

ارزیابی آزمایشگاهی اثر الیاف پلی پروپیلن و نانوسیلیس بر مشخصات ژئوتکنیکی خاک رس

پیام عشقی^۱، عطا جعفری شالکوهی^{۲*}، حامد ترابی خداشهری^۳، آذین پورداد^۳

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۱ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۱۷

چکیده

بهسازی خاکهای مسئله دار به عنوان امری اجتناب ناپذیر نقش مهمی در پروژه های عمرانی دارد. اضافه نمودن برخی از افزودنی ها به خاک، به عنوان یکی از روشهای موثر در بهبود مشخصه های رفتاری خاک همواره مدنظر مهندسين ژئوتکنیک بوده است. در این پژوهش به بررسی اثر الیاف پلی پروپیلن و نانوسیلیس در ترکیب با خاک به عنوان یک روش نوین برای بهسازی پارامترهای مکانیکی خاک استفاده گردید. هدف از این تحقیق بررسی اثر افزودن نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن بر روی مشخصات خاک رس با پلاستیسیته کم در آزمایش تک محوری می باشد. سه ترکیب مختلف از نسبت های الیاف پلی پروپیلن (۰/۲۵٪ - ۰/۵٪ و ۱٪ وزن خاک خشک) و سه ترکیب از نانوسیلیس (۰/۷۵٪ - ۱٪ وزن خاک خشک) استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می دهد که افزودن ترکیب الیاف پلی پروپیلن و نانوسیلیس در خاک رس باعث افزایش مقاومت فشاری محصور نشده و همچنین افزایش مدول الاستیسیته می گردد که به ترتیب باعث افزایش ۴/۶۹ و ۴/۱۷ برابر نسبت به رس طبیعی شده است. همچنین با اضافه کردن نانوسیلیس شکست نمونه ها بیشتر از ترکیب خاک با الیاف است، اما با افزایش مقادیر الیاف، مکانیزم گسیختگی نمونه های اصلاح شده تغییر می کند در نتیجه با افزایش مقادیر الیاف، کرنش گسیختگی افزایش می یابد.

کلید واژه ها: تثبیت خاک، نانوسیلیس، الیاف پلی پروپیلن، مقاومت فشاری محصور نشده، مدول الاستیسیته.

۱- گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد بندرانزلی، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرانزلی، ایران jafary@iaubanz.ac.ir

۳- گروه مهندسی عمران، واحد بندرانزلی، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرانزلی، ایران

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

تثبیت خاک برای بهبود بخشیدن به خواص مهندسی خاک‌های نامرغوب در احداث سازه‌های مهندسی عمران مثل راه‌ها، فرودگاه‌ها، خاکریزها، سدها و پی‌های کم عمق، بکار می‌رود. نوع تثبیت انتخابی در هر پروژه بستگی به ماهیت سازه و خواص ژئوتکنیکی و فیزیکی - شیمیایی خاک‌های مورد نظر دارد. براساس پاسخ اجزاء متشکله خاک به تثبیت، دستورالعمل‌هایی برای تعیین مناسب بودن خاک جهت هر نوع تثبیت پیشنهاد شده است (Gharib et al., 2012). تثبیت با استفاده از افزودنی‌ها به عنوان یکی از روش‌های رایج برای بهسازی این خاک‌ها می‌باشد که از متداول‌ترین آن‌ها می‌توان به سیمان و آهک اشاره کرد که بطور سنتی در پروژه‌های مختلف بکار گرفته می‌شود. با این حال در سال‌های اخیر استفاده از افزودنی‌های نوین جهت دستیابی به عملکرد بهینه مورد استفاده قرار گرفته است. از سوی دیگر پیشرفت تکنولوژی مصالح جدیدی همچون نانوموادها را برای بهسازی خاک‌ها معرفی کرده است که می‌تواند بصورت تنها یا ترکیبی از افزودنی‌های سنتی بکار گرفته شود. در پژوهشی به بررسی تاثیر نانو اکسید منیزیم در مدول الاستیسیته خاک رس پرداخته شد و نتایج اینگونه حاصل شد که افزودن نانو مواد در این تحقیق با کلوخه‌ای کردن خاک رس به شدت در افزایش سختی و مدول الاستیسیته خاک تاثیرگذار خواهد بود همچنین نرخ افزایش مدول الاستیسیته در درصد‌های پایین به شدت برجسته است (Ahmadi et al., 2020). در تحقیقی دیگر به بررسی تثبیت خاک رس به کمک آهک و نانو کامپوزیت پرداخته شد که با بررسی نتایج حاصل شده اینگونه عنوان شد که با افزایش درصد وزنی آهک مقدار شاخص خمیری خاک در اثر واکنش‌های پوزولانی کاهش پیدا خواهد کرد و با افزایش نانو کامپوزیت تا ۴ درصد به دلیل پر شدن فضای خالی در خاک، مقاومت فشاری افزایش یافته و با عبور از این درصد استفاده شده از نانو ماده و فلوکوله شدن ذرات، روند مقاومتی کاهش خواهد یافت (کاوه و حیدری، ۱۳۹۸). در بررسی نتایج پژوهش اثر تثبیت خاک رس ماسه‌دار به کمک

متاکائولن نشان می‌دهد که افزایش درصد متاکائولن موجب افزایش حد روانی و خمیری خاک مورد مطالعه بوده است بطوریکه میزان رشد حد خمیری کمتر از حد روانی بوده است و شاخص خمیری روند افزایشی داشته است. با افزایش درصد متاکائولن و زمان عمل آوری، مقاومت فشاری تک محوری افزایش داشته است. بیشترین میزان مقاومت به ازای ۲۵ درصد متاکائولن با دوره نگهداری ۲۸ روزه می‌باشد. همچنین بررسی سطوح گسیختگی و نحوه شکست نمونه‌های مورد ارزیابی نشان می‌دهد که با افزایش متاکائولن، شکست نمونه‌ها پس از رسیدن به مقاومت نهایی سریع‌تر خواهد بود (رجبی و همراهی، ۱۳۹۸). اصلاح پارامترهای رفتاری خاک‌های مختلف یکی از مسائل مهم در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. اضافه نمودن برخی مواد شیمیایی و مسلح کننده به خاک می‌تواند به عنوان یکی از روش‌های موثر در بهبود برخی مشخصه‌های رفتاری خاک نظیر تنش، کرنش و مقاومت بویژه در بعضی از سازه‌ها نظیر خاکریزهای جاده، سدهای خاکی، شیروانی‌های مصنوعی و مراکز دفن زباله همواره مد نظر قرار گیرد. در مطالعات سایر پژوهشگران ترکیب افزودنی‌های مختلفی نظیر سیمان، آهک، کلسیم کلرید و پلیمر مورد بررسی قرار گرفته است (Meng, 2003). در تحقیقی به بررسی اثر الیاف پلی استر بازیافتی تولید شده از بطری‌های پلی اتیلن، در ترکیب با نانوسیلیس به عنوان یک تثبیت کننده جدید برای بهبود خواص مکانیکی خاک‌ها پرداخته شد. مقاومت برشی و مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های اصلاح شده به ترتیب از آزمایش برش مستقیم و مقاومت فشاری محصورنشده تعیین گردید. نتایج این مطالعه نشان داد که افزودن الیاف پلی استر استفاده شده و نانوسیلیس باعث افزایش مقاومت برشی و فشاری نمونه‌های خاک می‌شود. همچنین افزایش نانوسیلیس منجر به کاهش فشار خرابی الیاف پلی استر بازیافتی شده و سبب افزایش کرنش شکست می‌شود. براساس نتایج آزمایش، افزودن الیاف پلی استر بازیافتی باعث بهبود خاصیت مکانیکی خاک‌های تثبیت شده با نانوسیلیس

یابد. این کاهش برای خاک رسی با پتانسیل تورمی بالاتر، مهم است. به دلیل قابلیت فشردگی بالا لاستیک تایر ضایعاتی، شاخص های فشردگی و پیش فشردگی به طور قابل ملاحظه- ای با محتوای الیاف لاستیک تایر ضایعاتی و سیمان، افزایش می یابد. منحنی های تنش- کرنش مربوط به آزمون UCS نشان داد افزایش مقاومت فشاری و رفتار انعطاف پذیری، در میزان ۲ درصد از الیاف لاستیک رخ می دهد (Bekhiti et al., 2019). استفاده از الیاف در خاک ریزدانه باعث افزایش استحکام و مقاومت خاک می شود (Dean and Fretting, 1986). در تحقیقی بر روی خاک چسبنده ی مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن دیده شد که مقاومت برشی خاک تا درصد بهینه الیاف افزایش می یابد و بیش از آن مقدار آنگاه کاهش می یابد. همچنین الیاف باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک می شود اما چسبندگی خاک تغییر چشمگیری نمی کند (Anagnostopoulos et al., 2013). محققان دیگر نیز نشان دادند که مقاومت برشی خاک چسبنده مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن، با افزایش الیاف تا ۰/۴ درصد افزایش می یابد و فراتر از آن کاهش می یابد (Mali and Singh, 2014). در این مطالعه ابتدا برای بدست آوردن پارامترهای اولیه خاک آزمایشات مقدماتی مطابق با استانداردهای ASTM برای خاک مورد مطالعه صورت گرفته است و سپس با استفاده از الیاف مصنوعی پلی پروپیلن و نانوسیلیس بصورت جداگانه و ترکیبی آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده جهت تعیین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته (E_{50}) انجام پذیرفت. همچنین جهت بررسی حد روانی و دامنه خمیری از آزمایش حدود اتبرگ و جهت بررسی تغییرات وزن مخصوص خشک بیشینه و رطوبت بهینه از آزمایش تراکم استاندارد استفاده شده است. قابل ذکر است در این پژوهش با توجه به اهمیت بهسازی خاک های مسئله دار در مهندسی ژئوتکنیک از نانوسیلیس به عنوان یک ماده نوین و الیاف پلی پروپیلن جهت تثبیت و تسلیح خاک رس استفاده گردیده است.

می شود و همچنین منجر به افزایش مدول الاستیک خاک خواهد شد (Changizi and Haddad., 2015). در پژوهش دیگری به بررسی تاثیر لاستیک های فرسوده در تقویت خاک رسی و ماسه ای پرداختند. بدین منظور، تمامی مخلوط ها تحت آزمون های فشار، برش مستقیم، مقاومت فشاری تک محوری، نسبت باربری کالیفرنیا قرار گرفتند. ضایعات لاستیک باعث بهبود پارامترهای مقاومتی و انعطاف پذیری خاک ماسه ای شد هر چند در خاک رسی، با وجود کاهش در مقاومت فشاری و نسبت باربری کالیفرنیا، انعطاف پذیری و مقاومت کششی افزایش یافته اند. در نتیجه، بجای سوزاندن یا دفن کردن این ضایعات، آنها می توانند بخوبی برای افزایش و بهبود خواص مکانیکی گونه های مختلف خاک مورد استفاده قرار بگیرند (Abbaspour et al., 2019). در پژوهشی دیگر به بررسی اثر الیاف شیشه در ترکیب با نانو-رس برای بهبود خواص مهندسی خاک رسی با حد روانی پایین پرداخته شد که نتایج این مطالعه نشان داد الیاف شیشه و نانو-رس می توانند در بهبود خواص مکانیکی رس، بسیار موثر واقع شوند. افزودن ذرات نانو به رس، به طور منفی بر روی کرنش شکست اثر می گذارد، اما افزایش محتوای الیاف شیشه با افزایش کرنش شکست ارتباط دارد. همچنین استفاده از ترکیب الیاف و ذرات نانو بر روی مقاومت رس بهبود بسزایی را نسبت به استفاده تکی از الیاف نمایان ساخت. همچنین معلوم شد که افزایش قابل ملاحظه مقاومت برشی تا حد ۸۴٪، بسته به نرخ استفاده شده از نانو-رس و الیاف شیشه برای بهبود خاک، قابل دستیابی می باشد. بعلاوه، نتایج آزمایش نشان داد که استفاده از ترکیب الیاف شیشه و نانو-رس می تواند مقاومت فشاری خاک را افزایش دهد (Changizi and Haddad, 2017). در بررسی تاثیر لاستیک های ضایعاتی بر روی خاک رس بتونیت تثبیت شده با سیمان، نتایج نشان می دهد که حد روانی، وزن مخصوص خشک، پتانسیل تورم به تدریج با افزایش الیاف لاستیک تایر و سیمان، کاهش می -

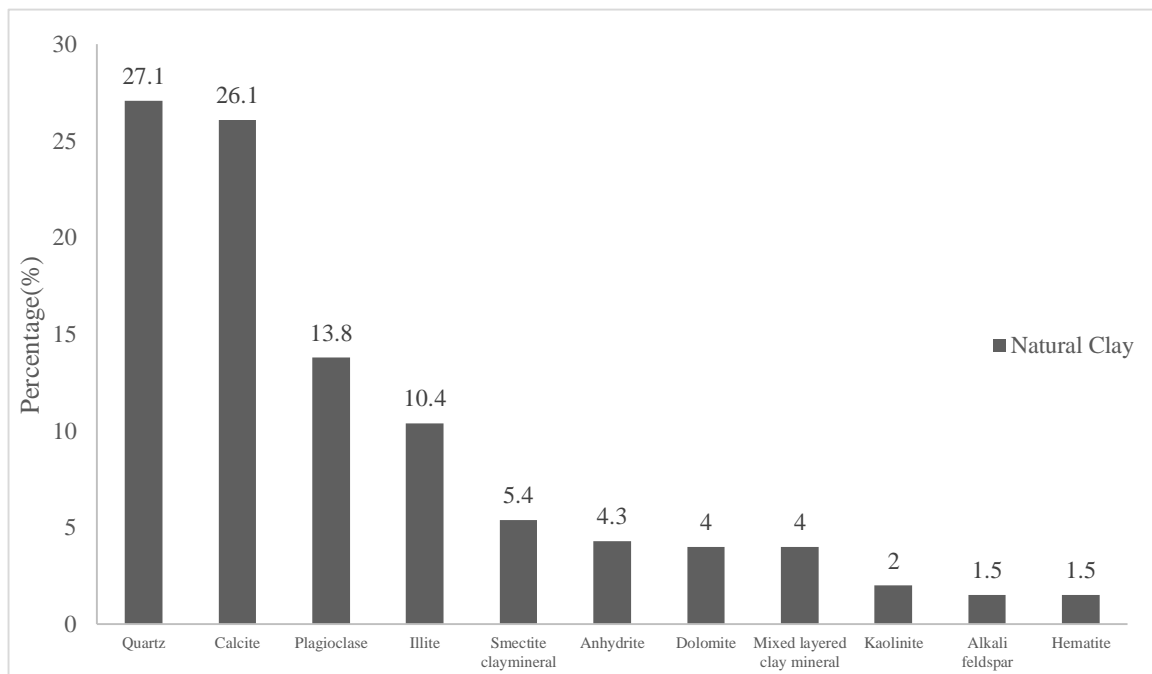
۳. مواد و روش‌ها

۱.۲. مواد و مصالح

۱.۱.۲. مشخصات خاک

خاک رس مورد مطالعه از شهر رشت واقع در شمال ایران تهیه شده است و جدول (۱) مشخصات فیزیکی رس مورد پژوهش را نشان می‌دهد و طبقه بندی خاک مطابق با

استاندارد ASTM D-2487 صورت پذیرفت. علاوه بر این جهت تعیین مشخصات شیمیایی و تعیین کانی‌های تشکیل دهنده خاک رس مورد مطالعه به ترتیب از روش آنالیز عنصری بنام X-Ray Fluorescence (XRF) و پراش پرتو ایکس X-Ray Diffraction (XRD) استفاده شد که نتایج آن به ترتیب در جدول (۲) و شکل (۱) آورده شده است.



شکل ۱. نمودار XRD مربوط به خاک رس مورد مطالعه

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک رس مورد پژوهش

Description	standard	Value
Soil Classification	ASTM D-2487	CL
Liquid Limit, %	ASTM D-4318	41.62
Plastic Limit, %	ASTM D-4318	19.94
Plasticity Index, %	-	21.68
Specific Gravity of Solids, G_s	ASTM D-854	2.7
Maximum Unit Weight, kN/m^3	ASTM D-698	17.8
Optimum Moisture Content, %	ASTM D-698	16.29
Grain size analysis:		
Gravel	ASTM D-421	0
Sand		15
Clay and Silt		85

جدول ۲. مشخصات شیمیایی (XRF) خاک رس مورد پژوهش

Chemical composition	Weight (%)
SiO ₂	39.2
CaO	16.5
Al ₂ O ₃	10.4
Fe ₂ O ₃	6.8
MgO	4.3
K ₂ O	2.6
TiO ₂	0.7
Na ₂ O	0.4
SO ₃	0.34
MnO ₂	0.14
SrO	0.12
Cl	<0.01
P ₂ O ₅	<0.01
La&Lu	<0.01
L.O.I (900 °C)	18.5

۲.۱.۲. مشخصات الیاف

در این پژوهش از الیاف مصنوعی پلی پروپیلن با خصوصیات فیزیکی مطابق با شکل (۲) و جدول (۳)، استفاده شده است.

همچنین قابل ذکر است محدوده انتخاب شده برای درصد های وزنی الیاف پلی پروپیلن با مقاله احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2020) مطابقت دارد.



شکل ۲. الیاف پلی پروپیلن تهیه شده از کارخانه با طول تقریبی ۱۲ میلیمتر

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده

Property	Value
Specific Weight (gr/cm ³)	0.91
Length (mm)	~12
Color	White

۲.۱.۳. مشخصات نانو

در این پژوهش از نانوسیلیس با درصد خلوص ۹۹/۹۹ سفید رنگ بعنوان یک ماده نوین جهت بهسازی و تثبیت خاک رس استفاده شده است که مشخصات شیمیایی، فیزیکی و شکل ظاهری آن به ترتیب مطابق جداول (۴)، (۵) و شکل (۳)

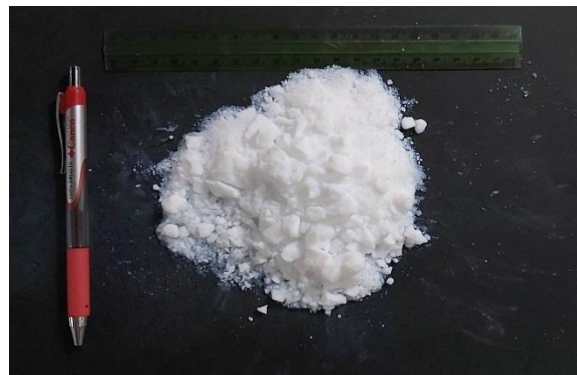
می باشد. همچنین قابل ذکر است محدوده درصد های انتخاب شده برای نانوسیلیس در این تحقیق با مقاله چنگیزی و حداد (Changizi and Haddad, 2015) مطابقت دارد.

جدول ۴. مشخصات شیمیایی نانوسیلیس مورد استفاده در این پژوهش

Material	Content(%)
SiO ₂	99.7
Ti	0.012
Ca	0.007
Na	0.005
Fe	0.002

جدول ۵. مشخصات فیزیکی نانوسیلیس مورد استفاده در این پژوهش

Properties	Unit	Value
Purity	-	99.99
Specific surface area	(m ² /g)	200
Average particle size	(nm)	12
Bulk density	(g/cm ³)	0.1
Real density	(g/cm ³)	2.4
Color	-	White



شکل ۳. نانوسیلیس استفاده شده در این پژوهش

۲.۲. روش آزمایش

۲.۲.۱. برنامه آزمایشگاهی

علاوه بر این جهت بررسی میزان شاخص خمیری، وزن مخصوص خشک بیشینه و درصد رطوبت بهینه به ترتیب از آزمایش‌های حدود اتربرگ ASTM D-4318 و تراکم استاندارد ASTM D-698 استفاده شده است. در جدول (۶) برنامه آزمایشگاهی این پژوهش آورده شده است.

۲.۲.۲. آماده سازی نمونه

به منظور تهیه نمونه‌ها، ابتدا خاک رس خشک کاملاً خرد شده و از الک شماره ۴۰ عبور داده می‌شود. سپس نانوسیلیس، در درصد‌های وزنی از پیش تعیین شده طی پنج مرحله در خاک پخش و توسط میکسر مکانیکی به مدت ۳۰ دقیقه مخلوط شد به منظور جلوگیری از گلوله شدن الیاف، الیاف پلی‌پروپیلن در ده مرحله به مخلوط اضافه شد و به مدت ۱۰ دقیقه با خاک مخلوط گردید. همچنین به منظور ایجاد شرایط تراکم بهینه

به منظور ارزیابی اثر نانوسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن بر روی نمونه‌ها جهت تعیین مقاومت فشاری و تعیین مدول الاستیسیته مخلوط مذکور از آزمون مقاومت فشاری محصور نشده مطابق با استاندارد ASTM D-2166 استفاده شده است. آزمون‌های آزمایشگاهی با معیارهای مختلف از الیاف پلی‌پروپیلن (۰/۲۵، ۰/۵، ۱ درصد نسبت به وزن خاک) و نانوسیلیس (۰/۵، ۰/۷۵، ۱ درصد نسبت به وزن خاک)، صورت پذیرفت. در آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده برای هر نمونه سه آزمایش انجام گرفت که میانگین آن‌ها به عنوان نتیجه درج گردید.

برای هر درصد افزودنی، مقدار درصد رطوبت بهینه‌ی نمونه‌ها از آزمایش تراکم استاندارد تعیین گردید و متعاقباً نمونه‌ها در درصدهای رطوبت بهینه ساخته شدند. سرانجام افزودن آب به نمونه‌ها نیز طی پنج مرحله انجام شد و نمونه‌ها به وسیله‌ی میکسر مکانیکی به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط شدند (Ahmadi et al, 2020).

جدول ۶. برنامه آزمایشگاهی در این پژوهش

	unconfined compression test	Atterberg Limit test (LL , PL)	Standard Proctor Test
COF0N	1	1	1
COF0.5N	1	1	1
COF0.75N	1	1	1
COF1N	1	1	1
CO.25F0N	1	1	1
CO.5F0N	1	1	1
C1F0N	1	1	1
CO.25F0.5N	1	0	0
CO.25F0.75N	1	0	0
CO.25F1N	1	0	0
CO.5F0.5N	1	0	0
CO.5F0.75N	1	0	0
CO.5F1N	1	0	0
C1F0.5N	1	0	0
C1F0.75N	1	0	0
C15F1N	1	0	0
Sum of tests	16	7	7

عایق نگهداری شده و سپس مورد آزمایش قرار گرفتند. بنابراین با استفاده از مجموع ۱۶ نمونه، تغییرات مقاومت چسبندگی زهکشی نشده، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته (E50) در سه حالت افزودن نانوسیلیس، افزودن الیاف پلی پروپیلن و افزودن ترکیب آن‌ها بررسی گردیده است.

۳.۱. آزمایش حدود اتبربرگ

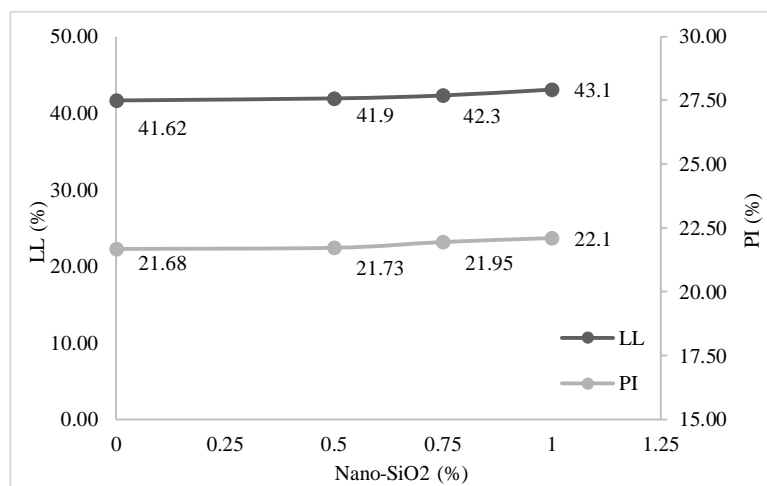
۳.۱.۱. اثر نانوسیلیس بر حدود اتبربرگ خاک

نتایج و تغییرات حد روانی و دامنه خمیری مربوط به ترکیب خاک رس با نانوسیلیس در شکل (۴) نشان داده است. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود با افزودن نانو به میزان ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد وزنی به خاک رس، حد روانی و دامنه خمیری خاک افزایش داشته است و همچنین قابل ذکر است بیشترین میزان حد روانی و دامنه خمیری در ترکیب خاک رس با ۱ درصد نانوسیلیس رخ داده است که نسبت به خاک پایه به ترتیب حدود ۳/۵۶ و ۱/۹۴ درصد رشد داشته است.

۳. تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

در این پژوهش پس از انجام آزمایش حدود اتبربرگ و تراکم پروکتور استاندارد، آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده بر روی چهار نوع نمونه از رس طبیعی، رس شامل الیاف پلی پروپیلن، رس شامل نانوسیلیس و رس شامل ترکیب نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن انجام پذیرفت.

در ابتدا آزمایش تعیین حد روانی و خمیری تحت شرایط ثابت و مطابق با استاندارد ASTM D-4318 و آزمایش تراکم پروکتور استاندارد تحت شرایط ثابت مطابق با استاندارد ASTM D-698 بر روی مخلوط خاک رس با درصدهای مختلف نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن به صورت مجزا جهت تعیین حد روانی، دامنه خمیری، وزن مخصوص خشک بیشینه و رطوبت بهینه انجام پذیرفت. علاوه بر این از آزمون مقاومت فشاری محصور نشده تحت شرایط ثابت و مطابق با استاندارد ASTM D-2166 استفاده شده است. نمونه‌ها در آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده دارای ۳۸ میلیمتر قطر و ۷۶ میلیمتر ارتفاع می‌باشند. کلیه نمونه‌ها ۲۸ روز در محیط

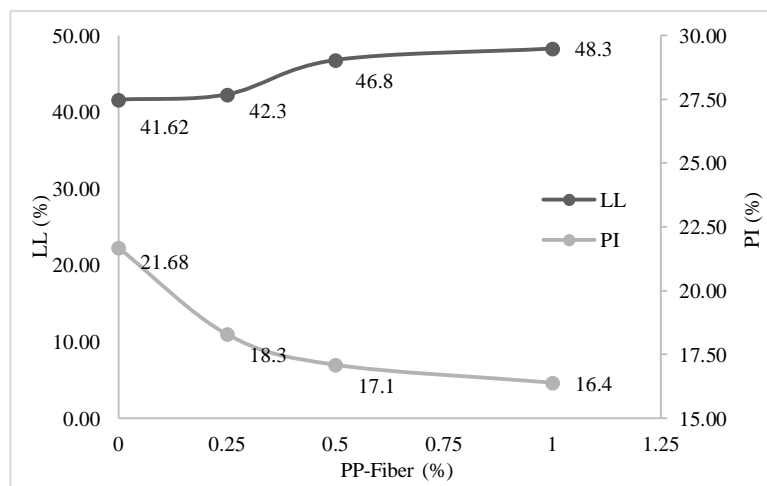


شکل ۴. تاثیر نانوسیلیس بر حد روانی و دامنه خمیری خاک رس مورد مطالعه

۳.۱.۲. اثر الیاف پلی پروپیلن بر حدود اتزبرگ خاک

نتایج و تغییرات حد روانی و دامنه خمیری مربوط به ترکیب رس با الیاف پلی پروپیلن در شکل (۵) نشان داده است. همانطور که مشاهده می شود با افزودن الیاف پلی پروپیلن به میزان ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی به خاک رس، حد روانی افزایش و دامنه خمیری خاک کاهش می یابند. علت افزایش حد روانی در درصدهای مختلف الیاف پلی پروپیلن را

می توان جذب آب بیشتر با افزودن الیاف پلی پروپیلن به خاک و کاهش دامنه خمیری را در محدودیت فشردگی خاک به علت افزودن الیاف پلی پروپیلن دانست. قابل ذکر است بیشترین میزان حد روانی و دامنه خمیری در ترکیب خاک رس با ۱ درصد الیاف پلی پروپیلن رخ داده است که نسبت به رس طبیعی بترتیب حدود ۱۶/۰۵ درصد افزایش و ۲۴/۳۵ درصد کاهش داشته است.



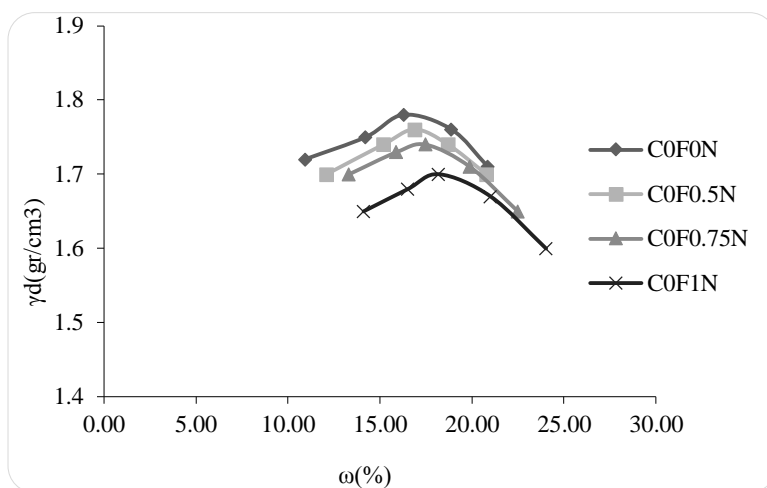
شکل ۵. تاثیر الیاف مصنوعی پلی پروپیلن بر حد روانی و دامنه خمیری خاک رس مورد مطالعه

۲.۳. آزمایش تراکم استاندارد

۱.۲.۳. اثر نانوسیلیس بر پارامترهای تراکم خاک

نتایج آزمایش تراکم استاندارد برای ترکیب خاک رس با نانوسیلیس در شکل (۶) نشان داده شده است. همانطور که

نتایج نشان می‌دهد با افزایش میزان نانوسیلیس رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص خشک ماکزیمم کاهش می‌یابد که میزان آن به ترتیب ۴/۹۴ درصد کاهش و ۱۱/۷۲ درصد افزایش می‌باشد.

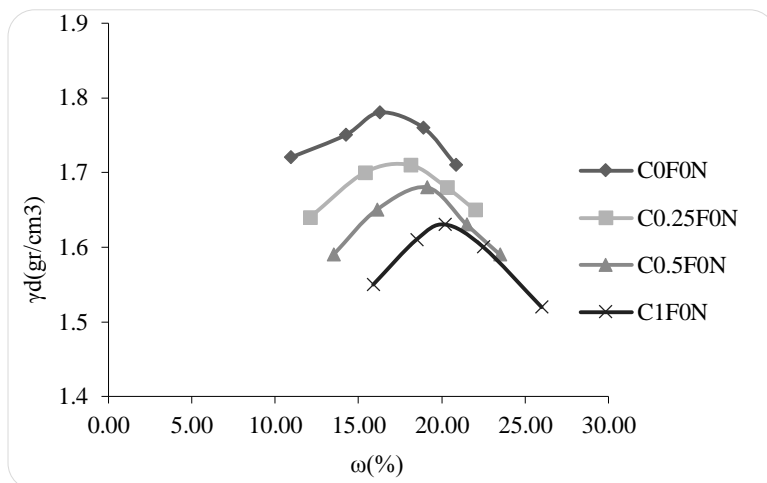


شکل ۶. تاثیر نانوسیلیس بر پارامترهای تراکم خاک رس مورد مطالعه

۲.۲.۳. اثر الیاف پلی پروپیلن بر پارامترهای تراکم خاک

نتایج آزمایش تراکم استاندارد برای ترکیب خاک رس با الیاف پلی پروپیلن در شکل (۷) نشان داده شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد با افزایش میزان الیاف رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص خشک ماکزیمم کاهش می‌یابد که

میزان آن به ترتیب ۸/۴۳ درصد کاهش و ۲۴ درصد افزایش می‌باشد. قابل ذکر است علت افزایش رطوبت بهینه میزان جذب آب بیشتر الیاف و کاهش وزن مخصوص به علت سبکتر بودن الیاف نسبت به خاک طبیعی می‌باشد.

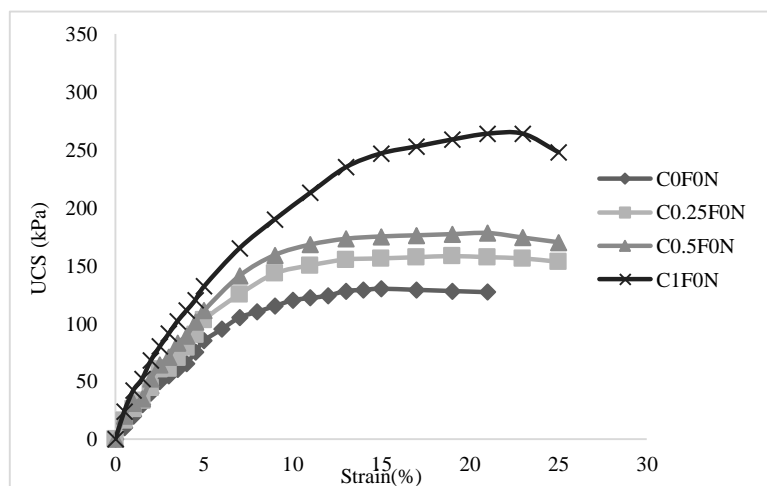


شکل ۷. تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر پارامترهای تراکم خاک رس مورد مطالعه

۳.۳. آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

۳.۳.۱. اثر الیاف پلی پروپیلن بر مقاومت فشاری خاک رس
 نتایج آزمایش فشاری محصور نشده خاک رس مسلح با درصد‌های مختلف الیاف پلی پروپیلن در شکل (۸) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری محصور نشده در درصد‌های وزنی الیاف پلی پروپیلن ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ به

ترتیب حدود ۱/۲۲، ۱/۳۷ و ۲/۰۳ برابر نسبت به خاک رس طبیعی می‌باشد. همچنین قابل ذکر است الیاف پلی پروپیلن به دلیل مقاومت کششی بالا باعث پیوند قوی بین ذرات خاک می‌شود و با افزایش درصد وزنی الیاف پلی پروپیلن میزان کرنش محوری افزایش یافته و شکل پذیری خاک افزایش یافته است.

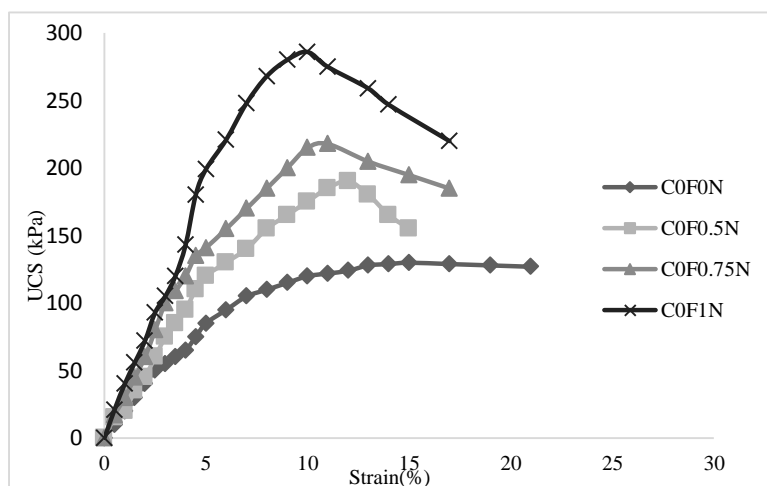


شکل ۸. منحنی تنش-کرنش خاک رس مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن در آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

۳.۳.۲. اثر نانوسیلیس بر مقاومت فشاری خاک رس

شکل (۹) منحنی‌های تنش-کرنش به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (UCS) بر روی خاک رس تثبیت شده با درصد‌های مختلف نانوسیلیس را نشان می‌دهد. منحنی‌های مقاومتی در این شکل نشان می‌دهند که با افزودن درصد‌های نانوسیلیس به ازای ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ درصد، ماکزیمم مقاومت فشاری محصور نشده خاک تثبیت شده به ترتیب حدود ۱/۴۶، ۱/۶۸ و ۲/۲ برابر افزایش می‌یابند، از تمایل منحنی‌ها این طور به نظر می‌رسد که در میان درصد‌های وزنی مختلف نانوسیلیس، با افزایش بیشتر از مقادیر آزمایش شده نیز، سطح مقاومت فشاری محصور نشده افزایش می‌یابد که

در تحقیق گارسیا و همکاران (Garcia et al, 2017) نیز این افزایش دیده می‌شود. همچنین می‌توان دید که افزایش در مقاومت فشاری محصور نشده رس‌های تثبیت شده با نانوسیلیس، در سطح پایین‌تر از کرنش خاک رس اتفاق می‌افتد، در حقیقت جذب آب توسط نانوسیلیس و افزایش درصد وزنی آن باعث افزایش سفتی و خاصیت شکنندگی در رس تثبیت شده می‌باشد. به طور کلی، ذرات نانوسیلیس نیروی قفل و بست بین ذرات خاک را افزایش داده و سبب افزایش مقاومت UCS خاک و سخت تر شدن آن می‌شود که در نهایت این امر موجب افزایش مدول الاستیسیته خاک می‌گردد.

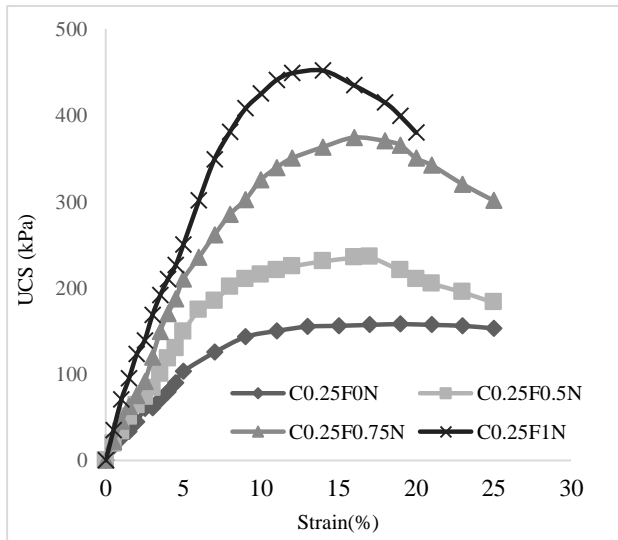


شکل ۹. منحنی تنش-کرنش خاک رس تثبیت شده با نانوسیلیس در آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

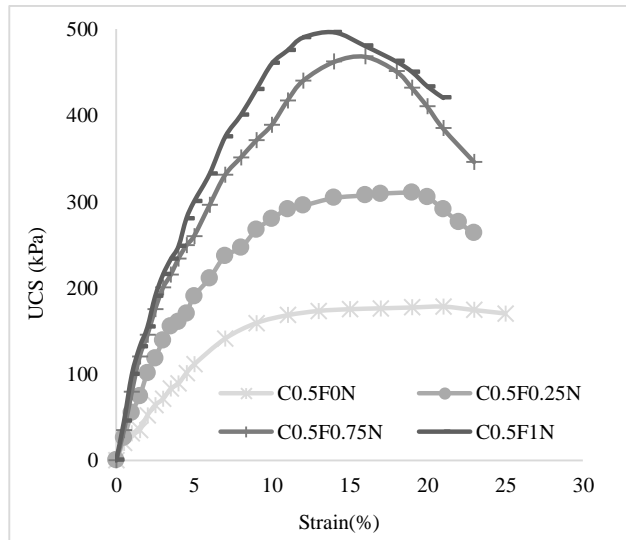
درصدهای الیاف پلی پروپیلن و نانوسیلیس، مقاومت UCS خاک بیشتر افزایش می یابد. در ترکیب ۱٪ الیاف پلی پروپیلن و ۱٪ نانوسیلیس در خاک رس، مقاومت فشاری محصور نشده نمونه مذکور حدود ۴/۶۹ برابر خاک رس طبیعی، ۲/۳۱ برابر رس مسلح شده با ۱٪ الیاف پلی پروپیلن، ۲/۲۰ برابر رس تثبیت شده با ۱٪ نانوسیلیس افزایش می یابد. همچنین در تمامی نمونه های حاوی الیاف پلی پروپیلن با افزایش درصد نانوسیلیس، کرنش شکست نمونه ها کاهش می یابد و خاک چگال تر و سخت تر می شود. در واقع در این نمونه های ترکیبی، الیاف پلی پروپیلن باعث افزایش کرنش گسیختگی و نانوسیلیس با ایجاد ژل چسبناک بین الیاف و دانه های خاک باعث افزایش انسجام بین ذرات می شود.

۳.۳.۳. اثر نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن بر مقاومت فشاری خاک رس

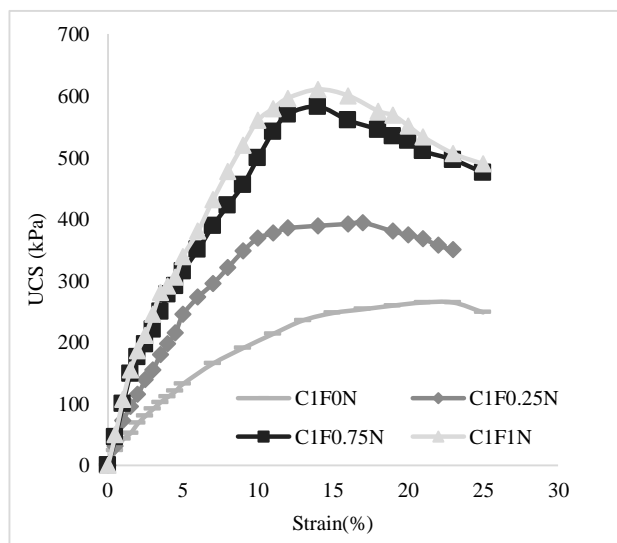
شکل (۱۰) و جدول (۷) مقادیر UCS خاک اصلاح شده با درصدهای مختلف ترکیب الیاف پلی پروپیلن و نانوسیلیس را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که با ثابت نگه داشتن درصد الیاف پلی پروپیلن و افزایش درصدهای مختلف نانوسیلیس آنگاه مقدار پیک مقاومت فشاری محصور نشده خاک افزایش می یابد که علت این امر را می توان اینگونه توجیه کرد که ذرات نانوسیلیس با جذب آب و ایجاد ژل چسبناک بر سطح رشته های الیاف و دانه های خاک باعث افزایش اصطکاک بین آنها شده و در نتیجه مقاومت فشاری محصور نشده و سفتی خاک را افزایش می دهد. همچنین دیده می شود که با افزایش



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۰. منحنی تنش-کرنش خاک-نانو در درصدهای وزنی (الف) ۰/۲۵٪ الیاف (ب) ۰/۵٪ الیاف (ج) ۱٪ الیاف

که در آن E_{50} مدول الاستیسیته، $\Delta\sigma$ تغییرات تنش محوری تا دستیابی به ۵۰ درصد مقاومت نهایی و $\Delta\varepsilon$ تغییرات کرنش معادل آن است. تغییرات تنش-کرنش نمونه ها و مدول الاستیسیته به ترتیب در شکل (۱۱-الف) و (۱۱-ب) نشان داده شده است که با افزودن میزان ۱ درصد وزنی الیاف پلی پروپیلن و ۱ درصد وزنی نانوسیلیس نسبت به خاک رس طبیعی حدود ۴/۱۷ برابر مدول الاستیسیته رشد داشته است که در جدول (۷) مقادیر به صورت کامل آورده شده است.

۳.۳. ۴. اثر نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن بر مدول

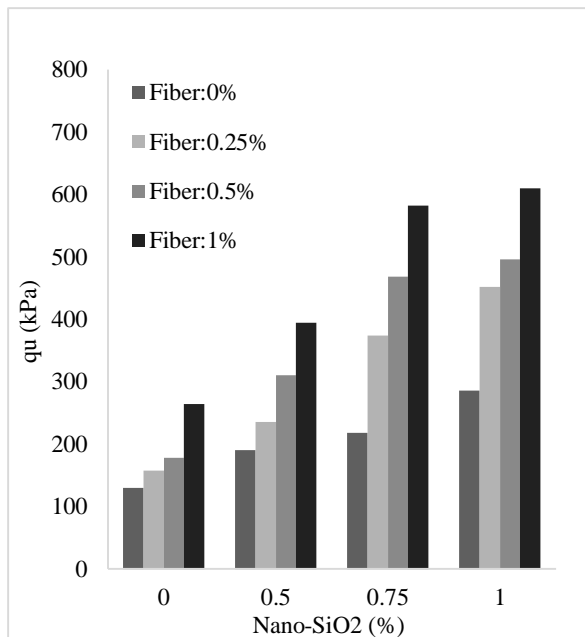
الاستیسیته (E_{50})

مدول الاستیسیته نمونه‌های اصلاح شده با مقادیر متفاوت نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن حاصل از آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده در شکل (۱۱-ب) ارائه شده است. به منظور بررسی تاثیر مواد افزودنی در سختی مصالح داریم:

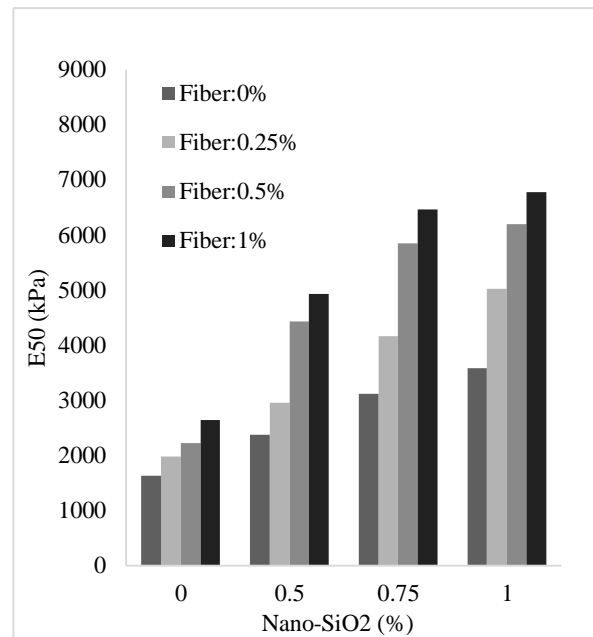
$$E_{50} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (۱)$$

جدول ۷. اثر افزودنی‌ها بر نتایج مقاومت فشاری محصور نشده خاک رس

NO	Name of specimens	Nano-SiO ₂ (%)	PP Fiber(%)	UCS test result		
				q_u (kPa)	c_u (kPa)	E_{50} (kPa)
1	C0F0N	0	0	130	65	1625
2	C0F0.5N	0.5	0	190	145	2375
3	C0F0.75N	0.75	0	218	109	3114
4	C0F1N	1	0	286	143	3575
5	C0.25F0N	0	0.25	158	79	1975
6	C0.5F0N	0	0.5	178	89	2225
7	C1F0N	0	1	264	132	2640
8	C0.25F0.5N	0.5	0.25	236	118	2950
9	C0.25F0.75N	0.75	0.25	374	187	4158
10	C0.25F1N	1	0.25	452	226	5022
11	C0.5F0.5N	0.5	0.5	310	155	4429
12	C0.5F0.75N	0.75	0.5	468	234	5850
13	C0.5F1N	1	0.5	496	248	6200
14	C1F0.5N	0.5	1	394	197	4925
15	C1F0.75N	0.75	1	582	291	6467
16	C1F1N	1	1	610	305	6778



(الف)



(ب)

شکل ۱۱. تغییرات (الف) مقاومت فشاری محصور نشده (ب) مدول الاستیسیته (E_{50})

۴. نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به بررسی تاثیر الیاف پلی پروپیلن و نانوسیلیس بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک رس پرداخته شد و نتایج به شرح زیر استخراج گردید:

- نتایج آزمایش تراکم استاندارد نشان داد که با افزایش درصد وزنی الیاف پلی پروپیلن و نانوسیلیس در خاک رس، آنگاه درصد رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص خشک بیشینه کاهش می یابد. افزایش درصد رطوبت بهینه می تواند به دلیل افزایش جذب رطوبت توسط الیاف و نانو باشد و کاهش وزن مخصوص بیشینه به دلیل جایگزینی الیاف با دانه های خاک و کمتر بودن وزن مخصوص الیاف نسبت به خاک باشد.

- با توجه به آزمایش حدود اتربرگ، با افزایش درصد الیاف پلی پروپیلن به علت جذب آب بیشتر توسط الیاف آنگاه حد روانی خاک ۱۶٪ افزایش و به علت محدودیت فشردگی خاک، شاخص خمیری خاک حدود ۲۴٪ کاهش می یابد. اما با افزایش درصد وزنی نانوسیلیس در خاک رس، هردو پارامتر حد روانی و شاخص خمیری افزایش می یابند.

همچنین در این مطالعه با ساخت نمونه هایی با درصد های مختلف الیاف پلی پروپیلن، نانوسیلیس و ترکیب آن ها به بررسی مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته نمونه ها پرداخته شد که از جمله نتایج آن می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- افزودن الیاف پلی پروپیلن به خاک سبب شکل پذیری بیشتر خاک و افزایش مقاومت فشاری آن می شود که این روند باعث افزایش کرنش گسیختگی در خاک می گردد.

- افزایش نانوسیلیس در خاک علاوه بر افزایش مقاومت فشاری باعث افزایش سختی در نمونه می شود.

- افزودن نانوسیلیس باعث شکست بیشتر نمونه ها نسبت به ترکیب خاک با الیاف پلی پروپیلن می گردد اما با افزایش مقادیر الیاف پلی پروپیلن، مکانیزم گسیختگی نمونه های اصلاح شده تغییر می کند در نتیجه با افزایش مقادیر الیاف پلی پروپیلن، کرنش گسیختگی افزایش می یابد.

- ترکیب ۱ درصد وزنی الیاف پلی پروپیلن و نانوسیلیس با خاک رس طبیعی باعث افزایش مقاومت فشاری تک محوری و همچنین افزایش مدول الاستیسیته می گردد که به ترتیب باعث رشد ۴/۶۹ و ۴/۱۷ برابر نسبت به رس طبیعی شده است.

در این پژوهش از تثبیت و تسلیح خاک رس با نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن استفاده گردید که باعث افزایش مقاومت فشاری محصور نشده و مدول الاستیسیته نمونه های اصلاح شده گردید که یک روش کاربردی برای بهسازی خاک جهت استفاده در فونداسیون و بستر راه ها می باشد. همچنین قابل ذکر است این روش از بهسازی خاک را می توان یک روش عملی و اجرایی در پروژه های مهندسی عمران در نظر گرفت.

منابع

- ترابی کاوه، م.، حیدری، ع.، ۱۳۹۸، ارزیابی ویژگی‌های مهندسی خاک‌های ماری تثبیت شده توسط آهک و نانوکامپوزیت (مطالعه موردی: خاک ماری منطقه سنقر)، فصلنامه علمی - پژوهشی انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، دوره ۱۲، شماره ۲.
- رجبی، ع.، همراهی، ز.، ۱۳۹۸، ارزیابی مقاومت تراکم تک محوری و حدود اتزبرگ خاک رس ماسه‌دار تثبیت شده با متاکائولن، فصلنامه علمی - پژوهشی انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، دوره ۱۲، شماره ۱.
- Abbaspour, A., Aflaki, E., Moghadas Nejad, F., 2018. Reuse of waste tire textile fibers as soil reinforcement. *Journal of Cleaner Production* 207: 1059-1071.
- Ahmadi, H., Janati, S., Jamshidi Chenari, R. 2020. Strength parameters of stabilized clay using polypropylene fibers and Nano-MgO: An experimental study. *Geotechnical and Geological Engineering*: 1-14.
- Anagnostopoulos, A., Tzetzis, D., Berketis, K., 2014. Shear strength behavior of polypropylene fibre reinforced cohesive soils, *Journal of Geomechanics and Geoengineering* 9.3 : 241-251.
- ASTM D2487, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) (ASTM International, West Conshohocken, 2017).
- ASTM D421, Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants (ASTM International, West Conshohocken, 2007).
- ASTM D4318, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils (ASTM International, West Conshohocken, 2005).
- ASTM D698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (ASTM International, West Conshohocken, 2000).
- ASTM D2166/D2166M, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil (ASTM International, West Conshohocken, 2013).
- ASTM D854, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer (ASTM International, West Conshohocken, 2014).
- Bekhiti, M., Trouzine, H., 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.
- Changizi, F., Haddad, A., 2015. Strength properties of soft clay treated with mixture of Nano-SiO₂ and recycled polyester fiber. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 7.4: 367-378.
- Changizi, F., Haddad, A., 2017. Effect of nanocomposite on the strength parameters of soil. *KSCE Journal of Civil Engineering* 21.3: 676-686.
- Dean, R. and Fretting, F., 1986. Soil Randomly Reinforced with Fibers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 112.8: 823-826.
- Dermatas, D., Meng, X.G., 2003. Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils. *Engineering Geology* 70.3-4: 377-394.
- Garcia, S., Trejo, P., Ramirez, O., Lopez-Molina, J., Hernandez, N., 2017. Influence of Nanosilica on compressive strength of Lacustrine soft clays, *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul. (pp. 17-21).
- Gharib, M., Saba, H., Barazesh, A., 2012. Experimental investigation of impact of adding lime on atterberg limits in golestan province soils. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences* 3.4: 796-800
- Mali, Sh., Singh, B. 2014. Strength behavior of cohesive soils reinforced with fibers. *International Journal of civil engineering research* 5.4: 353-360.