج

به جهت صحت سنجی نتایج، آزمایش کشش برای تعیین خصوصیات ماده EVA و هم چنین آزمایش برش مستقیم برای خاک ماسه‌ای در دو حالت تراکم سست و نیمه متراکم در درصد‌های مختلف افزودنی تکرار شد که اختلاف نتایج به

آن در محیط زیست، استفاده از چنین مصالحی در تسلیح و بهسازی خاک باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک و چسبندگی آن و در نتیجه مقاومت برشی خاک می‌گردد. هم‌چنین با توجه با مشکلاتی که رها شدن مواد پلیمری در طبیعت ایجاد می‌نماید، این روش می‌تواند باعث حفظ محیط‌زیست نیز گردد.

### مراجع

- Akbarimehr, D., Eslami, A. And Aflaki, E. (2020). "Geotechnical behaviour of clay soil mixed with rubber waste", *Journal of Cleaner Production*.
- Amel-Sakhi, M. (2001). Influence of optimized tire shreds on strength of sand-reinforced with tire shreds. In *Partial Fulfillment of the Requirements the Degree of Master of Science*, Faculty of Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
- Amelsakhi M, Ebrahimi A. (2022). Fine Clay Soil Stabilization using Bagasse Ash and Rice Husk Ash and Almond Husk Ash. *Journal of Engineering Geology*, 16 (3):42-56, in Persian.
- Amelsakhi M, Tehrani E. (2023). Shear Strength Study of Sand Reinforced by Waste Concrete. *Journal of Engineering Geology*, 17 (4):487-505, in Persian.
- Alshaba, A.A., Abdelaziz, T.M. And Ragheb, A.M. (2018). "Treatment of collapsible soils by mixing with iron powder", *Alexandria Engineering Journal*, 57, 3737–3745.
- Bekhiti, M., Trouzine, H. And Rabehi, M. (2019). "Influence of waste tire rubber fibers on swelling behavior, unconfined compressive strength and ductility of cement stabilized bentonite clay Soil", *Construction and Building Materials*, 208, 304–313.
- Choobbasti, J.A., Samakoosh, M.A. And Kutanaei, S.S. (2019). "Mechanical properties soil stabilized with nano calcium carbonate and reinforced with carpet waste fibers", *Construction and Building Materials*, 211, 1094–1104.
- Cristelo, N., Cunha, V.M.C.F., Gomes, A.T., Araújo, N., Miranda, T. And Lopes, M.D.L. (2017). "Influence of fibre reinforcement on the post-cracking behaviour of a cement-stabilised sandy-clay subjected to indirect tensile stress", *Construction and Building Materials*, 138, 163–173.

۵. اثر افزودن مسلح کننده بر روی زاویه اصطکاک داخلی خاک نیمه متراکم ماسه‌ای تا ۱٪ افزودنی با زاویه اصطکاک داخلی ۴۳ به صورت افزایشی بوده اما در ۱/۵٪ افزودنی، ۴/۹۱٪ نسبت به خاک پایه نیمه متراکم کاهش رخ می‌دهد که به علت افزایش مواد مسلح کننده، تماس ذرات خاک با یکدیگر و مواد EVA کاهش یافته و در مقابل سطح تماس مواد افزودنی با یکدیگر بیشتر می‌شود و این سطح تماس نیز زاویه اصطکاک کمتری دارد که در نتیجه باعث کاهش زاویه اصطکاک داخلی مخلوط خاک و EVA شده است.

۶. بیشترین زاویه اصطکاک داخلی برای هر دو حالت سست و نیمه متراکم در ۱٪ افزودنی رخ می‌دهد، هم‌چنین درصد تغییرات زاویه اصطکاک نسبت به خاک پایه تراکم مورد نظر، در حالت سست و حالت نیمه متراکم به ترتیب ۱۹/۵۴ و ۱۰/۲۱ درصد می‌باشد که نشان می‌دهد افزودن EVA بر زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه‌ای به علت ایجاد قفل و بست در بین ذرات خاک و مواد مسلح کننده موثر بوده؛ اما این تاثیر مثبت در تراکم سست به علت بیشتر بودن فضای خالی بین ذرات خاک، بیشتر از حالت نیمه متراکم است.

۷. افزودن EVA به خاک ماسه‌ای در هر دو حالت سست و نیمه متراکم، باعث افزایش چسبندگی می‌شود. در حالت سست، نقطه بیشینه این پارامتر در ۱/۵٪ درصد وزنی افزودنی به میزان ۴/۹ کیلو پاسکال و در حالت نیمه متراکم در ۱٪ افزودنی به میزان ۵/۳۵ کیلو پاسکال رخ می‌دهد.

۸. ضایعاتی بودن ماده افزودنی EVA، ارزان بودن آن به دلیل دور ریز بودن این مصالح، کمک به حفظ محیط زیست و صرف انرژی کم برای اختلاط آن با خاک و رسیدن به مقاومت بیشتر، به خصوص در ماسه سست از محاسن این مصالح مسلح کننده به شمار می‌رود و باعث کاهش هزینه و زمان در پروژه‌های تسلیح خاک می‌گردد. با توجه به عمر زیاد این نوع ماده مسلح کننده و ماندگاری

- Esen, A.F., Woodward, P.K., Laghrouche, O., ˇCebařsek, T.M., Brennan, A.J., Robinson, S. And Connolly, D.P. (2021). " Full-scale laboratory testing of a geosynthetically reinforced soil railway structure ", *Transportation Geotechnics*, 28, 100526.
- EsmacilpourShirvani, N., TaghaviGhalesari, A., Tabari, M.K. And Choobbasti, A.J. (2019). "Improvement of the Engineering Behavior of Sand-Clay Mixtures Using Kenaf Fiber Reinforcement", *Transportation Geotechnics*.
- Hooshyar, A. And Rostami, V. (2018). " Granular Soil Bearing Capacity Improvement Using Waste Plastic Materials ", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(4), 235-238.
- Liu, J., Bai, Y., Song, Z., Kanungo, D.P., Wang, Y., Bu, F., Chen, Z. And Shi, X. (2017). "Stabilization of sand using different types of short fibers and organic polymer", *Construction and Building Materials*, Volume 253, 30 August 2020, 119164.
- Long, G., Li, L., Li, W., Ma, K., Dong, W., Bai, Ch. And Zhou, L. (2019). "Enhanced mechanical properties and durability of coal gangue reinforced cement-soil mixture for foundation treatments", *Journal of Cleaner Production*, 231, 468-482.
- Malidarreh, N.R., Shooshpasha, I., Mirhosseini, S.M. And Dehestani, M. (2017). " Effects of reinforcement on mechanical behaviour of cement treated sand using direct shear and triaxial tests", *International Journal of Geotechnical Engineering*.
- Mehdipour, M., Arbani, M. And Ghorbani, A. (2010). " Laboratory study of the use of waste rubber floor coverings to improve the CBR of sands", the fourth International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics of Iran, 0.38 (MAAMEH), in Persian.
- Miri, M., Amelsakhi, M., and Jiryaei Sharahi, M., (2023). "The effect of the addition of ethylene-vinyl acetate on granular soil strength parameters", *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 55 (1), 41-60, in Persian.
- Mirzababaei, M., Arulrajah, A. And Ouston, M. (2017). "Polymers for stabilization of soft clay soils", *Procedia Engineering*, 189 , 25-32.
- Nguyena, G., Hrubeřová, E. And Voltr, A. (2015). "Soil improvement using polyester fibres", *Procedia Engineering*, 111 , 596 – 600.
- Nsaif, H.M. (2013). "Behavior of Soils Strengthened By Plastic Waste Materials", *Journal of Engineering and Development*, Vol. 17, No.4, ISSN 1813- 7822.
- Peng, L., Wang, D. And Qi, J. (2021). " Study on anti-corrosion of PVA-treated wheat straw and its application in reinforcement of a silty soil", *Construction and Building Materials*, 291,123305.
- Praveen, G.V. And Kurre, P. (2020). "Influence of coir fiber reinforcement on shear strength parameters of cement modified marginal soil mixed with fly ash ", *Materials Today: Proceedings*, 39 (1), 504-507.
- Rezaeimalek, S., Huang, J. And Bin-Shafique, S. (2017). "Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand stabilization", *Construction and Building Materials*, 146, Pages 210-220.
- SaediKia, A. And Madani, H. (2018). "Performance of ethylene vinyl acetate and vinyl acetate on mechanical properties, shrinkage and durability of calcium aluminate cement base mixtures", *Journal of Civil Engineering*, 18th volume, No. 4, in Persian.
- Safar Razavizadeh M. (2014). "Study of mechanical and strength characteristics of clay reinforced with aluminum chips", Master Thesis in Water Engineering, Department of Water Structures, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Faculty of Agricultural Engineering, in Persian.
- Soltani, M. S., Jiryaei Sharahi, M., Amelsakhi, M. (2022). "Effect of Zeolite and tire granules on cement stabilization of the sand", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(2), pp. 759-774. doi: 10.22060/ceej.2021.19092.7064, in Persian.
- Valipour, M., Tabatabaie Shourijeh, P. And Mohammadinia, A. (2020). "Application of recycled tire polymer fibers and glass fibers for clay reinforcement", *Transportation Geotechnics*, 27,100474.
- Yousefi R, Amoei A A, Amel Sakhi M, Karimi A. (2021). "Experimental Study on Influence of Using Urease Enzyme on Stabilized Sandy Soil's Engineering Property by Zeolite and Sawdust", *International Journal of Maritime Technology*, 15 :17-27, in Persian.

## Shear strength parameters evaluation of sand reinforced with EVA based on direct shear test

Masoud Amelsakhi <sup>1\*</sup>, Mahsa Miri <sup>2</sup> and Morteza Jiryaei Sharahi <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

<sup>2</sup> Graduated Student, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

<sup>3</sup> Associated Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

(Received: 24 November 2024, Accepted: 20 February 2025)

### Summary

Soil stabilization and reinforcement has long and important role in civil sciences, especially in geotechnical engineering, and need for a more robust and stable ground to withstand gravity and higher shear forces, has become particularly important. Using waste materials reduces the negative environmental effects and also decreases shear strength parameters of soils. These waste materials are very cheap, so these reinforcements are more benefit in comparison with other high price reinforcements. Also, in recent years, with the entry of the environment into the construction industry, with the aim of reducing the adverse effects of industrial waste and construction waste on people's living environment and preserving the environment for the future, in many cases reduces the economic costs of projects. In this research, sandy soil is reinforced in both loose and semi-dense states using polymer industrial waste material called ethylene-vinyl acetate (EVA) with the aim of investigating the effect of this additive on the shear strength parameters of sandy soil. The experiments were performed at different weight percentages of EVA (0, 0.2, 0.5, 1, 1.5, 2 and 2.5) without adding moisture and by weight percentage method. The experiments were performed using a small-scale direct cutting machine, which shows that the addition of this waste material to the soil at two different densities increases both the adhesion parameters and the internal soil friction angle, which has a more pronounced effect on the friction angle and the effect of increasing shear strength. It has more positive effect on loose sand rather than dense sand. The optimum value occurs in 1% additive for both loose and semi-dense sands. EVA reinforces the sand, in another word, it increases the cohesion of the reinforced sand-EVA mixture and also the soil-EVA friction angle. These physical particles has an interlocking role in the sand-EVA mixture and this interlocking effect is the main reason for the increase of the shear strength parameters of the mixture; cohesion and the friction angle. It should be mentioned that the size of EVA and the percentage in the mixture is very important. Another practical and important note is the compaction of the sand-EVA mixture in the field and the project sites. This limitation should be considered when using this flexible material, especially in high per cent contents in the mixture. This matter limited the content of this material in our laboratory test, such as direct shear tests. In all the tests, the sand-mixture is dry and the water content effect is neglected in direct shear tests.

**Keywords:** Soil improvement, waste material, EVA, direct shear, environment