

## پارامترهای مقاومت برشی خاک مسلح شده با الیاف سرامیکی پوشش داده شده

### با نانوسیلیس و کائولن

مهدی اسحاقزاده، دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

میثم بیات (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

**E-mail: bayat.m@pci.iaun.ac.ir**

رسول اجل لوئیان، استاد، گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

سید مهدی حجازی، دانشیار، گروه مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۹

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۰

### چکیده

در این مقاله با استفاده از نتایج آزمایش برش مستقیم، تاثیر پارامترهای مختلفی بر روی پارامترهای مقاومت برشی خاک مسلح شده با الیاف سرامیکی پوشش داده با ذرات نانوسیلیس و کائولن بررسی شده است. اثر مقدار الیاف سرامیکی، طول الیاف و مقدار نانوسیلیس و کائولن و همچنین مقدار الیاف پوشش داده شده با نانوسیلیس و کائولن بر روی پارامترهای مقاومت برشی ماسه لای دار مسلح شده بررسی شده است. ساختار میکروسکوپی نمونه‌ها و برهم کنش الیاف و ذرات نانوسیلیس، کائولن و خاک نیز با استفاده از عکس‌های میکروسکوپی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها با افزودن الیاف سرامیکی، نانوسیلیس و یا کائولن به خاک طبیعی افزایش یافته است. طول الیاف سرامیکی تأثیر مهمی بر پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های تقویت شده با الیاف نداشته است و در کل مقدار ۰/۵ درصد الیاف بعنوان مقدار بهینه الیاف شناخته شده است. نمونه‌های حاوی ذرات کائولن مقاومت برشی بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی ذرات نانوسیلیس برای یک مقدار ثابت افزودنی داشته است. پوشش الیاف با کائولن اثر بیشتری بر روی افزایش پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها داشته است.

کلمات کلیدی: ماسه لای دار، الیاف سرامیکی، نانوسیلیس، کائولن، پارامترهای مقاومت برشی

## ۱. مقدمه

تغییر حجمی مصالح ژئوتکنیکی را بهبود بخشد (Hejazi et al. 2012; Asgari et al. 2015; Sharma 2018; Saadat and Bayat 2019; Tomar et al. 2019; Salehi et al. 2021). تاکنون، بسیاری از مطالعات گذشته اثر مفید انواع الیاف‌ها را بر خصوصیات مکانیکی خاک‌های ضعیف ارزیابی کرده‌اند (Mirzababaei et al. 2018; Faghih Khorasani and Kabir 2020; Li et al. 2020). در این مورد از انواع مختلف الیاف مانند الیاف پلی-پروپیلن، الیاف بازالت، الیاف شیشه، الیاف لاستیک و الیاف کربن در بهسازی خاک به طور گسترده استفاده شده است (Boz and Sezer 2018; Ma and Gao 2018; Lv et al. 2019). در برخی موارد مشاهده شده است که استفاده از الیاف پوشش‌دار می‌تواند از الیاف در برابر حرارت و مواد خورنده در محیط‌های آلوده جلوگیری کند (Brabston, William N. 1992). اگرچه مطالعات زیادی در مورد مشخصات مکانیکی خاک تقویت شده با الیاف وجود دارد، اما تاکنون هیچ مطالعه‌ای در مورد تأثیر الیاف سرامیکی پوشش داده شده با نانو سیلیس یا کائولن بر روی پارامترهای مقاومت برشی خاک انجام نشده است. استفاده از الیاف سرامیکی در بهبود خواص مکانیکی ملات سیمان (Huang et al. 2019) و بتن (Su and Xu 2013; Siddique et al. 2019) قبلاً مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال، هیچ تحقیق در گذشته در مورد استفاده از الیاف سرامیکی برای تثبیت خاک وجود ندارد. فناوری نانو به عنوان یک انقلاب جدید فناوری تکامل یافته است که طی بیست سال گذشته به سرعت رشد کرده است. این نانو مواد از زمان معرفی آنها در سال ۱۹۵۹ به طور گسترده در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات قبلی نشان می‌دهد که استفاده از مواد نانو بهسازی مصالح خاکی و پروژه‌های ژئوتکنیکی می‌تواند باعث بهبود رفتار مکانیکی و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک ضعیف شود (Calabi Floody et al. 2009; Sameni et al. 2015; Iranpour and haddad 2016; Changizi and Haddad 2017; Cui et al. 2018; Sarli et al. 2020; Zidi et al. 2020;

در کمتر پروژه عمرانی است که نگرانی از جنس بستر پروژه عمرانی جهت دارا بودن ویژگی های مکانیکی و شیمیایی لازم، دغدغه ای را برای مهندسان ایجاد نکرده باشد. در پروژه های کلان ساختمانی، راهسازی، سدسازی و تونل، مهندسان به ناچار با بسترهایی از جنس های مختلف با مقاومت ها و پارامترهای مختلفی روبرو می شوند. خاک های مختلف خواص مکانیکی، تورم زایی و نشست پذیری مختلفی دارند. بعضا با توجه به گستره ی پروژه ها امکان اجرای یک لایه غیر اقتصادی با ضوابط اجرایی و مالی پروژه همخوانی ندارد، لذا شناخت انواع خاک های مشکل ساز در پروژه و تثبیت آن ها با مصالح مناسب اهمیت فراوانی پیدا می کند. روش مناسب جهت بهسازی خاک با توجه به اهمیت پروژه، جنس خاک اولیه، وسعت منطقه، دسترسی به مصالح، تجهیزات و نیروهای متخصص، عوامل زیست محیطی، تجارب مهندسان، مسائل اقتصادی و زمان مجاز برای تکمیل پروژه انتخاب می شود. خاک ها می بایست با توجه به نقاط ضعف و راه مناسب جبران آن بهسازی شوند. امروزه به منظور اجرای پروژه های مختلف راه سازی و ابنیه فنی راه، بهبود خواص فیزیکی و مهندسی خاک بستر با هدف بهسازی خاک و افزایش مقاومت باربری و دوام، کاهش تورم و انقباض و در نتیجه کاهش ضخامت سازه ای ساختار روسازی همواره مورد توجه مهندسین قرار گرفته است. یکی از این روش های بهسازی، تثبیت خاک بستر با افزودن الیاف های طبیعی و مصنوعی است. مشارکت مناسب الیاف و خاک، مصالح ویژه ای را ایجاد می کند که دارای خواصی متفاوت و متمایز با خواص اجزاء تشکیل دهنده آن بخصوص در کشش است. با آگاهی از خواص و رفتار خاک های ریزدانه که خاک های مناسبی جهت احداث انواع سازه نیست، لزوم اصلاح آنها همواره مطرح است. تحقیق های گذشته نشان می دهد که استفاده از تثبیت کننده هایی همچون سیمان یا آهک و همچنین اضافه شدن المان هایی مثل الیاف طبیعی یا مصنوعی به خاک، می تواند مقاومت برشی، خصوصیات هیدرولیکی و رفتار

## پارامترهای مقاومت برشی خاک مسلح شده با الیاف سرامیکی پوشش داده شده با نانوسیلیس و کائولن

مصالح با الیاف و به دنبال آن افزایش اصطکاک و مقاومت برشی می‌شود. برای این منظور یک سری آزمایش برش مستقیم انجام شده است. برهم‌کنش بین ذرات خاک و الیاف و یا نانوسیلیس یا کائولن با استفاده از تجزیه و تحلیل عکس‌های میکروسکوپی (*SEM*) نیز انجام شده است.

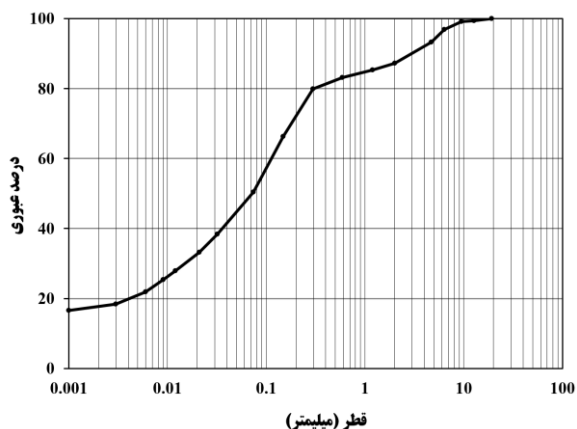
### ۲. مواد و روش‌ها

منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۱) ارائه شده است. خصوصیات ژئوتکنیکی و فیزیکی خاک مورد استفاده نیز در جدول (۱) نشان داده شده است. طبق سیستم طبقه بندی متحد (*USCS*) خاک مورد استفاده خاک ماسه لای دار است. الیاف سرامیکی مورد استفاده در شکل (۲) نشان داده شده است. الیاف سرامیک از الیافی با درجه حرارت بالا طراحی شده و برای استفاده در انواع برنامه های کاربردی صنعتی و تجاری است. الیاف سرامیک تولید شده از مواد آلومینا-سیلیکا بوده و از لحاظ شیمیایی بی اثر هستند (Clauss and Schawaller 2006; Su and Xu 2013; Wan et al. 2016; Baji and Mai 2017). تولید الیاف سرامیک خوب برای اولین بار نیازمند یک فیبر الیاف یا مواد معدنی پیشرو است که پس از آن به مدت زمان بسیار کوتاهی حرارت دادن نیاز دارد. الیاف سرامیکی را می‌توان از طریق رسوب شیمیایی بخار، طراحی ذوب، چرخش و اکستروژن تولید کرد. مواد سرامیکی با کارایی بالا برای کاربردهای ساختمانی با درجه حرارت بالا مورد توجه هستند، اما به رسمیت شناخته شده است که شکنندگی ذاتی آنها و گرایش به شکست‌های غیر قابل پیش بینی، قبل از پذیرش گسترده به عنوان مواد مهندسی، مشکلات عمده فنی را ایجاد می‌کنند. به همین دلیل در حال حاضر افزایش علاقه به توسعه الیاف سرامیک تقویت شده، بیشتر شده است. این اصل در کار با الیاف کربن در ماتریس‌های سرامیکی نشان داده شده است، گرچه کاربرد این کامپوزیت‌ها با توجه به حساسیت الیاف به اکسیداسیون در دمای بالای ۴۰۰ درجه سانتیگراد محدود است. الیاف استاندارد سرامیکی از مواد معدنی، عمدتاً اکسید آلومینیوم

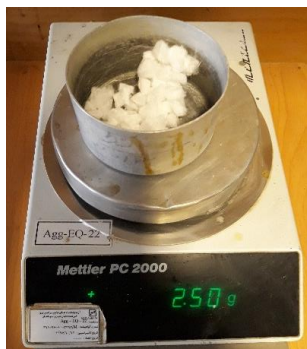
(Akbari et al. 2021). نتایج آزمایش‌های انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که پارامترهای مقاومت برشی ماسه‌لای‌دار بهسازی شده با الیاف کربن و نانوسیلیس با افزودن الیاف کربن و نانوسیلیس به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. (Cui et al. 2018). در واقع افزودن الیاف کربن به خاک باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت برشی شده است. از طرف دیگر، نانوسیلیس برای بهبود چسبندگی موثر بوده است. مطالعات انجام شده بر روی خاک بهسازی شده با پلی‌استر و نانوسیلیس نشان می‌دهد که افزودن پلی‌استر و نانوسیلیس در خاک ضعیف منجر به افزایش مقاومت برشی آن می‌شود. کائولن نیز بعنوان یکی از زیرمجموعه‌های کانی‌های رسی است که از لایه های متناوب سیلیس و آلومینا تشکیل شده است و شامل مورفولوژی های مختلف طبیعی مانند پلاکت‌های شش ضلعی است (Wong et al. 2013). مطالعات قبلی نشان می‌دهد که کائولن می‌تواند به عنوان جایگزینی مناسب برای سیمان در ملات و بتن شود که این جایگزینی باعث کاهش مصرف انرژی در تولید سیمان می‌شوند و به عنوان یکی از رویکردهای سازگار با محیط زیست استفاده شود (Sabir et al. 2001; Gonçalves et al. 2009; Shafiq et al. 2015; Du and Pang 2020). کائولن نیز قبلاً برای بهبود خصوصیات مکانیکی خاک تورب استفاده شده است (Wong et al. 2013). نتایج نشان می‌دهد که جایگزین کردن ده درصد کائولن به جای سیمان می‌تواند تا باعث افزایش مقاومت برشی شود (Wong et al. 2013).

در این تحقیق، پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه‌لای‌دار تقویت شده با الیاف سرامیکی پوشش داده شده با نانوسیلیس یا کائولن به عنوان یک تقویت‌کننده جدید بررسی شده است. استفاده از دو نوم مصالح برای پوشش به جهت بررسی تاثیر مصالح پوشش دهنده بر روی اندرکنش ذرات خاک و الیاف پوشش دار بوده است. الیاف پوشش دار نسبت به الیاف بدون پوشش در بهسازی خاک مثل تفاوت بین میلگرد آجدار و بدون آج در بتن است. زبر کردن سطح الیاف باعث درگیری بیشتر

نمونه‌ها ابتدا مقدار خاک مورد نظر در دستگاه آون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد خشک شده است.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده در تحقیق



شکل ۲. الیاف سرامیکی مورد استفاده در آزمایش‌ها

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و ژئوتکنیکی خاک مورد استفاده

مقدار یا توصیف	خصوصیت
2.66	چگالی نسبی دانه‌ها
20	درصد عبوری از الک 200
NP	شاخص خمیری
ماسه لای‌دار	نوع خاک بر اساس سیستم متحد
9.55	درصد رطوبت بهینه
20.11	وزن مخصوص خشک بیشینه ( $KN / m^3$ )
0.01	چسبندگی ( $MPa$ )
35.6	زاویه اصطکاک (درجه)

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی الیاف سرامیکی

( $Al_2O_3$ ) و دی اکسید سیلیکون ( $SiO_2$ ) ساخته می‌شوند که منجر به ترموستگی بسیار بالا می‌شوند. در شرایط عادی، الیاف سرامیکی استاندارد را می‌توان در دماهای بالا تا ۱۲۶۰ درجه سانتیگراد استفاده کرد. با افزودن مقادیر کم، مانند اکسید زیرکونیوم ( $ZrO_2$ )، دمای کاربرد را می‌توان تا حدود ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد افزایش داد (Ma et al. 2005; Alkoy et al. 2007; Su et al. 2014; Huang et al. 2019; Eshaghzadeh et al. 2021). مناطقی که خواص عایق الکتریکی در دماهای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد، برای بسته بندی و اتصالات انبساطی استفاده می‌شود. اگر هیچ پوششی مکانیکی وجود نداشته باشد، الیاف سرامیکی می‌توانند بعنوان تنها مواد مقاوم در تماس با فرآیندهای با درجه حرارت بالا استفاده شوند، مثلاً در کوره های حرارتی فلز، شیشه و غیره. الیاف سرامیکی با کیفیت‌های مختلف تولید می‌شود. از ویژگی‌های مهم الیاف سرامیکی می‌توان به وزن سبک، تحمل درجه حرارت بالا تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد، پایداری شیمیایی مطلوب، فاقد آزبست و دوستدار محیط زیست اشاره کرد. تولید الیاف سرامیکی معمول بدون در نظر گرفتن مقاومت حرارتی خیلی بالا هزینه کمی دارد ولی تولید الیاف سرامیکی با مقاومت حرارتی بالا هزینه تولید را افزایش می‌دهد. عمدتاً در مسائل ژئوتکنیکی معمول، مقاومت حرارتی بالا نیاز نیست و می‌توان از الیاف سرامیکی معمول استفاده نمود. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی الیاف سرامیکی نیز در جداول (۲) و (۳) نشان داده شده است. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نانو سیلیس و کائولن نیز در جداول (۴) و (۵) ارائه شده است. در این تحقیق برای مشخص کردن اثر پارامترهای مورد نظر بر روی مقاومت برشی نمونه‌های بازسازی شده، مجموعه‌ای از آزمایش‌های برش مستقیم کوچک مقیاس انجام شده است. آزمایش‌ها در دستگاه برش مستقیم با ابعاد ۱۰ در ۱۰ سانتیمتر انجام شده است. آزمایش برش مستقیم مطابق با  $ASTM - D3080$  انجام شده است. برای آماده‌سازی اولیه

## پارامترهای مقاومت برشی خاک مسلح شده با الیاف سرامیکی پوشش داده شده با نانوسیلیس و کائولن

برای ساخت نمونه‌های حاوی نانو سیلیس و کائولن نیز روندی مشابه این انجام شده است. تمامی درصد مصالح افزودنی بصورت وزنی بوده است. در صورتی که برای ساخت نمونه‌های حاوی الیاف سرامیکی آغشته با نانوسیلیس و کائولن روند متفاوت‌تری انجام شده است. برای ساخت این نمونه‌ها ابتدا مقدار الیاف مورد نظر بر روی سطحی پخش شده است و با استفاده از اسپری کردن چسب بر روی سطوح الیاف، ذرات نانو سیلیس و کائولن مورد نظر روی سطوح الیاف چسبانده شده است و سپس الیاف پوشش داده شده با مصالح مورد نظر به مقدار لازم با خاک خشک مخلوط شده و بعد از آن رطوبت به آن اضافه شده تا به مقدار رطوبت بهینه برسد و در نهایت مخلوط درون قالب دستگاه ریخته شده و متراکم شده است. مقدار نانوسیلیس و کائولن برای پوشش سطح الیاف ۰/۱ و ۰/۵ درصد انتخاب شده است. دلیل انتخاب این دو مقدار ایجاد یک پوشش ضعیف در ۰/۱ درصد و یک پوشش قوی در ۰/۵ درصد بوده است. بعد از اضافه کردن مقدار الیاف پوشش‌دار مورد نظر به خاک، مقداری رطوبت معادل رطوبت بهینه خاک به مخلوط خاک و الیاف اضافه شده است. مخلوط خاک، آب و الیاف کاملاً مخلوط شده بطوری که توزیع الیاف اضافه شده کاملاً یکنواخت شود. بعد از آن خاک را درون قالب ریخته شده از طریق روش کوبش مرطوب متراکم شده است. یکی از مشکلات مهم در زمان ساخت نمونه‌های تقویت شده با الیاف، از بین رفتن زبری ایجاد شده روی الیاف در زمان کوبش نمونه‌ها بوده است. به منظور کاهش صدمات وارد شده به الیاف در زمان ساخت نمونه، کوبش در یک مرحله بر روی کل نمونه انجام شده است. از آنجاکه اندرکنش الیاف پوشش داده شده و خاک در وسط نمونه یا همان محل برش تعیین کننده بوده است، کوبش نمونه در یک مرحله کمترین آسیب را به الیاف در آن منطقه رسانده است. از طرف دیگر، عکس‌های میکروسکوپی تهیه از نمونه‌ها نشان می‌دهد که حتی بعد از ساخت نمونه، پوشش الیاف از بین نرفته است. یکی از مشکلات اساسی در زمان ساخت نمونه‌های تقویت شده با

مقدار	خصوصیت
6, 12, 18	طول الیاف (mm)
3-5	قطر الیاف ( $\mu m$ )
1260	طبقه بندی حرارتی ( $^{\circ}C$ )
< 25%	محتوای غیر الیافی

برای ساخت نمونه‌های حاوی الیاف مقدار الیاف مورد نظر به صورت خشک به خاک مورد نظر اضافه شده است. پس از مخلوط کردن خاک و الیاف، مقدار آب مورد نیاز اضافه شده تا به درصد رطوبت مخلوط به درصد رطوبت بهینه خاک برسد و بعد از مخلوط دوباره الیاف و خاک مرطوب، مخلوط درون قالب دستگاه ریخته شده است. وزن نمونه‌ها بر اساس وزن مخصوص خشک بیشینه تعیین شده است.

جدول ۳. خصوصیات شیمیایی الیاف سرامیکی مورد استفاده

مقدار	ترکیب
40-45	$Al_2O_3$ (%)
50-55	$SiO_2$ (%)
< 0.5	$Fe_2O_3$ (%)
< 0.5	$K_2O + Na_2O$

جدول ۴. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نانوسیلیس مورد استفاده

مقدار	خصوصیت/ترکیب
235	سطح مخصوص ( $m^2 / g$ )
25	اندازه متوسط ذرات ( $\mu m$ )
6.8	pH
> 98.5	$SiO_2$ (%)
0.5	$SO_3$ (%)

جدول ۵. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی کائولن مورد استفاده

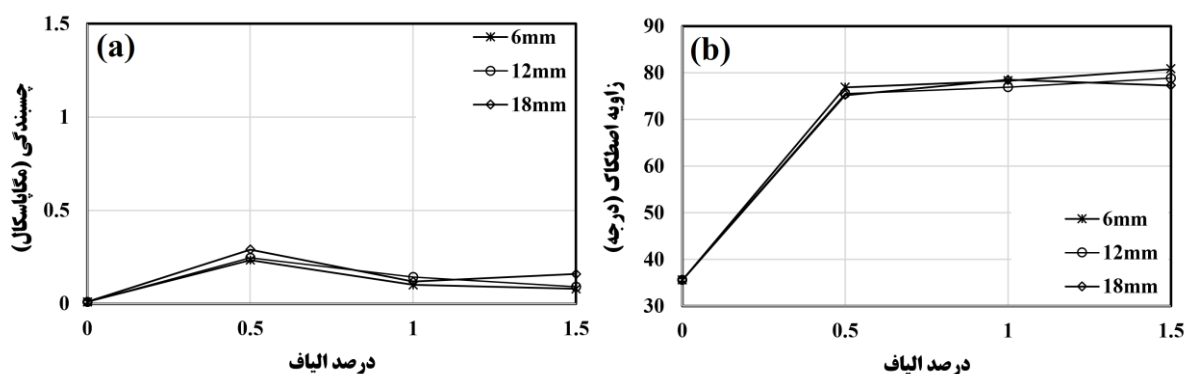
مقدار	خصوصیت/ترکیب
2.5	Gs
74.98	$SiO_2$ (%)
17.42	$Al_2O_3$ (%)
9.54	$Fe_2O_3$ (%)
0.96	$TiO_2$ (%)
1.62	CaO (%)
0.29	MgO (%)

اصطکاک بیشتر از تاثیر آن بر روی افزایش چسبندگی است. تغییرات چسبندگی در مقابل درصد الیاف نشان می‌دهد که مقدار الیاف ۰/۵ درصد بیشترین مقدار چسبندگی را به وجود آورده است و بعد از آن مقدار چسبندگی تا حدودی با افزایش مقدار الیاف کاهش یافته است. تاثیر طول الیاف بر روی چسبندگی در درصدهای مختلف الیاف متفاوت است. تغییرات زاویه اصطکاک در مقابل درصد الیاف نشان می‌دهد که اضافه شدن ۰/۵ درصد الیاف باعث افزایش چشمگیری در زاویه اصطکاک شده است و بعد از آن یعنی افزایش ۰/۵ تا ۱/۵ درصد الیاف تاثیر ناچیزی در افزایش زاویه اصطکاک داشته است. تاثیر طول الیاف بر روی زاویه اصطکاک خیلی کمتر از تاثیر آن بر روی مقدار چسبندگی است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان به این نتیجه رسید که ۰/۵ درصد الیاف سرامیکی مقدار بهینه برای افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک مورد مطالعه محسوب می‌شود. در واقع درگیر شدن ذرات نوک تیز خاک با سطح الیاف و بدنال آن زبری ایجاد شده در سطح الیاف می‌تواند موجب افزایش زاویه اصطکاک توده کل خاک شود. افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک بدلیل اضافه شدن الیاف‌های مختلف به خاک در مطالعات گذشته نیز مشاهده شده است (Sadek et al. 2010; Hamidi and Hoorsfand 2013; Liu et al. 2017; EsmaeilpourShirvani et al. 2019; Faghih Khorasani and Kabir 2020)

الیاف، عدم کنترل دقیق توزیع یکنواخت الیاف اضافه شده در خاک است. در این تحقیق سعی شده است بعد از اضافه شدن الیاف به خاک، مدت زمان مناسبی حدود ۵ دقیقه مخلوط کاملاً به هم زده شود تا الیاف به خوبی درون خاک پخش شود. توزیع یکنواخت الیاف درون خاک بصورت چشمی کنترل شده است. آزمایش‌های برش مستقیم در سه سطح تنش نرمال (۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ کیلوپاسکال) انجام شده است تا بتوان پارامترهای مقاومت برشی را از آنها استخراج نمود. بارگذاری در دستگاه برش مستقیم نیز بصورت کرنش کنترل با یک نرخ جابجایی ثابت ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. بعد از به دست آوردن منحنی تنش-کرنش آزمایش‌ها در سه تنش‌های نرمال، با استفاده از تنش ماکزیموم به دست آمده از نمودارها، پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها به دست آمده است.

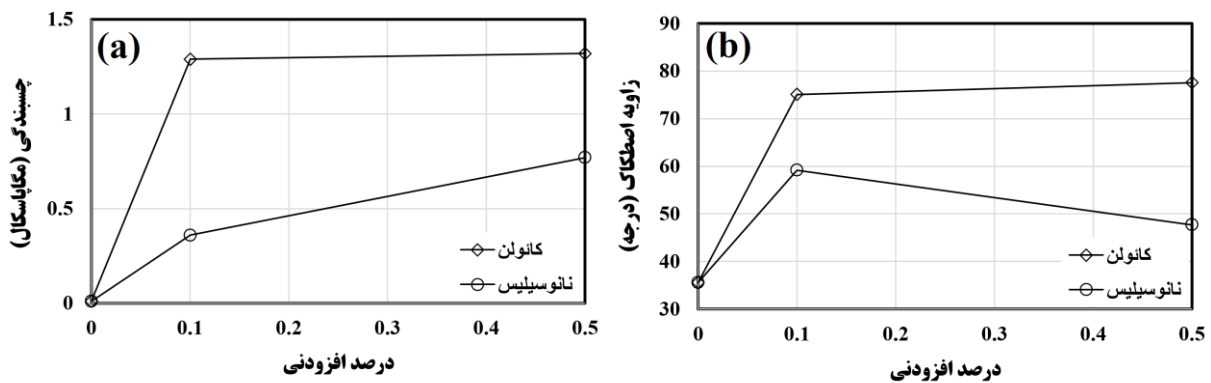
### ۳. نتایج و بحث

تاثیر طول الیاف و مقدار الیاف بر روی پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های بهسازی شده با الیاف در شکل (۲) ارائه شده است. سه طول الیاف ۶، ۱۲ و ۱۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مقدار الیاف اضافه شده نیز از ۰ تا ۱/۵ درصد تغییر یافته است. همانطور که در شکل (۲) می‌بینید اضافه شدن الیاف در طول‌های مختلف به خاک باعث افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک شده است. تاثیر اضافه شدن الیاف بر روی افزایش زاویه



شکل ۳. اثرات طول الیاف و مقدار الیاف بر روی (a) چسبندگی (b) زاویه اصطکاک نمونه‌های مسلح شده با الیاف

پارامترهای مقاومت برشی خاک مسلح شده با الیاف سرامیکی پوشش داده شده با نانوسیلیس و کائولن



شکل ۴. اثرات مقدار کائولن و نانوسیلیس بر روی (a) چسبندگی (b) زاویه اصطکاک

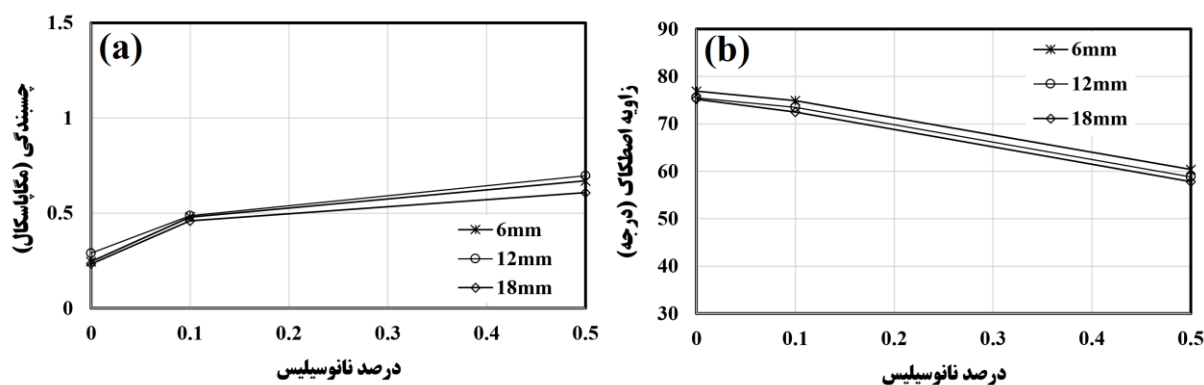
می‌دهد که چسبندگی و زاویه اصطکاک به دلیل پوشش دادن کائولن بر روی سطح الیاف افزایش یافته است. اگرچه افزایش زاویه اصطکاک به دلیل پوشش دادن روی سطح الیاف با کائولن خیلی کمتر از افزایش چسبندگی است. مقایسه نتایج نمونه‌های حاوی الیاف پوشش داده شده با کائولن و نانوسیلیس در این گروه نشان می‌دهد که افزایش چسبندگی به دلیل اضافه شدن الیاف پوشش داده شده با کائولن بیشتر از افزایش چسبندگی در نمونه‌های حاوی الیاف پوشش داده با نانوسیلیس است و در کل نمونه‌های حاوی الیاف پوشش داده با کائولن مقاومت برشی بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف سرامیکی پوشش داده شده با نانوسیلیس دارند.

پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های حاوی کائولن و نمونه‌های حاوی الیاف پوشش داده شده با کائولن در شکل (۵) نشان می‌دهد که الیاف نقش بسیار ناچیزی در اینجا دارد. حتی مشاهده می‌شود که چسبندگی نمونه‌های حاوی کائولن بیشتر از نمونه‌های حاوی الیاف پوشش داده شده با کائولن است. مقدار زاویه اصطکاک نیز در نمونه‌های حاوی کائولن و نمونه‌های حاوی الیاف پوشش داده شده با کائولن تقریباً مشابه است. پس می‌توان به این نتیجه رسید که بهترین حالت ممکن برای افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک مورد مطالعه با استفاده از مصالح استفاده شده، اضافه کردن کائولن می‌باشد. از طرف دیگر، نتایج نشان می‌دهد افزایش مقدار کائولن از ۰/۱ تا ۰/۵ درصد تاثیر ناچیزی در افزایش مقاومت نمونه‌ها داشته است. پس می‌توان

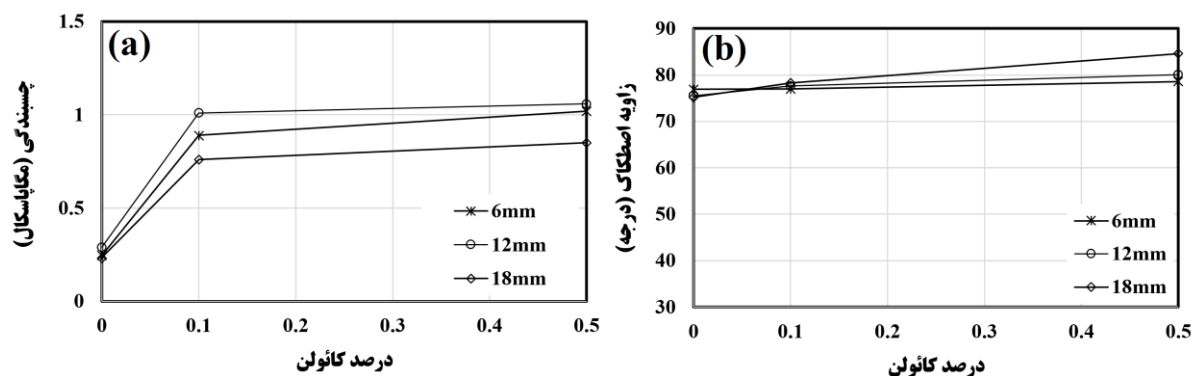
تاثیر اضافه شدن نانوسیلیس و کائولن بر روی پارامترهای مقاومت برشی خاک نیز بررسی شده است. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود اضافه شدن نانوسیلیس و کائولن به تنهایی نیز موجب افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک شده است. مقایسه نتایج بدست آمده در این قسمت و نتایج مربوط به نمونه‌های حاوی الیاف سرامیکی نشان می‌دهد که اثر اضافه شدن کائولن و نانوسیلیس بیشتر از اثر اضافه شدن الیاف بر روی افزایش چسبندگی است. مقایسه نمونه‌های حاوی کائولن و نانوسیلیس نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی کائولن مقدار چسبندگی بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی نانوسیلیس دارند. همچنین تغییرات زاویه اصطکاک نیز این مورد را نشان می‌دهد و نمونه‌های حاوی کائولن مقدار زاویه اصطکاک بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی نانوسیلیس دارند. مقدار زاویه اصطکاک نمونه‌های حاوی نانوسیلیس به مراتب کمتر از زاویه اصطکاک نمونه‌های حاوی کائولن یا الیاف سرامیکی است.

در مرحله بعد پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های حاوی الیاف-های سرامیکی پوشش داده شده با نانوسیلیس یا کائولن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بخش در شکل (۴) ارائه شده است. همانطور که در این نتایج مشاهده می‌شود، پوشش دادن الیاف سرامیکی با نانوسیلیس موجب افزایش چسبندگی توده خاک شده است. در حالی که زاویه اصطکاک به دلیل اضافه شدن نانوسیلیس بر روی سطح الیاف کاهش یافته است. نتایج نمونه‌های حاوی الیاف سرامیکی پوشش داده شده با کائولن نیز نشان

نتیجه گرفت که اضافه شدن ۰/۱ درصد کائولن به خاک مورد نظر بهترین عملکرد را از نظر افزایش پارامترهای مقاومتی و از نظر اقتصادی دارد.



شکل ۵. اثرات مقدار نانوسیلیس بر روی (a) چسبندگی (b) زاویه اصطکاک نمونه‌های حاوی الیاف پوشش داده شده با نانوسیلیس



شکل ۶. اثرات مقدار کائولن بر روی (a) چسبندگی (b) زاویه اصطکاک نمونه‌های حاوی الیاف پوشش داده شده با کائولن

پوشش داده شده با نانو سیلیس یا کائولن تهیه شده است. عکس-های میکروسکوپی تهیه شده از نمونه‌های کائولن، نانوسیلیس و ماسه در شکل (۶) ارائه شده است. همانطور که در اینجا مشاهده می‌شود، ماسه مورد استفاده ریزدانه و تقریباً تیز گوشه است. عکس‌های میکروسکوپی تهیه شده از الیاف سرامیکی، الیاف سرامیکی پوشش داده شده با کائولن و الیاف سرامیکی پوشش داده شده با نانوسیلیس در شکل (۷) ارائه شده است. نتایج SEM نشان می‌دهد که ذرات کائولن در مقایسه با ذرات نانوسیلیس اندازه کوچکتر و تا حدود زبری بیشتری دارند. همچنین سطح الیاف سرامیکی بدون پوشش کاملاً صاف و بدون زبری است. درحالی‌که الیاف پوشش داده شده با ذرات نانوسیلیس یا کائولن تقریباً سطحی با زبری و خلل و فرج بیشتری دارد.

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال چهاردهم / شماره اول (۵۴) / پاییز ۱۴۰۱

#### ۴. عکس‌های میکروسکوپی

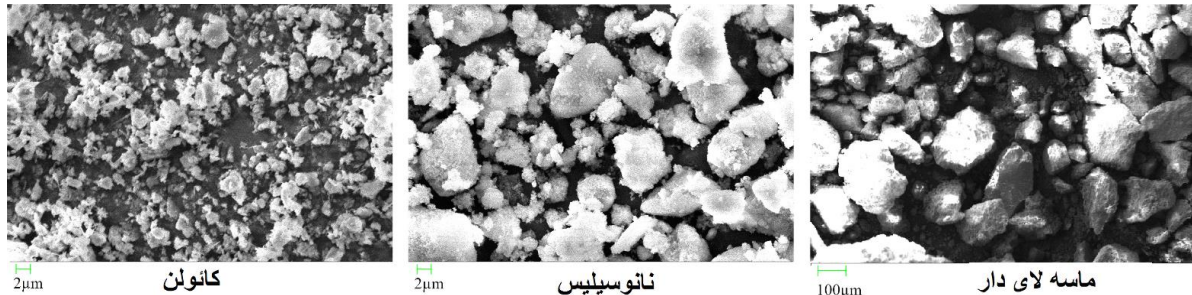
مطالعه‌های گذشته نشان می‌دهند که خصوصیات مواد اتصال دهنده، شرایط تنش اعمال شده، زبری سطح الیاف، تماس بین الیاف و ذرات خاک پارامترهای تاثیرگذاری بر ویژگی‌های میکرومکانیکی بین الیاف-خاک است (Al-Refeai and Al-Suhaibani 1998; Richaud et al. 2008; Plé and Lê 2012; Dhand et al. 2015; Eldesouky et al. 2016; Ma and Gao 2018). در این مطالعه، پس از انجام آزمایش برش مستقیم، تعدادی از نمونه‌ها با استفاده از عکس‌های میکروسکوپی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. عکس‌های میکروسکوپی از ذرات کائولن، ذرات نانوسیلیس، الیاف سرامیکی به تنهایی و همچنین از نمونه‌های حاوی الیاف سرامیک



## پارامترهای مقاومت برشی خاک مسلح شده با الیاف سرامیکی پوشش داده شده با نانوسیلیس و کائولن

ذرات نانوسیلیس دارد. همین امر موجب شده تا با افزایش میزان پوشش کائولن مقدار زاویه اصطکاک توده افزایش شود در حالیکه افزایش مقدار پوشش نانوسیلیس باعث کاهش اصطکاک توده شده است. افزایش زبری بیشتر بر روی سطح الیاف باعث افزایش درگیری بیشتر بین دانه‌های خاک و الیاف می‌شود و در نهایت مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد.

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، برخی از ذرات نانوسیلیس یا کائولن که به سطح الیاف سرامیکی چسبیده شده باعث درگیری بیشتر بین دانه‌های خاک و الیاف می‌شود و در نهایت اصطکاک توده را افزایش می‌دهد. عکس‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که سطح الیاف سرامیک با پوشش کائولن زبری بیشتری نسبت به سطح الیاف پوشش داده شده با



شکل ۷. عکس میکروسکوپی (a) کائولن (b) نانوسیلیس (c) خاک ماسه لای دار



شکل ۸. عکس میکروسکوپی (a) الیاف سرامیکی (b) الیاف سرامیکی پوشش داده شده با کائولن (c) الیاف پوشش داده شده با نانوسیلیس

مقاومت برشی نمونه‌های تقویت شده نداشته است. با توجه به نتایج آزمایش‌های برشی انجام شده بر روی نمونه‌های تقویت شده با الیاف، مقدار الیاف ۰/۵ درصد بعنوان مقدار بهینه الیاف شناخته شده است. نمونه‌های حاوی ذرات کائولن مقاومت برشی بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی ذرات نانوسیلیس برای یک مقدار ثابت افزودنی داشته است. در این مورد، مقدار ۰/۱ درصد کائولن بعنوان مقدار بهینه شناخته شده است. در نمونه‌های حاوی الیاف سرامیکی پوشش داده شده با نانوسیلیس و کائولن نیز مشاهده می‌شود که پوشش الیاف با کائولن اثر بیشتری بر روی افزایش پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها داشته است. در نمونه‌های حاوی الیاف پوشش داده شده با کائولن، افزایش مقدار کائولن باعث افزایش چسبندگی و تا حدودی زاویه اصطکاک

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه آزمایشگاهی، یک سری آزمایش برش مستقیم برای بررسی تأثیرات اضافه کردن الیاف سرامیکی، طول الیاف، مقدار نانوسیلیس، مقدار کائولن بر روی تغییرات پارامترهای مقاومت برشی انجام شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، موارد زیر قابل ذکر است:

هر دو مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک با افزودن الیاف سرامیکی، نانوسیلیس و یا کائولن به خاک طبیعی افزایش یافته است. بعبارت دیگر هر سه مواد مورد استفاده به تنهایی نیز موجب افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک شده است. از طرف دیگر، طول الیاف سرامیکی تأثیر مهمی بر پارامترهای

Pat.

- Calabi Floody M, Theng BKG, Reyes P, Mora ML (2009) Natural nanoclays: applications and future trends – a Chilean perspective. *Clay Miner* 44:161–176. doi: 10.1180/claymin.2009.044.2.161

- Changizi F, Haddad A (2017) Improving the geotechnical properties of soft clay with nano-silica particles. *Proc Inst Civ Eng Gr Improv* 170:62–71. doi: 10.1680/jgrim.15.00026

- Clauss B, Schawaller D (2006) Modern Aspects of Ceramic Fiber Development. *Adv Sci Technol* 50:1–8. doi: 10.4028/www.scientific.net/ast.50.1

- Cui H, Jin Z, Bao X, et al (2018) Effect of carbon fiber and nanosilica on shear properties of silty soil and the mechanisms. *Constr Build Mater* 189:286–295. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.181

- Dhand V, Mittal G, Rhee KY, et al (2015) A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. *Compos Part B Eng* 73:166–180. doi: 10.1016/j.compositesb.2014.12.011

- Du H, Pang SD (2020) High-performance concrete incorporating calcined kaolin clay and limestone as cement substitute. *Constr Build Mater* 264:. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120152

- Eldesouky HM, Morsy MM, Mansour MF (2016) Fiber-reinforced sand strength and dilation characteristics. *Ain Shams Eng. J.* 7:517–526

- Eshaghzadeh M, Bayat M, Ajalloeian R, Hejazi SM (2021) Mechanical behavior of silty sand reinforced with nanosilica-coated ceramic fibers. *J Adhes Sci Technol* 0:1–20. doi: 10.1080/01694243.2021.1898857

شده است. در حالیکه در نمونه‌های حاوی الیاف پوشش داده شده با نانوسیلیس، مقدار زاویه اصطکاک با افزایش مقدار نانوسیلیس کاهش یافته است. در نمونه‌های حاوی الیاف‌های پوشش داده شده نیز طول الیاف تاثیر کمی بر روی تغییرات پارامترهای مقاومت برشی داشته است.

## ۶. منابع

- Akbari HR, Sharafi H, Goodarzi AR (2021) Effect of polypropylene fiber inclusion in kaolin clay stabilized with lime and nano-zeolite considering temperatures of 20 and 40 °C. *Bull Eng Geol Environ* 80:1841–1855. doi: 10.1007/s10064-020-02028-x

- Al-Refeai T, Al-Suhaibani A (1998) Dynamic and static characterization of polypropylene fiber-reinforced dune sand. *Geosynth Int* 5:443–458. doi: 10.1680/gein.5.0132

- Alkoy S, Yanik H, Yapar B (2007) Fabrication of lead zirconate titanate ceramic fibers by gelation of sodium alginate. *Ceram Int* 33:389–394. doi: 10.1016/j.ceramint.2005.09.021

- Asgari MR, Baghebanzadeh Dezfouli A, Bayat M (2015) Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime. *Arab J Geosci* 8:1439–1452. doi: 10.1007/s12517-013-1173-1

- Baji A, Mai Y-W (2017) Engineering Ceramic Fiber Nanostructures Through Polymer-Mediated Electrospinning. Springer, Cham, pp 3–30.

- Boz A, Sezer A (2018) Influence of fiber type and content on freeze-thaw resistance of fiber reinforced lime stabilized clay. *Cold Reg Sci Technol* 151:359–366. doi: 10.1016/j.coldregions.2018.03.026

- Brabston, William N. and PGM (1992) Soil reinforcement with adhesive-coated fibers. US

- Civ Eng 1–17. doi: 10.1080/19648189.2020.1795726
- Liu J, Feng Q, Wang Y, et al (2017) The Effect of Polymer-Fiber Stabilization on the Unconfined Compressive Strength and Shear Strength of Sand. *Adv Mater Sci Eng* 2017;. doi: 10.1155/2017/2370763
- Lv X, Zhou H, Liu X, Song Y (2019) Experimental study on the effect of basalt fiber on the shear behavior of cemented sand. *Environ Earth Sci* 78:1–13. doi: 10.1007/s12665-019-8737-7
- Ma Q, Gao C (2018) Effect of Basalt Fiber on the Dynamic Mechanical Properties of Cement-Soil in SHPB Test. *J Mater Civ Eng* 30:04018185. doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002386
- Ma Y, Zhu B, Tan M (2005) Properties of ceramic fiber reinforced cement composites. *Cem Concr Res* 35:296–300. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.05.017
- Mirzababaei M, Arulrajah A, Haque A, et al (2018) Effect of fiber reinforcement on shear strength and void ratio of soft clay. *Geosynth Int* 25:471–480. doi: 10.1680/jgein.18.00023
- Plé O, Lê TNH (2012) Effect of polypropylene fiber-reinforcement on the mechanical behavior of silty clay. *Geotext Geomembranes* 32:111–116. doi: 10.1016/j.geotexmem.2011.11.004
- Richaud E, Farcas F, Divet L, Paul Benneton J (2008) Accelerated ageing of polypropylene geotextiles, the effect of temperature, oxygen pressure and aqueous media on fibers-Methodological aspects. *Geotext Geomembranes* 26:71–81. doi: 10.1016/j.geotexmem.2007.01.004
- Saadat M, Bayat M (2019) Prediction of the unconfined compressive strength of stabilised
- EsmailpourShirvani N, TaghaviGhalesari A, Khaleghnejad Tabari M, Janalizadeh Choobbasti A (2019) Improvement of the engineering behavior of sand-clay mixtures using kenaf fiber reinforcement. *Transp Geotech* 19:1–8. doi: 10.1016/j.trgeo.2019.01.004
- Faghieh Khorasani F, Kabir MZ (2020) The effectiveness of rubber short fibers reinforcing on mechanical characterization of clay adobe elements under static loading. *Eur J Environ Civ Eng*. doi: 10.1080/19648189.2020.1751302
- Gonçalves JP, Tavares LM, Toledo Filho RD, Fairbairn EMR (2009) Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick. *Constr Build Mater* 23:1971–1979. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.08.027
- Hamidi A, Hooresfand M (2013) Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand. *Geotext Geomembranes* 36:1–9. doi: 10.1016/j.geotexmem.2012.10.005
- Hejazi SM, Sheikhzadeh M, Abtahi SM, Zadhoush A (2012) A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Constr Build Mater* 30:100–116. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045
- Huang P, Lu G, Yan Q, Mao P (2019) Effect of ceramic and nylon fiber content on composite silica sol slurry properties and bending strength of investment casting shell. *Materials (Basel)* 12:. doi: 10.3390/ma12172788
- Iranpour B, haddad A (2016) The influence of nanomaterials on collapsible soil treatment. *Eng Geol* 205:40–53. doi: 10.1016/j.enggeo.2016.02.015
- Li L, Zang T, Xiao H, et al (2020) Experimental study of polypropylene fibre-reinforced clay soil mixed with municipal solid waste incineration bottom ash. *Eur J Environ*

doi: 10.1007/s10668-017-9982-0

- Siddique S, Shrivastava S, Chaudhary S (2019) Influence of ceramic waste on the fresh properties and compressive strength of concrete. *Eur J Environ Civ Eng* 23:212–225. doi: 10.1080/19648189.2016.1275985

- Su H, Xu J (2013) Dynamic compressive behavior of ceramic fiber reinforced concrete under impact load. *Constr Build Mater* 45:306–313. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.008

- Su H, Xu J, Ren W (2014) Mechanical properties of ceramic fiber-reinforced concrete under quasi-static and dynamic compression. *Mater Des* 57:426–434. doi: 10.1016/j.matdes.2013.12.061

- Tomar A, Sharma T, Singh S (2019) Strength properties and durability of clay soil treated with mixture of nano silica and Polypropylene fiber. *Mater Today Proc* 26:3449–3457. doi: 10.1016/j.matpr.2019.12.239

- Wan J, Wu S, Xiao Y, et al (2016) Characteristics of ceramic fiber modified asphalt mortar. *Materials (Basel)* 9:788. doi: 10.3390/ma9090788

- Wong LS, Hashim R, Ali F (2013) Improved strength and reduced permeability of stabilized peat: Focus on application of kaolin as a pozzolanic additive. *Constr Build Mater* 40:783–792. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.065

- Zidi Z, Ltifi M, Ayadi Z Ben, et al (2020) Effect of nano-ZnO on mechanical and thermal properties of geopolymer. *J Asian Ceram Soc* 8:1–9. doi: 10.1080/21870764.2019.1693682

soil by Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) and Non-Linear Regression (NLR). *Geomech Geoenviron*. doi: 10.1080/17486025.2019.1699668

- Sabir B, Wild S, Bai J (2001) Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review. *Cem Concr Compos* 23:441–454. doi: 10.1016/S0958-9465(00)00092-5

- Sadek S, Najjar SS, Freiha F (2010) Shear Strength of Fiber-Reinforced Sands. *J Geotech Geoenvironmental Eng* 136:490–499. doi: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000235

- Salehi M, Bayat M, Saadat M, Nasri M (2021) Experimental Study on Mechanical Properties of Cement-Stabilized Soil Blended with Crushed Stone Waste. *KSCE J Civ Eng* 25:1974–1984. doi: 10.1007/s12205-021-0953-5

- Sameni A, Pourafshary P, Ghanbarzadeh M, Ayatollahi S (2015) Effect of nanoparticles on clay swelling and migration. *Egypt J Pet* 24:429–437. doi: 10.1016/j.ejpe.2015.10.006

- Sarli JM, Hadadi F, Bagheri RA (2020) Stabilizing Geotechnical Properties of Loess Soil by Mixing Recycled Polyester Fiber and Nano-SiO<sub>2</sub>. *Geotech Geol Eng* 38:1151–1163. doi: 10.1007/s10706-019-01078-7

- Shafiq N, Nuruddin MF, Khan SU, Ayub T (2015) Calcined kaolin as cement replacing material and its use in high strength concrete. *Constr Build Mater* 81:313–323. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.050

- Sharma R (2018) Laboratory study on sustainable use of cement-fly ash-polypropylene fiber-stabilized dredged material. *Environ Dev Sustain* 20:2139–2159.

## پارامترهای مقاومت برشی خاک مسلح شده با الیاف سرامیکی پوشش داده شده با نانوسیلیس و کائولن

مهدی اسحاقزاده، دانشجوی دکتری عمران گرایش ژئوتکنیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد. زمینه پژوهشی ایشان بهسازی خاک و محیط زیست است که این مقاله قسمتی از رساله دکتری ایشان می‌باشد. در حال حاضر ایشان مدرس دروس تخصصی عمران و معماری در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد است.



میثم بیات، ایشان موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران-ژئوتکنیک در سال ۱۳۹۶ از دانشگاه تهران شدند. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان بهسازی خاک، ژئوتکنیک لرزه‌ای و خاک-های غیر اشباع است و در حال حاضر عضو هیئت علمی و استادیار گروه عمران در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد است.



رسول اجل لوئیان، ایشان موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی زمین‌شناسی در سال ۱۳۷۵ از نیوکاسل استرالیا شدند. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان زمین‌شناسی مهندسی، مکانیک سنگ و مکانیک خاک و مهندسی پی است و در حال حاضر عضو هیئت علمی و استاد تمام گروه زمین-شناسی دانشگاه اصفهان است.



سید مهدی حجازی، ایشان موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی نساجی در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه صنعتی اصفهان شدند. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان منسوجات فنی، ژئوسنتتیک‌ها و الیاف است و در حال حاضر عضو هیئت علمی با مرتبه دانشیاری در دانشگاه صنعتی اصفهان است.

