

## بررسی آزمایشگاهی اثر افزودن الیاف شیشه بر مقاومت فشاری محصور نشده خاک چسبنده به ازای درصد رطوبت‌های مختلف

مسعود عامل سخی\*<sup>۱</sup>، صدرا مصطفوی<sup>۲</sup>

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۲۹

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰

### چکیده

یکی از روش‌های اصلاح خصوصیات مهندسی خاک‌های ضعیف و مسئله‌دار، بهسازی این نوع از خاک‌ها با استفاده از مصالح افزودنی فیزیکی مانند انواع مختلف الیاف است. در این مقاله، تأثیر الیاف شیشه بر بهبود خواص مکانیکی خاک چسبنده مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف اصلی این مقاله ارزیابی میزان اثربخشی افزودن الیاف شیشه به خاک چسبنده منطقه اسکله شهید بهشتی در چابهار و بررسی خواص مهندسی به ویژه مقاومت فشاری محصور نشده و مدول الاستیسیته خاک مسلح شده است. در این مطالعه از پنج ترکیب متفاوت از نسبت‌های مختلف خاک و الیاف شیشه به مقدار ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد وزنی با مقادیر رطوبت ۱۱، ۱۳ و ۱۵ درصد استفاده شده است. به منظور بررسی اثرات ناشی از تغییر رطوبت و افزودن الیاف شیشه، مجموعه‌ای از آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده بر روی نمونه‌های خاک چسبنده طبیعی و خاک چسبنده مسلح شده با الیاف شیشه انجام شده است. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که حضور الیاف شیشه در خاک چسبنده منجر به افزایش قابل توجهی در مقدار مقاومت فشاری محصور نشده خاک چسبنده و مدول الاستیسیته شده است. افزایش مقدار الیاف شیشه و افزایش مقدار رطوبت در نمونه‌ها منجر به افزایش کرنش گسیختگی و ایجاد تغییر در حالت گسیختگی خاک چسبنده شده است. علاوه بر این، افزایش مقدار رطوبت در نمونه‌ها موجب افزایش شکل پذیری و کرنش گسیختگی و کاهش مقدار مقاومت فشاری محصور نشده و مدول الاستیسیته خاک شده است.

**کلید واژه‌ها:** الیاف شیشه، تسلیح خاک چسبنده، خصوصیات مقاومت فشاری محصور نشده، درصد رطوبت.

۱. عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم، قم mamelsakhi@yahoo.com

۲. کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد تهران مرکز، تهران

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

ساخت سازه‌ها بر روی خاک‌های ضعیف و مسئله‌دار بسیار پر مخاطره است. این مطلب شامل کم بودن ظرفیت باربری خاک، پتانسیل بالای نشست، احتمال تورم خاک چسبنده و مواردی از این دست می‌باشد. امروزه علاوه بر استفاده از مواد افزودنی طبیعی و مصنوعی از مصالحی مانند انواع مختلف الیاف نیز به منظور تسلیح خاک‌ها استفاده می‌شود. در صورت مسئله‌دار بودن خاک بستر، استفاده از الیاف به منظور تسلیح خاک می‌تواند یکی از راه‌های موثر و سودمند در تقویت بستر جهت ساخت و ساز مطمئن محسوب شود. بنابراین در حالت کلی، بررسی این موضوع با توجه به نوع خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد و این مسئله به طور ویژه در مورد خاک‌های مسئله‌دار اهمیت دو چندان می‌یابد. با وجود تحقیقات گسترده در این مورد، هنوز دانش موجود در مورد اثرات برخی از این مواد افزودنی و تسلیح کننده‌ها بر روی پارامترهای مهندسی محدود بوده و نقش و درجه اهمیت این پارامترها برای کاربرد عملی روشن نشده است.

عامل سخی در سال ۲۰۰۱ اثر اضافه کردن مواد ضایعاتی لاستیک فرسوده را بر ماسه مطالعه کرد و آزمایشهای برش مستقیم بزرگ و سی بی آر را برای مطالعه آزمایشگاهی این مصالح استفاده نمود (Amelsakhi, 2001). قضاوی و عامل سخی در سال ۲۰۰۵ به مطالعه اثر لاستیکهای فرسوده بر ماسه پرداختند و در مورد بهینه‌یابی ابعاد تراشه لاستیکها در یک تحقیق ژئوتکنیک زیست محیطی با استفاده از آزمایش برش مستقیم بزرگ ۳۰\*۳۰ سانتیمتر تحقیق نمودند. نتایج نشان داد که ابعاد لاستیکها دارای ابعاد بهینه‌ای هستند که به ازای آنها حداکثر مقاومت برشی ماسه مسلح بدست می‌آید (Ghazavi and Amelsakhi, 2005a). در تحقیق دیگری قضاوی و عامل سخی به بررسی بهینه‌یابی ابعاد تراشه لاستیکهای فرسوده در خاک ماسه‌ای بر اساس نتایج آزمایش CBR پرداختند (Ghazavi and Amelsakhi, 2005b). احمد و همکاران اثرات افزودن الیاف شیشه بازیافتی (Recycled Glass Fiber) را بر

روی بهسازی پارامترهای مقاومتی انواع مختلفی از خاک‌ها مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزودن این الیاف موجب افزایش قابل ملاحظه در مقادیر مقاومت برشی و زوایای اصطکاک داخلی خاک‌ها شده است (Ahmad et al., 2012). آتس با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده اثرات ترکیب الیاف شیشه و سیمان پرتلند را بر روی خواص مهندسی خاک‌های ماسه‌ای مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که استفاده از سیمان و الیاف شیشه منجر به افزایش خصوصیات مهندسی، کاهش کرنش گسیختگی و تغییر قابل توجه در رفتار شکنندگی خاک‌های ماسه‌ای شده است (Ates., 2016). کوریا و همکاران اثر مقدار الیاف پلی-پروپیلن (pp-fiber) بر مقاومت فشاری و رفتار مکانیکی خاک رس نرم را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج نشان داد که افزودن مقدار اندکی الیاف بیش از مقدار بهینه به خاک نرم موجب کاهش سختی، مقاومت فشاری و افت مقاومت و ایجاد تغییر در رفتار خاک مسلح شده با الیاف از حالت ترد به شکل-پذیری بیشتر شده است (Correia et al., 2015). مجموعه‌ای از آزمون‌های مقاومت فشاری به منظور بررسی اثرات الیاف پلی‌وینیل الکل (Polyvinyl Alcohol Fiber) و توزیع آن بر مقاومت ماسه سیمان‌تاسیون تسلیح شده به وسیله پارک و همکاران انجام شد. نتایج نشان داد که مقاومت نمونه‌ها با افزایش تعداد لایه‌های حاوی الیاف افزایش یافته است (Park., 2009). در سال ۱۴۰۱ در تحقیق دیگری توسط عامل سخی و همکاران به بررسی اثر افزودن الیاف پلی پروپیلن بر خاک تثبیت شده با سیمان و جایگزینی ژئولیت پرداخته شد. به منظور بررسی تاثیر الیاف پل پروپیلن بر مقاومت تک محوری خاک، مقادیر الیاف پل پروپیلن، سیمان، ژئولیت، نوع خاک ماسه‌ای و همچنین زمان عمل آوری مدنظر قرار گرفته و در مجموع تعداد ۱۲۶ آزمایش مقاومت تک محوری انجام شد. به منظور بهسازی این دو نوع خاک از مقادیر ۰/۴٪ وزنی سیمان، مقادیر ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۰/۵ و ۱ درصد الیاف پل پروپیلن با توزیع تصادفی و مقادیر ۰، ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد

خاک از حدود عمق ۱۰ متری سطح زمین استخراج شده و حاوی رس، لای و ماسه می‌باشد. بدیهی است که خاک رس در مجاورت دریا می‌تواند ظرفیت باربری مناسب جهت بارگذاری را نداشته باشد. یکی از مسائل مهم در پروژه‌های ساحلی بحث تثبیت خاک است که در این مقاله نیز تمرکز بر همین مطلب است. به دلیل اشباع بودن خاک منطقه، به منظور حصول اطمینان از خشک شدن کامل به مدت ۱۲ ساعت در داخل گرمخانه قرار داده شده است. پس از آن کلوخه‌های موجود احتمالی به تکه‌های کوچکتر تقسیم شده و در ادامه با استفاده از کوبه خرد شده و از الک گذرانده شده است. مطابق سیستم طبقه‌بندی متحده، خاک رس مورد استفاده تحت عنوان خاک رس با خاصیت خمیری پایین طبقه‌بندی می‌شود. توزیع اندازه دانه‌های خاک مورد مطالعه در شکل ۲ و خواص ژئوتکنیکی آن در جدول ۱ ارائه شده است. از نمودار دانه‌بندی می‌توان مشاهده کرد که این خاک مطابق استاندارد متحده حاوی ۴۲ درصد ماسه ریز و ۵۸ درصد ریزدانه (بخش عبوری از الک شماره ۲۰۰) می‌باشد. با انجام آزمایش تراکم استاندارد، حداکثر چگالی خشک خاک  $20/5 \text{ kN/m}^3$  و رطوبت بهینه خاک رس برابر ۱۳ درصد بدست آمده است.

الیاف شیشه مورد استفاده در این مطالعه از نوع E معمولی می‌باشد که به طور معمول برای کاربردهای تسلیح در حالت کلی و عمومی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق نیز از الیاف شیشه از نوع E به طول متوسط ۶ میلی‌متر به منظور تسلیح خاک چسبنده استفاده شده است. لازم به ذکر است دلیل استفاده از این طول الیاف در تحقیق، امکان استفاده از این طول الیاف در داخل قالب و پخش رندوم آن و اثرگذاری بیشتر بر خاک چسبنده است. برای خاکهای درشت دانه طول الیاف متفاوت خواهند بود. دلیل استفاده از این نوع الیاف در این تحقیق، متداول بودن این نوع الیاف است. به عبارت دیگر هدف این است که مصالح متداول موجود در صنعت مورد تحقیق کاربردی قرار گیرند. بدیهی است سایر انواع الیاف نیز وجود دارد که می‌توانند در تحقیق‌های

جایگزینی ژئولیت در زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز استفاده گردید. طبق نتایج آزمایش تراکم، با افزودن ۵/۰ درصد الیاف پلی‌پروپیلن به ماسه خوب دانه بندی و ۱ درصد به ماسه بد دانه بندی، مقدار رطوبت بهینه، افزایش و پس از آن کاهش یافت. از طرفی با افزایش درصد الیاف پلی‌پروپیلن، وزن مخصوص خشک هر دو نوع خاک، کاهش یافت (عامل سخی و همکاران، ۱۴۰۱).

با افزودن الیاف به خاک می‌توان ویژگی‌های مقاومتی خاک مانند مقاومت فشاری محصور نشده و همچنین رفتار مکانیکی و تغییرات شکل‌پذیری را با توجه به درصد الیاف و میزان رطوبت مورد استفاده در خاک به مقدار مورد نظر تغییر داد. در این تحقیق سعی می‌شود آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده به منظور برآورد پارامترهای تغییر یافته خاک ریزدانه مورد استفاده قرار گیرد تا هم بتوان نتایج ریزبینه‌تر و گسترده‌تری بدست آورد و هم با توجه به نتایج آزمایشگاهی بتوان پارامترهای واقعی را مورد بررسی قرار داد. آنچه در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد ارزیابی آزمایشگاهی رفتار مکانیکی و پارامترهای مقاومتی خاک رس CL در اثر افزودن الیاف شیشه با درصدهای اختلاط مختلف و با در نظر گرفتن رطوبت‌های مختلف می‌باشد که در نتیجه آن می‌توان به شناخت بهتری از رفتار خاک‌های مسلح شده دست یافت. در واقع، در این تحقیق هدف اصلی دستیابی به درصدهای اختلاط بهینه از الیاف شیشه به منظور افزایش پارامترهای مقاومتی خاک ریزدانه در محدوده مورد مطالعه می‌باشد. بدیهی است منظور از درصد بهینه الیاف شیشه، مقداری از الیاف شیشه است که منجر به حداکثر مقدار مقاومت فشاری محصور نشده خاک چسبنده مسلح گردد.

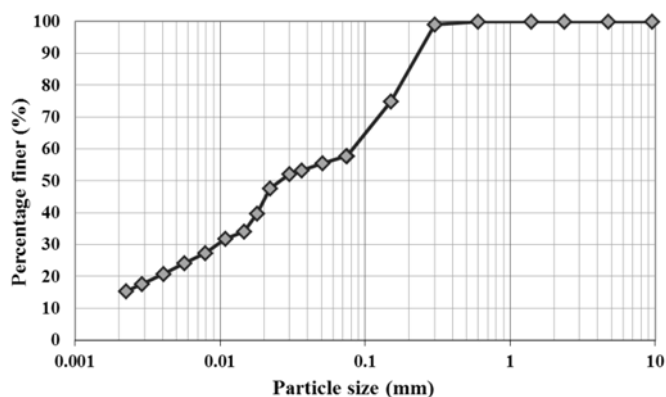
## ۲. مصالح استفاده شده

خاک رس استفاده شده در این تحقیق از اسکله شهید بهشتی در چابهار (استان سیستان و بلوچستان) نشان داده شده شکل ۱ با مختصات ( $N 60^{\circ} 36' 14.16''$ ,  $E 25^{\circ} 17' 49.79''$ ) و با اجرای ۱۱ گمانه حفاری به روش مغزه‌گیری کامل از کرانه دریای عمان و اقیانوس هند نمونه برداری و تهیه شده است.

مشابه مورد استفاده محققین قرار گیرند. الیاف شیشه در شکل ۳ نشان داده شده و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن نیز در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱. نمایی از اسکله شهیدبهبشتی چابهار



شکل ۲. نمودار توزیع اندازه دانه‌های خاک رس مورد مطالعه در پژوهش حاضر

جدول ۱. خصوصیات مهندسی خاک مورد مطالعه در پژوهش حاضر

No	Parameters	Value
1	Colour	Green
2	Specific Gravity(Gs)	2.67
3	Fine Sand	42%
4	Clay and Silt	58%
5	Liquid Limit	23.8%
6	Plastic Limit	12.6%
7	Plasticity Index	11.2%
8	Soil Clasification (USCS)	CL
9	Optimum Water Content	13%
10	Maximum Dry Unit Weigth	2.05 kN/m <sup>3</sup>



شکل ۳. الیاف شیشه از نوع E (E-Glass)

جدول ۲: ویژگی‌های مهندسی الیاف شیشه

No	Parameters	Value
1	Colour	-
2	Unit Weigth	0.88 g/cm <sup>3</sup>
3	Fiber Type	Single
4	Average Diameter	0.028 mm
5	Average Length	6 mm
6	Tension Strength	(2900-3500)MPa
7	Elasticity Modulus	(69-75)GPa
8	Dispersion	Normal

### ۳. روش آزمایش

به منظور بررسی اثرات ناشی از افزودن الیاف شیشه با توزیع یکنواخت در خاک چسبنده و همچنین تأثیر ناشی از تغییرات رطوبت در نمونه‌های خاک چسبنده طبیعی و مسلح شده با الیاف شیشه بر خواص خاک چسبنده، آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده بر روی ۴ گروه از نمونه‌های خاک رس انجام شده است. این گروه‌ها شامل یک گروه خاک چسبنده طبیعی بدون مصالح مسلح کننده و سه گروه از خاک‌های چسبنده مسلح شده با پنج درصد مختلف الیاف شیشه در سه مقدار رطوبت مختلف است. این آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های خاک چسبنده طبیعی و خاک چسبنده در ترکیب با مقادیر مختلف الیاف شیشه به مقدار ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد وزن خاک خشک در مقادیر مختلف رطوبت ۱۱، ۱۳ و ۱۵ درصد وزن خاک خشک انجام شده است.

از آنجا که خاک مورد مطالعه، خاک چسبنده است از آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده برای تحقیق استفاده شده است. این آزمایش، متداول‌ترین آزمایش برای خاک‌های چسبنده است. در این مطالعه، پنج نسبت مختلف الیاف شیشه (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد وزن خاک خشک) و سه مقدار مختلف رطوبت (۱۱، ۱۳ و ۱۵ درصد وزن خاک خشک) برای ترکیب با خاک چسبنده انتخاب شده است. به منظور بدست آوردن نمونه‌های یکنواخت و همگن برای آزمایش‌های مقاومت فشاری، ابتدا الیاف شیشه با مقادیر ۰/۵ تا ۲/۵ درصد با خاک خشک مخلوط شده و سپس آب با مقادیر ۱۱، ۱۳ و ۱۵ درصد وزنی خاک خشک به آن اضافه می‌شود. پس از افزودن آب، مخلوط بدست آمده توسط مخلوط‌کن استوانه‌ای افقی به مدت ۱ ساعت مخلوط می‌شود که این اختلاط برای به حداقل رساندن اتلاف رطوبت در درون ظرف نفوذناپذیر استیل صورت می‌پذیرد (To et al., 2011). با این حال، پس از گذشت مدت زمان یک ساعت، میزان رطوبت کاهش یافته برای مخلوط‌ها با نمونه‌گیری از آنها محاسبه شده و میزان رطوبت کاهش یافته به مخلوط اضافه شده است. لازم به ذکر

### ۳-۱. آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمایش مقاومت فشاری

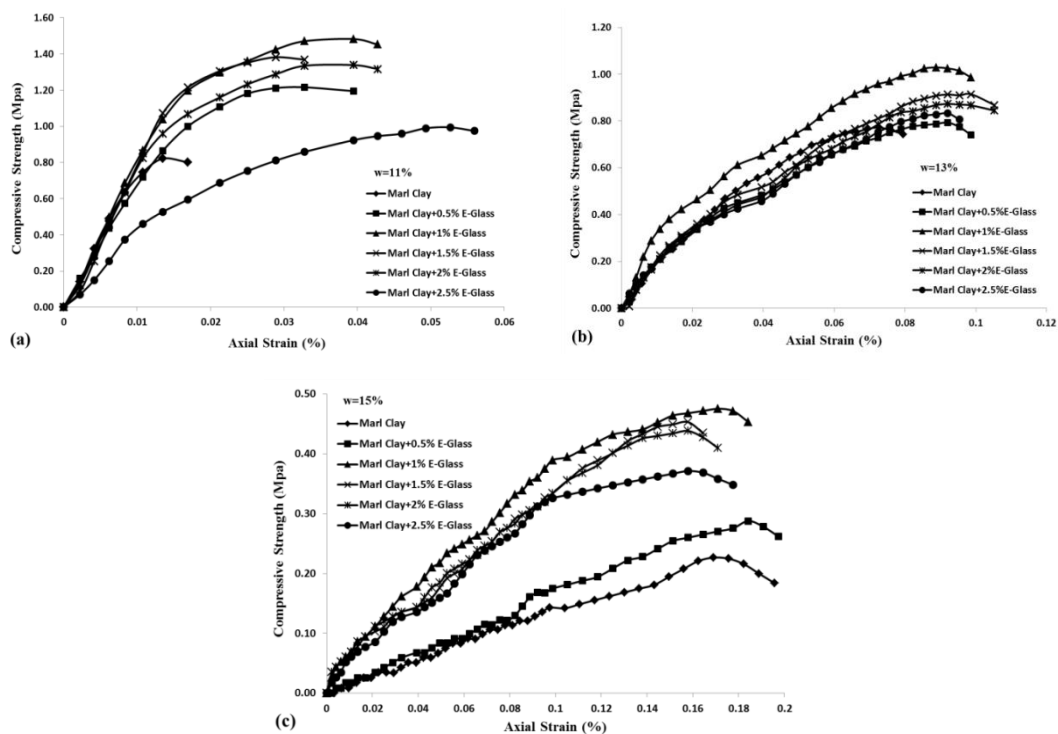
محصور نشده

شکل پذیری، مدول الاستیسیته و حداکثر مقدار مقاومت فشاری خاک رس مورد ارزیابی قرار گرفته است.

### ۳-۲. نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده بر روی نمونه‌های خاک چسبنده طبیعی و مسلح شده با درصد‌های مختلف الیاف شیشه در مقادیر مختلف رطوبت در شکل ۳ نشان داده شده است. از شکل ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار الیاف شیشه، مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده افزایش می‌یابد که این روند افزایشی با ازدیاد مقدار رطوبت از ۱۱ تا ۱۵ درصد کاهش یافته است. اثر افزایش درصد الیاف شیشه در خاک بر مقاومت فشاری محصور نشده در زمانی که مقدار الیاف شیشه ۱ درصد می‌باشد در هر سه مقدار رطوبت ۱۱، ۱۳ و ۱۵ درصد به حداکثر مقدار خود رسیده است. مقدار حداکثر مقاومت فشاری محصور نشده در نمونه‌های با رطوبت ۱۱ درصد بیشترین مقدار را داشته و با افزایش مقدار رطوبت تا ۱۳ درصد از مقدار مقاومت فشاری کاسته شده و در رطوبت ۱۵ درصد به کمترین مقدار خود رسیده است. لازم به ذکر است این مقادیر حداکثر و حداقل برای بازه‌های مورد مطالعه می‌باشد. به عبارت دیگر برای بالای ۱۵ درصد می‌توان انتظار کاهش بیشتر برای مقاومت را داشت. برای درصد رطوبت کمتر از ۱۱ درصد نیاز به مطالعه بیشتر است. برای نمونه‌های خاک چسبنده طبیعی و مسلح شده با الیاف شیشه در مقدار رطوبت کمتر و به دلیل خاصیت تراکم‌پذیری و شکل‌پذیری پایین‌تر، مقاومت فشاری بالاتری بدست آمده است.

است درصد رطوبت‌های انتخاب شده بر مبنای مقادیر متداول در پژوهش‌های مشابه و وضعیت رطوبت منطقه مورد مطالعه بوده است. بدیهی است اشباع بودن نمونه بر پاسخ نمونه‌ها موثر بوده و هیچ دلیل منطقی مبنی بر اشباع کردن تمام نمونه‌ها برای انجام آزمایش وجود ندارد. مخلوط‌های آماده شده از خاک رس طبیعی و همچنین خاک رس در ترکیب با درصد‌های مختلف الیاف شیشه در رطوبت‌های مختلف در سه لایه با اوزان مساوی در درون قالب استوانه‌ای استاندارد آزمایش تراکم به قطر ۱۰/۱۴ و ارتفاع ۱۱/۶۵ سانتیمتر ریخته شده و در هر لایه توسط کوبه استاندارد به تعداد ۲۵ ضربه جهت دستیابی به وزن مخصوص حداکثر خشک مورد نظر تراکم شده است. پس از تراکم کردن خاک در استوانه استاندارد، نمونه‌گیر استوانه‌ای فلزی به قطر ۳/۸ و ارتفاع ۱۰ سانتیمتر توسط جک هیدرولیک به درون خاک رانده می‌شود. سپس با استفاده از نمونه درآور هیدرولیک و بدون کوچکترین دستخوردگی نمونه خاک از درون نمونه‌گیر استوانه‌ای خارج شده و ۷/۶ سانتیمتر از نمونه بدست آمده برش خورده و از مغزه اصلی جدا می‌شود. بلافاصله پس از آماده کردن نمونه، آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده بر روی آن انجام می‌شود. سرعت جابجایی قائم به مقدار ثابت ۱ mm/min تنظیم شده است. برای هر ترکیب از مخلوط، سه نمونه کاملاً مشابه ساخته شده و متوسط مقادیر مقاومت فشاری بدست آمده از سه آزمایش تعیین شده است. بطور کلی تعداد ۵۴ آزمایش مقاومت فشاری با بر روی خاک رس طبیعی و مسلح شده با درصد‌های مختلف الیاف شیشه در رطوبت‌های مختلف انجام شده است. سپس اثرات ناشی از افزودن درصد‌های مختلف الیاف و همچنین تغییرات مقدار رطوبت بر رفتار مکانیکی و



شکل ۴. نمودارهای تنش-جابجایی برای خاک رس طبیعی و مسلح شده با الیاف شیشه بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده (a).  $\omega = 11\%$  (b)  $\omega = 13\%$  (c)  $\omega = 15\%$ .

رطوبت‌های ۱۱، ۱۳ و ۱۵ درصد را نشان می‌دهند. بطور کلی افزودن الیاف شیشه به خاک رس موجب تغییر رفتار و گسیختگی نمونه‌های خاک رس طبیعی از حالت شکست ترد به شکست انعطاف‌پذیر شده است. از نحوه گسیختگی نمونه‌های خاک چسبنده مسلح شده با درصدهای مختلف الیاف در مقادیر رطوبت مختلف می‌توان نتیجه گرفت که در یک رطوبت مشخص و با افزایش مقدار الیاف تا حدود ۱/۵ درصد ابتدا مقدار ترک‌های مشاهده شده در نمونه افزایش یافته و با افزایش بیشتر مقدار الیاف از میزان ترک‌ها به کندی کاسته شده است. به نظر می‌رسد افزایش مقدار الیاف و متعاقباً افزایش شکل‌پذیری نمونه‌های خاک چسبنده مسلح شده با مقدار اختلاط بیش از ۱/۵ درصد موجب انسجام و یکپارچگی بیشتر نمونه‌ها می‌شود. حضور الیاف بیشتر باعث جلوگیری از بروز ترک‌های بیشتر در نمونه‌ها شده است. برای نمونه‌های مسلح شده با الیاف شیشه تا حدود ۱/۵ درصد نیز به دلیل تغییر حالت شکست نمونه‌ها از گسیختگی ترد به

نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده به طور خلاصه در جدول ۳ ارائه شده است. کمترین بیشترین مقدار مقاومت فشاری محصور نشده به ترتیب برای نمونه خاک چسبنده طبیعی با رطوبت ۱۵ درصد و نمونه خاک چسبنده مسلح شده با ۱ درصد الیاف در رطوبت ۱۱ درصد و به ترتیب با مقادیر ۲۷۳ و ۱۵۴۳ کیلوپاسکال بدست آمده است. حداکثر مقدار مقاومت فشاری نمونه‌های خاک چسبنده مسلح شده با ۱ درصد الیاف شیشه در رطوبت‌های ۱۱، ۱۳ و ۱۵ درصد به ترتیب برابر ۱۱۲۸، ۱۵۴۳ و ۵۷۳ کیلوپاسکال بدست آمده است. مقاومت فشاری نمونه‌های خاک چسبنده در ترکیب با ۱ درصد الیاف شیشه در رطوبت‌های ۱۱، ۱۳ و ۱۵ درصد نسبت به نمونه‌های خاک چسبنده طبیعی در همان مقدار رطوبت به ترتیب به مقدار ۸۴/۳، ۳۴/۷ و ۱۰۹/۸ درصد افزایش یافته است (جدول ۳).

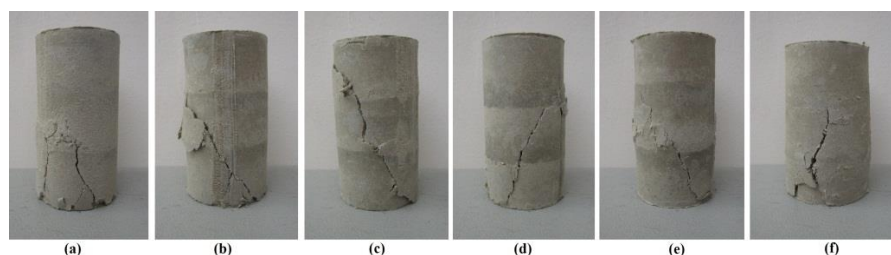
اشکال ۷-۵ تأثیر الیاف شیشه بر رفتار نمونه‌های خاک چسبنده طبیعی و مسلح شده با مقادیر مختلف الیاف شیشه در

مختلف رطوبت مشاهده شده است، اما بطور کلی در یک مقدار درصد اختلاط ثابت از الیاف با افزایش مقدار رطوبت از میزان ترک در نمونه‌ها کاسته شده است.

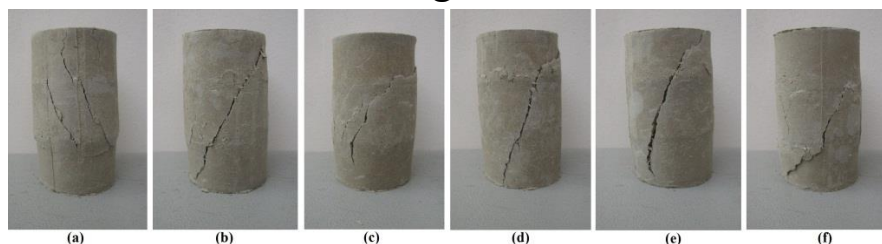
انعطاف‌پذیر، مقدار ترک‌ها ابتدا تا درصد اختلاط تا حدود ۱/۵ درصد افزایش یافته و با افزایش بیشتر الیاف به دلیل افزایش شکل‌پذیری و حفظ ساختار توده خاک از مقدار ترک-ها کاسته شده است. این روند برای تمام نمونه‌ها در مقادیر

جدول ۳. خلاصه نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

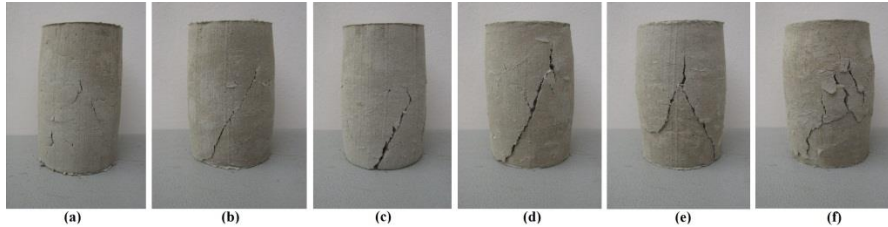
No	Water Content (%)	Glass Fibers (%)	Maximum Compression Strength (kPa)	Reinforced Strength/Unreinforced Strength (%)
1	11	0	837	-
		0.5	1261	50.6
		1	1543	84.3
		1.5	1428	70.6
		2	1390	66
		2.5	1040	24.2
2	13	0	837	-
		0.5	873	4.3
		1	1128	34.7
		1.5	1010	20.6
		2	961	14.8
		2.5	917	9.5
3	15	0	273	-
		0.5	352	28.9
		1	573	109.8
		1.5	537	96.7
		2	520	90.4
		2.5	440	61.2



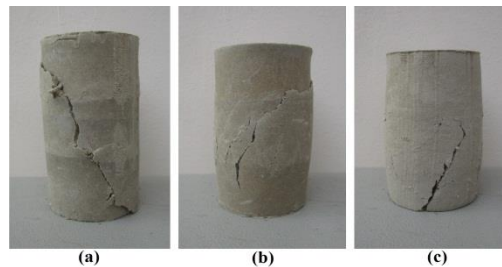
شکل ۵. تأثیر الیاف شیشه بر رفتار شکست خاک چسبنده در رطوبت ۱۱ درصد. (a) خاک چسبنده طبیعی، (b) نمونه مسلح شده با ۰/۵ درصد الیاف، (c) نمونه مسلح شده با ۱ درصد الیاف، (d) نمونه مسلح شده با ۱/۵ درصد الیاف، (e) نمونه مسلح شده با ۱/۵ درصد الیاف، (f) نمونه مسلح شده با ۱/۵ درصد الیاف



**شکل ۶.** تأثیر الیاف شیشه بر رفتار شکست خاک چسبنده در رطوبت ۱۳ درصد. (a) خاک چسبنده طبیعی، (b) نمونه مسلح شده با ۰/۵ درصد الیاف، (c) نمونه مسلح شده با ۱ درصد الیاف، (d) نمونه مسلح شده با ۱/۵ درصد الیاف، (e) نمونه مسلح شده با ۱/۵ درصد الیاف، (f) نمونه مسلح شده با ۱/۵ درصد الیاف



**شکل ۷.** تأثیر الیاف شیشه بر رفتار شکست خاک چسبنده در رطوبت ۱۵ درصد. (a) خاک چسبنده طبیعی، (b) نمونه مسلح شده با ۰/۵ درصد الیاف، (c) نمونه مسلح شده با ۱ درصد الیاف، (d) نمونه مسلح شده با ۱/۵ درصد الیاف، (e) نمونه مسلح شده با ۱/۵ درصد الیاف، (f) نمونه مسلح شده با ۱/۵ درصد الیاف



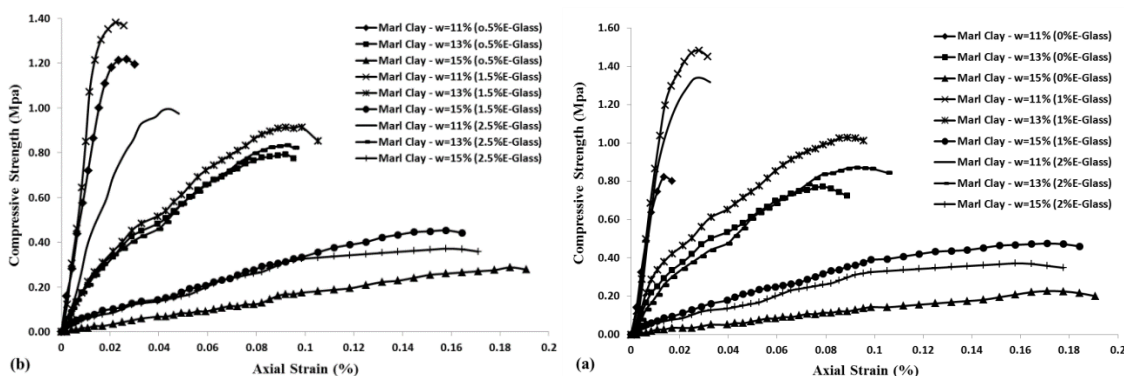
**شکل ۸.** رفتار گسیختگی و الگوی تغییر شکل نمونه‌های خاک چسبنده مسلح شده با ۱ درصد الیاف شیشه در مقادیر مختلف رطوبت. (a) نمونه با رطوبت ۱۱ درصد، (b) نمونه با رطوبت ۱۳ درصد، (c) نمونه با رطوبت ۱۵ درصد

است. این مطلب باید در تفسیر نتایج در نظر گرفته شود که ملاک بررسی درزه و ترکها، این شکل می‌باشد. در شکل ۹ نمودارهای مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های خاک چسبنده طبیعی و مسلح شده با درصدهای مختلف الیاف شیشه در مقادیر مختلف رطوبت نشان داده شده است. از نمودارهای شکل ۹ مشاهده می‌شود که افزایش مقدار رطوبت باعث ایجاد تغییر در حالت گسیختگی نمونه‌های خاک چسبنده طبیعی و مسلح شده با الیاف شیشه شده و افزایش مقدار رطوبت به مقدار قابل توجهی شکل‌پذیری نمونه‌ها را افزایش داده است. از نمودار شکل ۹ و جدول ۳ مشاهده می‌شود که برای خاک چسبنده طبیعی و مسلح شده با ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد الیاف شیشه و با افزایش مقدار رطوبت از ۱۱ به ۱۳ درصد، مقدار مقاومت فشاری محصور نشده به ترتیب به مقدار ۰، ۴۴/۴، ۳۶/۷، ۴۱/۳، ۴۴/۶، ۱۳/۴ درصد کاهش یافته و با افزایش مقدار رطوبت از ۱۱ به ۱۵ درصد، مقدار مقاومت

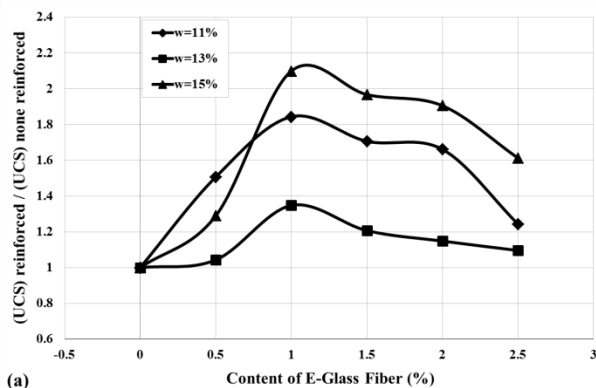
شکل ۸ تأثیر مقدار رطوبت بر رفتار نمونه‌های خاک چسبنده مسلح شده با ۱ درصد الیاف شیشه را نشان می‌دهد. از شکل ۷ مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار رطوبت از ۱۱ تا ۱۵ درصد، رفتار و نحوه گسیختگی نمونه‌های خاک چسبنده طبیعی و مسلح شده با الیاف شیشه تغییر کرده و بطور کلی با افزایش مقدار رطوبت شکل‌پذیری نمونه‌ها افزایش یافته است. با افزایش مقدار رطوبت و متعاقباً با افزایش میزان شکل‌پذیری، گسیختگی در نمونه‌ها در کرنش بالاتری نسبت به نمونه‌های با رطوبت پایین‌تر رخ داده است که این مسئله از ارتفاع کاهش یافته نمونه که در کرنش بالاتری گسیخته شده است به وضوح مشاهده می‌شود. همانطور که از شکل ۸ مشاهده می‌شود با افزایش رطوبت در نمونه‌های خاک چسبنده مسلح شده با ۱ درصد الیاف شیشه، از مقدار ترک‌ها کاسته شده و شکست در نمونه با انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به گسیختگی در نمونه‌های با رطوبت پایین‌تر رخ داده

خاک چسبنده طبیعی و مسلح شده با الیاف شیشه در مقادیر مختلف رطوبت به طور خلاصه در جدول ۴ ارائه شده است. درصد تغییرات مقدار مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های خاک چسبنده مسلح شده با الیاف شیشه نسبت به نمونه‌های خاک چسبنده طبیعی در مقادیر مختلف الیاف و درصد رطوبت‌های مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بیشترین مقدار تغییر در مقدار مقاومت فشاری محصور نشده به ترتیب در نمونه‌های با مقدار رطوبت ۱۵، ۱۱ و ۱۳ درصد مشاهده شده است. با توجه به روند مشابه تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده در نمونه‌های خاک چسبنده مسلح شده نسبت به خاک چسبنده طبیعی در برابر درصدهای مختلف الیاف، از نمودارهای شکل ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که علت اصلی این تغییرات به دلیل حضور آب در خاک است. بنابراین در نمونه‌های با مقدار رطوبت ۱۵ درصد به دلیل چسبندگی بیشتر ذرات خاک چسبنده با الیاف شیشه، میزان تغییرات مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه‌های با رطوبت ۱۱ و ۱۳ درصد بیشتر است. از طرف دیگر، میزان تغییرات مقاومت فشاری در نمونه‌های با مقدار رطوبت ۱۱ درصد نیز به علت اصطکاک بیشتر ذرات خاک با الیاف شیشه از تغییرات مقادیر مقاومت فشاری در نمونه‌های با مقدار رطوبت ۱۳ درصد بیشتر است. به نظر می‌رسد علت تغییرات قابل توجه مقاومت فشاری به دلیل اثرات چسبندگی بیشتر بین ذرات خاک رس و الیاف در رطوبت بیشتر از رطوبت بهینه نسبت به اثرات ناشی از اصطکاک بین ذرات خاک و الیاف در رطوبت کمتر از رطوبت بهینه باشد. مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های با رطوبت بهینه نیز به علت اصطکاک کمتر از نمونه‌های با مقدار رطوبت ۱۱ درصد و چسبندگی کمتر از نمونه‌های با مقدار رطوبت ۱۵ درصد در حد واسط بین آنها قرار گرفته است..

فشاری محصور نشده به ترتیب به مقدار  $206/6$ ،  $258/2$ ،  $169/2$ ،  $165/9$ ،  $167/3$ ،  $136/3$  درصد کاهش یافته است. بطور کلی با بررسی شکل ۹ می‌توان نتیجه گرفت که مقدار مقاومت نهایی تک محوری در نمونه‌های خاک چسبنده با رطوبت ۱۱ درصد بیشتر از میزان مقاومت همان نمونه‌ها در رطوبت‌های ۱۳ و ۱۵ درصد بوده و مقدار مقاومت نهایی تک محوری نمونه‌های با رطوبت ۱۳ درصد نیز بیشتر از مقدار مقاومت نمونه‌های مشابه در رطوبت ۱۵ درصد بوده است. از نمودارهای شکل ۹ مشاهده می‌شود که کرنش گسیختگی در نمونه‌های با مقدار رطوبت ۱۱ درصد با مقادیر مختلف الیاف شیشه بسیار پایین است و این نمونه‌ها به سرعت به حداکثر مقدار مقاومت فشاری خود رسیده و پس از گسیختگی مقدار مقاومت آنها به سرعت پایین آمده و کرنش پسماند قابل توجهی در آنها باقی نمی‌ماند. کرنش گسیختگی متناظر با حداکثر مقدار مقاومت تک محوری در نمونه‌های با مقدار رطوبت ۱۵ درصد در همه نمونه‌های با درصدهای مختلف اختلاط با الیاف شیشه نسبت به نمونه‌های با رطوبت‌های ۱۳ و ۱۵ درصد بالاتر بوده است و این نمونه‌ها با سرعت کمتر و در مقدار کرنش بیشتری به حداکثر مقدار مقاومت فشاری خود رسیده و مقاومت آنها پس از بروز گسیختگی در مقدار مقاومت نهایی به کندی پایین آمده است. در نتیجه، مقدار کرنش پسماند در نمونه‌های با مقدار رطوبت ۱۵ درصد نسبت به نمونه‌های با مقدار رطوبت ۱۱ و ۱۳ درصد بیشتر بوده است. از شکل ۹ می‌توان نتیجه گرفت که مقدار کرنش گسیختگی در نمونه‌های خاک چسبنده در ترکیب با ۱ درصد الیاف شیشه برای افزایش مقدار رطوبت از ۱۱ به ۱۳ درصد و از ۱۱ به ۱۵ درصد موجب افزایش کرنش گسیختگی از ۳ به ۷ میلیمتر و از ۳ به  $13/5$  میلیمتر شده است که کرنش گسیختگی را به ترتیب به مقدار  $133/3$  و  $350$  درصد افزایش داده است. میزان تغییرات کرنش گسیختگی در نمونه‌های



شکل ۹. مقایسه نمودارهای تنش-جابجایی برای خاک چسبنده طبیعی و مسلح شده با الیاف شیشه در رطوبت‌های مختلف. (a) مقادیر ۰، ۱ و ۲ درصد الیاف، (b) مقادیر ۰،۵، ۱،۵ و ۲،۵ درصد الیاف.



شکل ۱۰. تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده خاک چسبنده مسلح شده با الیاف شیشه نسبت به خاک چسبنده طبیعی در برابر مقادیر مختلف الیاف شیشه

جدول ۴. نتایج تغییرات کرنش گسیختگی با تغییرات رطوبت در مقادیر مختلف ترکیب الیاف شیشه با خاک چسبنده

Glass Fibers (%)	Failure Strain Variation (%)		
	w: 11 to 13 (%)	w: 11 to 15 (%)	w: 13 to 15 (%)
0	300	800	125
0.5	154.5	409.1	100
1	133.3	350	92.8
1.5	200	380	60
2	150	316.6	66.6
2.5	75	212.5	78.5

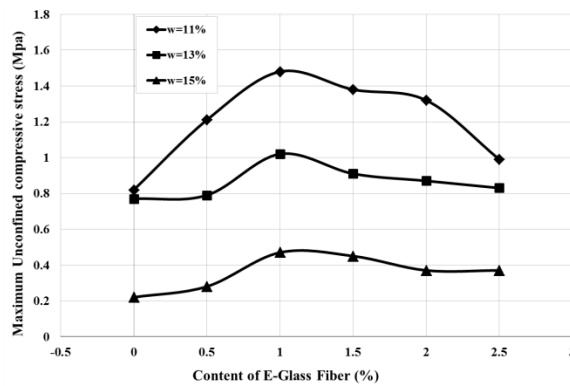
قابل تعیین است. باید به نکته مهم اشاره شود که برای هر نمونه خاک با توجه به شرایط خاص آن باید این مقدار بهینه بدست آید. این تحقیق نشان می‌دهد که این مطلب به درستی قابل اثبات است و برای این نمونه خاک چسبنده به خصوص، این کار صورت گرفته است. در ادامه به تفسیر این مطلب

استفاده بیش از یک مقدار مشخص از الیاف شیشه در ترکیب با خاک چسبنده منجر به کاهش اثربخشی افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در مقادیر مختلف رطوبت شده است. به عبارت دیگر می‌توان انتظار داشت که مقداری بهینه برای الیاف شیشه به عنوان مسلح کننده برای این نوع خاک چسبنده

مقاومت فشاری نمونه‌های خاک چسبنده مسلح شده با الیاف همچنان از مقدار مقاومت نمونه‌های خاک چسبنده طبیعی بیشتر است. افزایش مقدار مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف شیشه با درصد رطوبت‌های مختلف به دلیل چسبندگی و اصطکاک بین ذرات خاک و الیاف شیشه است که این مسئله بطور معمول به دلیل بروز کشش ناشی از اعمال فشار در نمونه‌های خاک بوجود می‌آید. عملکرد اصلی الیاف در توده خاک پس از ایجاد ترک‌های ریز در نمونه بوده و مقدار نیروی کششی در الیاف بلافاصله پس از بروز ترک در نمونه افزایش یافته و این افزایش تا بروز گسیختگی در الیاف یا بیرون کشیدگی از درون توده خاک ادامه می‌یابد. با ادامه این روند و پس از گسیختگی از مقدار مقاومت فشاری محصور نشده کاسته می‌شود. همچنین، سرعت کاهش مقدار مقاومت فشاری در نمونه‌های با مقدار رطوبت ۱۱ درصد بیشتر از نمونه‌های با رطوبت ۱۳ و ۱۵ درصد بوده و بطور مشابه در نمونه‌های با رطوبت ۱۳ درصد نیز بیشتر از نمونه‌های با مقدار رطوبت ۱۵ درصد بوده است. با افزایش مقدار الیاف بیشتر از ۱ درصد در یک مقدار رطوبت مشخص و به دلیل حضور الیاف بیشتر از مقدار بهینه در درون توده خاک، مقدار چسبندگی و اصطکاک بین ذرات خاک کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر مقدار الیاف، این اثر افزایش یافته و در نتیجه از مقدار مقاومت فشاری محصور نشده کاسته می‌شود. لازم به ذکر است که این روند در تمامی مقادیر رطوبت ۱۱، ۱۳ و ۱۵ درصد به صورت مشابه ملاحظه شده است و تنها مقدار مقاومت فشاری بدست آمده در رطوبت‌های مختلف با یکدیگر متفاوت است.

پرداخته می‌شود که این مطلب به دلیل این واقعیت است که با افزایش مقدار الیاف در خاک چسبنده، الیاف به یکدیگر چسبیده و از چسبندگی بین الیاف و ذرات خاک چسبنده کاسته شده و همچنین از چسبندگی ذرات خاک با یکدیگر نیز ممانعت به عمل آمده است. این مطلب نشان می‌دهد که در درصد‌های کمتر الیاف، مسلح کننده نقش پل را ایفا می‌کند اما در درصد‌های بالاتر نقش منفی ایفا کرده و بین ذرات، جدایی ایجاد می‌کند. بیشترین مقادیر مقاومت فشاری در نمونه‌های با مقدار رطوبت ۱۱ درصد بدست آمده است، علت این مسئله آن است که به دلیل پایین بودن میزان آب جذب سطحی و آب موجود در درون حفرات خاک، اندرکنش و اصطکاک بین ذرات خاک در مقایسه با نمونه‌های با مقدار رطوبت ۱۳ و ۱۵ درصد بیشتر بوده و در نهایت مقدار مقاومت فشاری مربوط به آن نیز بیشتر شده است. همچنین، مقدار مقاومت فشاری نمونه‌های با مقدار رطوبت ۱۳ درصد نیز به دلیل مشابه از مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌های مشابه با مقدار رطوبت ۱۵ درصد بیشتر شده است. لازم به ذکر است که این روند افزایش مقاومت فشاری برای همه نمونه‌های خاک چسبنده طبیعی و مسلح شده توسط الیاف شیشه در تمامی مقادیر اختلاط خاک چسبنده با الیاف شیشه مشاهده شده است.

روند تغییرات حداکثر مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده با نسبت‌های مختلف اختلاط الیاف شیشه با خاک چسبنده در مقادیر مختلف رطوبت را می‌توان در شکل ۱۱ مشاهده کرد. در یک مقدار رطوبت مشخص، مقدار مقاومت فشاری برای نمونه‌های خاک چسبنده مسلح شده تا مقدار ۱ درصد الیاف شیشه افزایش یافته و پس از آن کاهش یافته است، اما مقدار



شکل ۱۱. تغییرات حداکثر مقادیر مقاومت فشاری تک محوری در مقادیر مختلف رطوبت

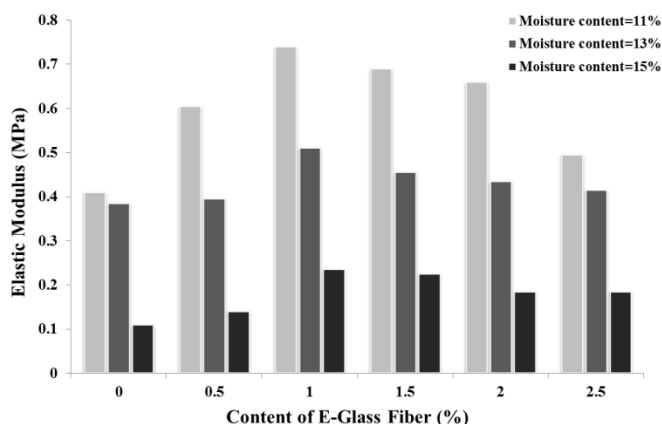
### ۳-۳. مدول الاستیسیته خاک چسبنده مسلح شده با الیاف

شیشه

مدول الاستیسیته (E<sub>50</sub>) با برآورد نصف حداکثر مقدار مقاومت فشاری محصور نشده بدست آمده از آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده محاسبه شده است. مدول الاستیسیته خاک چسبنده طبیعی و مسلح شده با درصدهای مختلف الیاف شیشه در مقادیر مختلف رطوبت در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با مشاهده این شکل می‌توان نتیجه گرفت که حداکثر مقدار مدول الاستیسیته برای تمام مقادیر رطوبت به ازای ترکیب ۱ درصد الیاف شیشه با خاک چسبنده رخ می‌دهد. با افزودن ۱ درصد الیاف شیشه به خاک چسبنده در مقادیر رطوبت ۱۱، ۱۳ و ۱۵ درصد، مقدار مدول الاستیسیته به ترتیب به میزان ۸۰/۵، ۳۴/۲ و ۱۰۹/۱ درصد افزایش یافته است. حداکثر مقدار مدول الاستیسیته برای نمونه خاک چسبنده مسلح شده با ۱ درصد الیاف شیشه و در رطوبت ۱۱ درصد مشاهده شده است که ۱/۸۰ برابر مدول

الاستیسیته خاک چسبنده طبیعی در همان مقدار رطوبت بوده است.

از شکل ۱۲ می‌توان مشاهده کرد که با افزایش محتوای الیاف شیشه در خاک چسبنده به ازای مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد در رطوبت ۱۱ درصد، مقدار مدول الاستیسیته ترکیب به مقدار ۴۶/۳، ۸۰/۵، ۶۸/۳، ۶۱ و ۱۹/۵ درصد نسبت به نمونه خاک چسبنده طبیعی در همان مقدار رطوبت افزایش یافته است. با افزایش محتوای الیاف شیشه در خاک چسبنده به ازای مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد در رطوبت ۱۳ درصد، مقدار مدول الاستیسیته ترکیب به مقدار ۲/۶، ۳۴/۲، ۱۸/۴، ۱۳/۱ و ۷/۹ درصد نسبت به نمونه خاک چسبنده طبیعی در همان مقدار رطوبت افزایش یافته است. همچنین، با افزایش محتوای الیاف شیشه در خاک چسبنده به ازای مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد در رطوبت ۱۵ درصد، مقدار مدول الاستیسیته ترکیب به مقدار ۲۷/۲، ۱۰۹/۱، ۱۰۰، ۶۳/۶ و ۶۳/۶ درصد نسبت به نمونه خاک چسبنده طبیعی در همان مقدار رطوبت افزایش یافته است.



شکل ۱۲. مدول الاستیسیته خاک چسبنده مسلح شده با درصدهای مختلف الیاف شیشه در مقادیر مختلف رطوبت

#### ۴. نتیجه گیری

امروزه استفاده از الیاف شیشه به دلیل مسائل زیست محیطی و صرفه اقتصادی از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار می‌باشد. دلیل این صرفه اقتصادی ارتقای پارامترهای مقاومت فشاری خاک چسبنده با مقدار درصد وزنی کم می‌باشد. از سوی دیگر این مصالح پرهزینه هم نیستند. در این مطالعه اثرات افزودن الیاف شیشه بر خصوصیات مکانیکی خاک چسبنده با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه به نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده در این تحقیق اشاره شده است:

(۱) درصد بهینه الیاف شیشه در خاک چسبنده برای دستیابی به بیشترین مقدار مقاومت فشاری محصور نشده به ازای تمام مقادیر درصد رطوبت ۱۱، ۱۳ و ۱۵ درصد، مقدار ۱ درصد وزنی بدست آمده است. می‌توان اینگونه بیان نمود که این درصد بدست آمده، مقدار بهینه برای شرایط مورد نظر در این تحقیق است. حداکثر مقدار مقاومت فشاری نمونه-های خاک چسبنده مسلح شده با ۱ درصد الیاف شیشه در رطوبت‌های ۱۱، ۱۳ و ۱۵ درصد به ترتیب برابر ۱۱۲۸، ۱۵۴۳ و ۵۷۳ کیلوپاسکال بدست آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش رطوبت نمونه، کاهش مقاومت فشاری

محصورنشده را به همراه داشته است. کمترین و بیشترین مقدار مقاومت فشاری محصور نشده به ترتیب برای نمونه خاک چسبنده طبیعی با رطوبت ۱۵ درصد و نمونه خاک چسبنده مسلح شده با ۱ درصد الیاف در رطوبت ۱۱ درصد و به ترتیب با مقادیر ۲۷۳ و ۱۵۴۳ کیلوپاسکال بدست آمده است. مقایسه مقادیر مقاومت فشاری محصورنشده در حالت طبیعی و در حالت همراه با یک درصد الیاف شیشه حاکی از افزایش قابل توجه در مقاومت خاک چسبنده مسلح است. همین مطلب، تأکیدی بر اقتصادی بودن این روش تسلیح در این نمونه به خصوص خاک است.

(۲) نتایج تحقیق نشان داد که استفاده بیش از ۱ درصد وزن خاک خشک از الیاف شیشه در ترکیب با خاک چسبنده، نه تنها باعث افزایش مقاومت فشاری محصورنشده خاک نشد بلکه منجر به کاهش اثربخشی افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در مقادیر مختلف رطوبت شده است. یعنی بدون توجه به مقادیر درصد رطوبت خاک، کاهش مقاومت مشاهده گردید. بنابراین در این بخش، رطوبت پارامتر تعیین کننده نبوده بلکه درصد الیاف شیشه پارامتر موثر بوده است. دلیل این است که با افزایش

گسیختگی نمونه‌های با رطوبت ۱۱ درصد با مقادیر مختلف الیاف شیشه بسیار پایین‌تر از نمونه‌های مشابه با رطوبت‌های ۱۳ و ۱۵ است. این نمونه‌ها به سرعت به حداکثر مقدار مقاومت فشاری خود رسیده و پس از گسیختگی مقدار مقاومت آنها به سرعت پایین آمده و کرنش پس از مقدار مقاومت نهایی که می‌توان آن را کرنش پسماند نامید، به مقدار اندکی مشاهده شده است.

(۵) به طور کلی می‌توان گفت که با نگاهی به نمونه‌های آزمایشگاهی و مقایسه نسبی آنها با یکدیگر، با افزایش مقدار رطوبت، از مقدار درزه و ترک در نمونه‌ها کاسته شده و ترک‌های باریک و کوتاه‌تر بر روی سطح نمونه‌ها دیده می‌شود. افزایش رطوبت در هر کدام از نمونه‌های خاک چسبنده طبیعی و مسلح شده با مقادیر مختلف الیاف شیشه موجب افزایش شکل‌پذیری نمونه‌ها و تغییر حالت گسیختگی آنها از شکست ترد به شکست انعطاف-پذیر شده است. با مشاهده گسیختگی نمونه‌های خاک چسبنده مسلح شده با درصد‌های مختلف الیاف شیشه در رطوبت‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت که در یک مقدار رطوبت مشخص با افزایش مقدار الیاف تا ۱/۵ درصد مقدار ترک‌ها افزایش یافته و با افزایش بیشتر از مقدار ۱/۵ درصد از مقدار آن کاهش می‌یابد. لازم به تذکر است که مقدار ترک‌ها به صورت نسبی و مشاهده‌ای مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

(۶) بیشترین مقدار تغییر در مقادیر مقاومت فشاری به ترتیب در نمونه‌های با مقدار رطوبت ۱۵، ۱۱ و ۱۳ درصد مشاهده شده است. به نظر می‌رسد علت تغییرات قابل توجه مقاومت فشاری به دلیل اثرات چسبندگی بیشتر بین ذرات خاک چسبنده و الیاف در رطوبت بیشتر از رطوبت بهینه نسبت به اثرات ناشی از اصطکاک بین ذرات خاک و الیاف در

مقدار الیاف در خاک چسبنده، الیاف به یکدیگر چسبیده و از چسبندگی بین الیاف و ذرات خاک کاسته شده و همچنین از چسبندگی ذرات خاک با یکدیگر نیز ممانعت به عمل آمده است و در نتیجه مقاومت فشاری محصورنشده کاهش یافته است. این مطلب، قابل توجه است که نباید این تصور اشتباه وجود داشته باشد که با افزایش مداوم درصد مسلح کننده، افزایش مقاومت خاک مشاهده می‌شود.

(۳) بیشترین و کمترین مقدار شکل‌پذیری خاک چسبنده طبیعی و مسلح شده با الیاف شیشه در آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده به ترتیب برای نمونه‌های با رطوبت ۱۵ و ۱۱ درصد بدست آمده است و مقدار شکل‌پذیری نمونه‌های با مقدار رطوبت ۱۳ درصد حدوداً در بینابین نتایج نمونه‌های با رطوبت‌های ۱۱ و ۱۵ درصد بوده است. قابل توجه است که این مطلب به طور نسبی با مقایسه نمونه‌های موجود مورد بررسی و نتیجه‌گیری قرار گرفته است. بدون تردید نوع کانی رس نیز در این نتیجه‌گیری اثرگذار بوده است. نتیجه‌گیری کلی که می‌توان در این مورد داشت این است که درصد رطوبت نمونه‌ها تاثیرگذار بوده‌اند.

(۴) کرنش گسیختگی متناظر با حداکثر مقاومت فشاری در نمونه‌های با رطوبت ۱۵ درصد در تمامی نمونه‌های مسلح شده با الیاف شیشه نسبت به نمونه‌های مشابه با رطوبت‌های ۱۱ و ۱۳ درصد بالاتر بوده است. این نمونه‌ها با سرعت کمتر و در مقدار کرنش بیشتری به حداکثر مقدار مقاومت فشاری خود رسیده و مقاومت آنها پس از بروز گسیختگی به کندی پایین آمده است. همین مطلب ناظر بر این نتیجه جالب توجه است که نمونه با درصد رطوبت بیشتر (در محدوده مورد مطالعه خاص در این تحقیق) انعطاف‌پذیری و یا به عبارت دیگر، شکل-پذیری بیشتری از خود نشان داده است. کرنش

خاک چسبنده مسلح شده با ۱ درصد الیاف شیشه و در رطوبت ۱۱ درصد مشاهده شده است که  $1/80$  برابر مدول الاستیسیته خاک چسبنده طبیعی در همان مقدار رطوبت بوده است.

(۸) تغییرات پارامتر چسبندگی خاک در دو حالت خاک چسبنده طبیعی و مسلح شده با الیاف با تغییر مقدار رطوبت چندان قابل توجه نبوده است. اما بطور کلی با افزایش مقدار رطوبت در درصدهای مختلف الیاف شیشه از مقدار چسبندگی ترکیب کاسته شده است.

رطوبت کمتر از رطوبت بهینه باشد. مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های با رطوبت بهینه نیز به علت اصطکاک کمتر از نمونه‌های با مقدار رطوبت ۱۱ درصد و چسبندگی کمتر از نمونه‌های با مقدار رطوبت ۱۵ درصد در حد واسط بین آنها قرار گرفته است.

(۷) افزودن الیاف به خاک تأثیر قابل ملاحظه‌ای در بهبود و افزایش مدول الاستیسیته خاک داشته است. مدول الاستیسیته برای تمام مقادیر رطوبت به ازای ترکیب ۱ درصد الیاف شیشه با خاک چسبنده به حداکثر مقدار خود رسیده است. با افزودن ۱ درصد الیاف شیشه به خاک چسبنده در مقادیر رطوبت ۱۱، ۱۳ و ۱۵ درصد، مقدار مدول الاستیسیته به ترتیب به میزان  $80/5$ ،  $34/2$  و  $109/1$  درصد افزایش یافته است. حداکثر مقدار مدول الاستیسیته برای نمونه

#### منابع

- عامل سخی، م.، یوسفی، ر.، عمویی، ا.ع.، کریمی، ع.، ۱۴۰۱، مطالعه تجربی تاثیر افزودن الیاف پلی پروپیلن بر خاک تثبیت شده با سیمان و جایگزینی ژئولیت، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۴، صفحات ۱۵۵۳ الی ۱۵۷۲.
- Amelsakhi, M, Influence of optimized tire shreds on strength of sand-reinforced with tire shreds, 2001, In Partial Fulfilment of the Requirements the Degree of Master of Science, Faculty of Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
- Ahmad F, Mujah D, Hazarika H, and Safari A. 2012, assessing the potential reuse of recycled glass fiber in problematic soil applications. *Journal of Cleaner Production*. 35, pp. 102-7.
- Ateş A. 2016, Mechanical properties of sandy soils reinforced with cement and randomly distributed glass fibers (GRC). *Composites Part B: Engineering*; 96, pp. 295-304.
- Correia AA, Oliveira PJ, Custódio DG. 2015, Effect of polypropylene fibers on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilized with binders. *Geotextiles and Geomembranes*. 43(2), pp. 97-106.
- Ghazavi M, Amelsakhi, M, 2005a, Influence of Optimized Tire Shreds on Shear Strength Parameters of Sand, *International Journal of Geomechanics*, 5(1). Pp. 58-65.
- Ghazavi, M, Amelsakhi, M, 2005b, Optimization of Aspect Ratio of Waste Tire Shreds in Sand-Shred Mixtures Using CBR Tests, *Geotechnical Testing Journal*, 28(6).
- Park SS. 2009, Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand. *Geotextiles and Geomembranes*. 27(2), pp. 162-6.
- To D, Sundaresan S, Dave R. , 2011, Nanoparticle mixing through rapid expansion of high pressure and supercritical suspensions. *Journal of Nanoparticle Research*; 13(9), pp. 4253-66.