

ارزیابی آزمایشگاهی تاثیرات دما و نانو مگنتیت بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک رسی (مورد مطالعاتی: خاک رس رشت)

پیام عشقی^۱، محمد آزادی^{۲*}، هادی احمدی^۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۰۹

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۳

چکیده

در مهندسی ژئوتکنیک استفاده از مواد افزودنی جهت بهسازی خاک‌ها بسیار حایز اهمیت است. هدف از این پژوهش، بررسی تاثیرات دما و نانو مگنتیت بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک رسی می‌باشد. درصدهای انتخاب شده برای نانو مگنتیت بصورت ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد در شرایط عمل آوری استاندارد (۱، ۲۸ و ۹۰ روزه) و تحت دماهای مختلف (۳ روزه در دماهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد) می‌باشد که در ادامه جهت ارزیابی مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها از آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت فشاری محصور نشده، برش مستقیم و سرعت عبور امواج فراصوت استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با افزودن ۱ درصد نانو مگنتیت به خاک رسی در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد حدود ۱۵۵ درصد مقاومت فشاری تک محوری خاک رسی افزایش یافته و در ادامه با توجه به انجام آزمایش برش مستقیم مشاهده می‌شود پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب ۱۱۵ و ۷۷ درصد نیز افزایش داشته است. همچنین سرعت عبور امواج فراصوت نیز در اثر افزودن ۱ درصد نانو مگنتیت بیشترین مقدار را داشته که می‌تواند موید و مصداق نتایج حاصل برای آزمایش‌های مکانیکی باشد.

کلید واژه‌ها: نانو مگنتیت، خاک رسی، خصوصیات فیزیکی، خصوصیات مکانیکی، دما.

۱- گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران Payam.eshghi@iau.ir

۲- گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران Azadi.mhmm@gmail.com

۳- گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، رشت، ایران HadiAhmadi@guilan.ac.ir

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

وجود خاک با کیفیت نامناسب در محل پروژه‌ها می‌تواند پیامدهای منفی برای سازه‌ها به همراه داشته و خسارت‌های زیادی را از نقطه نظر فنی و اقتصادی به پروژه تحمیل نماید. در مواجهه با شرایط نامطلوب برای خاک‌ها، راهکارهایی شامل تغییر محل ساخت و ساز، طراحی مجدد سازه براساس شرایط موجود، برداشت خاک ضعیف و جایگزینی آن با خاک مناسب جهت بهبود خواص مهندسی خاک پیشنهاد می‌گردد. تثبیت با استفاده از افزودنی‌ها به عنوان یکی از روش‌های رایج برای بهسازی خاک‌ها می‌باشد که از متداول‌ترین آن‌ها می‌توان به سیمان و آهک اشاره کرد که بطور سنتی در پروژه‌های مختلف بکار گرفته می‌شود. مواد افزودنی شیمیایی همانند سیمان، آهک و قیر که رفتار شیمیایی خاک را تغییر می‌دهند، پرمصرف‌ترین مواد برای تثبیت خاک‌ها هستند (Laborel-Préneron et al, 2016; Changizi and Haddad, 2017). هدف از تثبیت و بهسازی خاک‌ها افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست و تغییر شکل است. روش‌های تثبیت و بهسازی خاک را می‌توان به طور کلی به سه روش مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی تقسیم بندی نمود. برای بهسازی خاک‌ها، از مواد ضایعاتی، الیاف، آهک، سیمان و افزودنی‌های مختلف جهت بهبود پارامترهای مقاومتی خاک‌ها استفاده شده است (Eshghi and Jafary, 2022; Changizi and Haddad, 2017). در ادامه و با پیشرفت تکنولوژی، نانومواد نیز می‌توانند به عنوان مواد افزودنی جدید مورد استفاده قرار گیرند و هدف اصلی به کارگیری آن‌ها در مهندسی ژئوتکنیک، بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها با استفاده از افزودن این مواد است. نانوذرات به دلیل سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و شرکت در واکنش‌های شیمیایی به طور قابل توجهی بر خواص مهندسی خاک تأثیر می‌گذارند، حتی زمانی که فقط مقدار کمی از آن‌ها در خاک اضافه شود (Majeed and Taha, 2013; Liu et al, 2023; Krishnan et al, 2019). نانومواد به دلیل سطح ویژه بالا عملاً موجب ایجاد ظرفیت تبادل کاتیونی بیشتری می‌گردد. به عبارت دیگر،

رفتار سطحی ماده بر رفتار توده‌ای آن غلبه میکند. بنابراین، نانومواد بسیار فعال با سایر ذرات تمایل به واکنش دارند که می‌توانند با افزودن مقادیر بسیار اندک بر مشخصات فیزیکی، شیمیایی و مهندسی خاک‌ها تأثیر گذار باشند. در همین راستا می‌توان گفت تغییر رفتار خاک در مقیاس نانو با دو عامل افزایش سطح ویژه و غالب بودن اثرات کوانتومی قابل ملاحظه می‌باشد (Lamb and Whitman, 2008). در پژوهشی به بررسی تأثیر نانوسیلیس و میکروسیلیس بر روی خاک رس پرداخته شد که نتایج حاصل از آن نشان داد افزودن ماده نانو سبب بهبود بیشتر مقاومت نمونه‌ها و همچنین پر شدن منافذ خاک گردیده است (Ahmadi and Shafiee, 2020). همچنین در تحقیقی دیگر به بررسی تجربی اثر نانو مواد بر روی ماسه ریز سیمانی پرداخته شد که نتایج آن نشان داد افزودن نانومواد با توجه به سطح ویژه بالا سبب پیوستگی بیشتر نمونه‌ها و همچنین سبب اصطکاک بیشتر بین ذرات شده و به دنبال آن باعث افزایش مقاومت گردیده است (Ahmadi, 2021). در تحقیقی دیگر بررسی تأثیر ترکیب الیاف بازیافتی پلی‌پروپیلن و نانوسیلیس در خاک رسی مطالعه گردید که نتایج نشان داد افزودن الیاف پلی‌پروپیلن و نانوسیلیس سبب بهبود وضعیت مقاومت فشاری تک‌محوری و همچنین افزایش مدول الاستیسیته (E_{50}) در نمونه‌ها می‌گردد (Eshghi et al., 2022). در تحقیقی دیگر اثر نانو اکسید آهن بر خواص مکانیکی ترکیبات سیمان مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج آن نشان داد مقاومت فشاری با افزودن تا ۳ درصد افزودنی افزایش یافته و این در حالی است که اضافه کردن تا ۵ درصد نانو اکسید آهن باعث کاهش مقاومت می‌شود. همچنین در تحقیقی دیگر به بررسی خصوصیات اساسی خاک مخلوط با نانوذرات و تأثیرات آن‌ها بر خاک پرداخته شده است (Yazdi et al., 2022). همچنین در پژوهشی دیگر به بررسی مشخصات مکانیکی خاک رس تثبیت شده با نانوکربنات کلسیم و الیاف موکت ضایعاتی پرداخته شد که نتایج نشان داد ترکیب این دو ماده در خاک چسبندگی زهکشی نشده را تا دو برابر افزایش می‌دهد و میزان افزودن الیاف موکت بیش از ۰/۲ درصد

نظر معدنی که با فراوانی زیاد محسوب می‌شود در صورت ارائه نتایج مثبت بر روی خاک مورد مطالعه نسبت به سایر نانومواد می‌تواند مقرون به صرفه و همچنین سازگار با محیط زیست باشد. بر این اساس، این پژوهش با تأکید بر زمان عمل آوری و اثر پارامتر دما بر عمل آوری نمونه‌ها، تأثیر نانو مگنتیت را بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک رسی و همچنین تأثیر بر سرعت عبور امواج فراصوت مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. مواد

۲.۱.۱. خاک مورد استفاده

خاک مورد استفاده در این پژوهش از نوع رس و طبقه بندی آن بصورت CL بوده و از شهر رشت واقع در شمال ایران تهیه گردیده و تصویر مربوط به آن در شکل (۱) و همچنین مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جداول (۱) و (۲) آورده شده است.



شکل ۱. خاک مورد استفاده در این پژوهش

گرچه تاثیر چندانی در مقاومت بیشینه ندارد اما باعث افزایش مقاومت پسماند می‌گردد (Janalizadeh Choobbasti et al., 2019). در ادامه بحث ترکیب نانوذرات با خاک‌ها می‌توان گفت که هر یک بر بخش‌های مختلفی از خصوصیات خاک تاثیر می‌گذارند و به عوامل مختلفی از جمله بافت و ساختمان خاک بستگی دارد (Bartos, 2009). همچنین در پژوهشی دیگر به بررسی تاثیر نانو اکسید آهن بر مشخصات تحکیمی و مقاومتی خاک رسی پرداخته شد که نتایج نشان داد افزودن این نانو به میزان ۲ درصد به خاک تاثیر مثبت بر پارامترهای تحکیمی و مقاومتی نمونه‌ها داشته است و با بررسی ریز ساختار می‌توان گفت ذرات نانو اکسید آهن باعث قرار گیری در بین صفحات رسی شده و عملاً باعث بوجود آمدن ترکیبی با تراکم و انسجام بهتر می‌شود (Rajabi et al., 2021). در یک جمع بندی کلی می‌توان گفت بسیاری از مطالعات بر روی تأثیر افزودن برخی نانوذرات اکسید فلزی به بتن متمرکز شده‌اند که می‌تواند هم نفوذپذیری بتن به یون‌ها را کاهش دهد و هم مقاومت فشاری را افزایش دهد و در نتیجه دوام را بهبود بخشد. در رشته مهندسی ژئوتکنیک، اکثر مطالعات تاکنون با نانوسیلیس (Ghasabkolaei et al, 2016; Cui et al, 2018; Khalid et al, 2019; Gu et al, 2022) و نانو رس (Kalhor et al, 2019; Gu et al, 2022) بوده و به عبارتی دیگر مطالعات کمتری بر روی نانومواد دیگر انجام شده است. در پژوهش حاضر اثر نانو اکسید آهن بر برخی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رسی مورد بررسی قرار گرفته است. انتخاب نانو اکسید آهن به عنوان ماده‌ای نوین که تحقیقات اندکی در خصوص بحث‌های مقاومتی خاک علی‌الخصوص نانو مگنتیت انجام شده و همچنین به دلیل سازگاری با محیط زیست با ویژگی‌های فیلری و کاتالیستی و همچنین توزیع قابل قبول این ماده از

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک رس

Description	Standard	Value
Soil Classification	ASTM D-2487	CL
PH	-	7.2
Liquid Limit,%		38
Plastic Limit,%	ASTM D-4318	19
Plasticity Index,%		19
Specific Gravity of Solids, G _s	ASTM D-854	2.75
Maximum Dry Unit Weight, kN/m ³		17.2
Optimum Moisture Content, %	ASTM D-698	15
Grain size analysis:		
Gravel		0
Sand	ASTM D-421	25
Clay and Silt		75

جدول ۲. مشخصات شیمیایی (XRF) خاک رس

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. نانو مگنتیت

نانو اکسید آهن مورد استفاده در این پژوهش از نوع نانو مگنتیت با فرمول شیمیایی Fe₃O₄ بوده و همچنین جهت توزیع بهتر ذرات نانو در این پژوهش بصورت محلول با غلظت ۳۰۰ گرم بر لیتر استفاده گردیده است. تصویر نانو

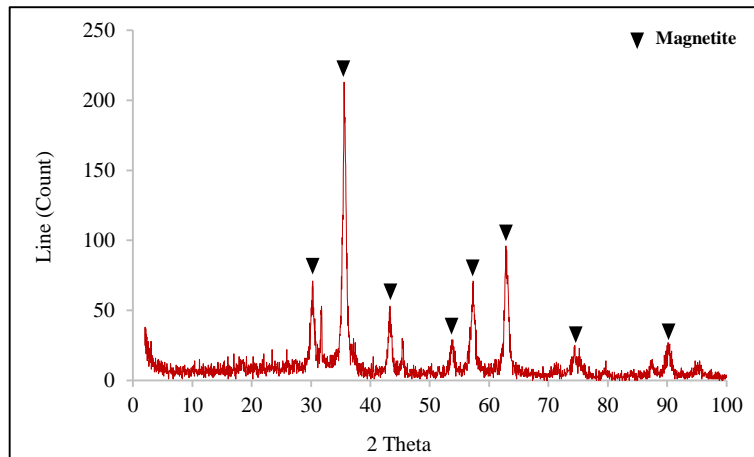
مگنتیت در شکل (۲)، مشخصات فیزیکی آن نیز در جدول (۳) و همچنین نمودار حاصل از آزمایش آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) در شکل (۳) آورده شده است.



شکل ۲. نانو مگنتیت مورد استفاده در این پژوهش

جدول ۳. مشخصات فیزیکی نانو مگنتیت

Properties	Chemical formula	Molar Mass (g/mol)	Crystal structure	Color	Form
Value	Fe ₃ O ₄	233.54	buckyball	Black	Powder



شکل ۳. تصویر مربوط به نتیجه XRD نانو مگنتیت مورد استفاده در این پژوهش

۲.۲. روش‌ها

۲.۲.۱. برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش نامگذاری نمونه‌ها بصورت CxN بیان شده است که C بیان کننده خاک رسی، x مشخص کننده درصد نانو مگنتیت و N نشان دهنده نانو مگنتیت می‌باشد. همچنین معرفی شرایط عمل آوری در دماهای مختلف نیز بصورت Ty می‌باشد که T بیان کننده درجه حرارت و y نشان دهنده دمای مورد نظر می‌باشد. در ادامه برای بررسی اثر نانو مگنتیت بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک رسی مقادیر درصدها بصورت ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد انتخاب شده است. در ادامه جهت بررسی حد روانی، حد پلاستیک و متعاقب آن شاخص پلاستیسیته برای نمونه خاک رسی و همچنین نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف نانو مگنتیت بر اساس استاندارد ASTM D-4318 و جهت بررسی مقادیر وزن مخصوص خشک ماکزیمم و رطوبت بهینه برای نمونه خاک رسی و نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف نانو مگنتیت بر اساس استاندارد ASTM D-698 استفاده شده است. همچنین در

ادامه جهت بررسی اثر نانو مگنتیت بر مقاومت فشاری محصور نشده و پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها به ترتیب از آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده مطابق با استاندارد ASTM D-2166 و آزمایش برش مستقیم مطابق با استاندارد ASTM D-3080 استفاده شده است. در ادامه از آزمایش غیر مخرب سرعت عبور امواج فراصوت جهت بررسی سرعت عبور امواج و بررسی تراکم نمونه‌ها استفاده شده است. در آزمایش سرعت عبور امواج فراصوت، فرکانس پالس ۵۴ هرتز و زمان ارسال پالس با دقت ۰/۱ میکروثانیه اندازه‌گیری شده است. با داشتن طول انتقال موج (طول نمونه) و زمان های انتقال اندازه گیری شده، سرعت پالس اولتراسونیک در نمونه با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده است.

$$V = \frac{L}{t} \quad (1)$$

آوری در شرایط استاندارد و همچنین شرایط دمایی مختلف صورت پذیرفته است.

۳. تجزیه و تحلیل نتایج

۳.۱. اثر نانو مگنتیت بر حدود اتربرگ نمونه‌ها

جهت بررسی اثر نانو مگنتیت بر حدود اتربرگ نمونه خاک رسی و نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف نانو مگنتیت از آزمایش تعیین حدود اتربرگ طبق استاندارد ASTM D-4318 استفاده شده است که نتایج حاصل از آن در شکل (۴) آورده شده است. مطابق با شکل (۴-الف)، با افزایش درصد‌های نانو مگنتیت، حد روانی روند کاهشی داشته که در درصد‌های مختلف ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ نانو مگنتیت، به ترتیب حدود ۲/۸، ۷/۶، ۸/۲ و ۸/۳ درصد نسبت به خاک رسی کاهش داشته است. در ادامه حد پلاستیک نمونه‌ها همواره بصورت صعودی می‌باشد که برای درصد‌های مختلف ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ نانو مگنتیت، به ترتیب ۲/۵، ۶/۳، ۶/۵ و ۶/۸ درصد نسبت به خاک رسی افزایش داشته است. در ادامه با توجه به شکل (۴-ب) مشاهده می‌گردد شاخص پلاستیسیته نمونه‌ها با افزودن مقادیر مختلف نانو مگنتیت روند کاهشی داشته بطوریکه برای ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد نانو مگنتیت به ترتیب حدود ۸/۱، ۲۱/۵، ۲۲/۹ و ۲۳/۵ درصد کاهش نسبت به خاک رسی رخ داده است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که تغییرات حاصل شده در شاخص پلاستیسیته نمونه‌ها به عوامل و پارامترهای مختلفی از جمله دانه بندی خاک مورد مطالعه، وقوع واکنش‌های شیمیایی و نوع کانی تشکیل دهنده خاک مورد استفاده بستگی دارد.

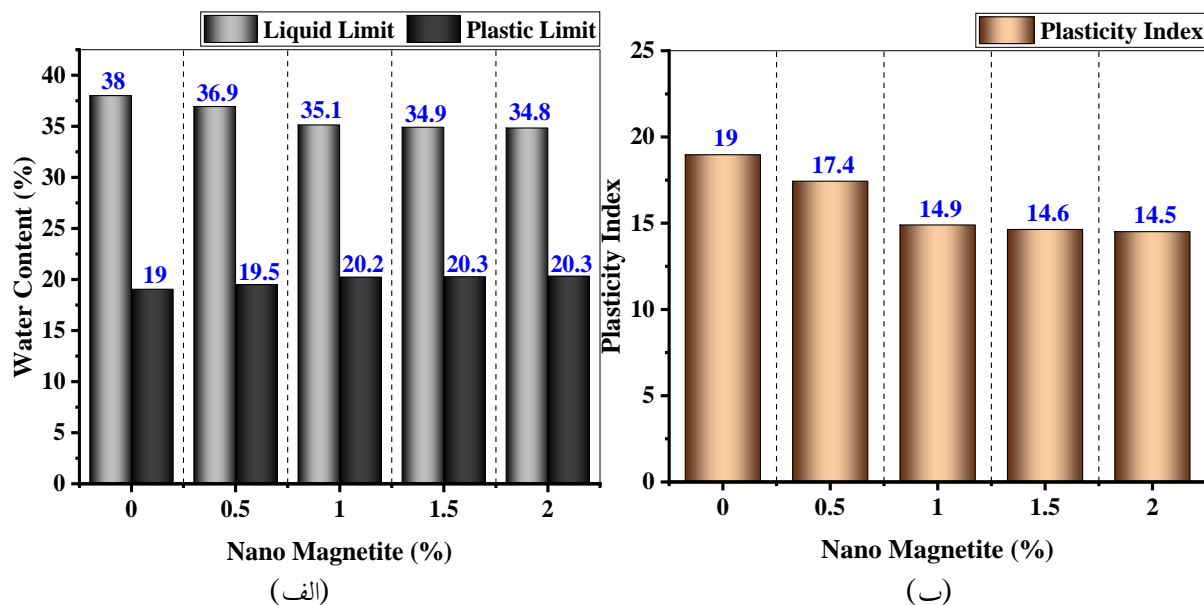
که در آن L طول مسیر ارسال پالس، t زمان ارسال پالس و V سرعت امواج فراصوت در نمونه است. همچنین لازم به ذکر است مقادیر حاصل از آزمایش‌ها با سه بار تکرار انجام شده و مقادیر میانگین آن‌ها گزارش شده است. ذکر این نکته ضروری است که شرایط نگهداری نمونه‌ها به دو روش انجام شده که بصورت ذیل می‌باشد.

۱- نگهداری در پلاستیک به منظور حفظ رطوبت به مدت زمان ۱، ۷ و ۲۸ روز در دمای استاندارد آزمایشگاه.

۲- نگهداری در مخزن آب به مدت ۳ روز در دماهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد در دو پلاستیک به منظور عدم نفوذ آب.

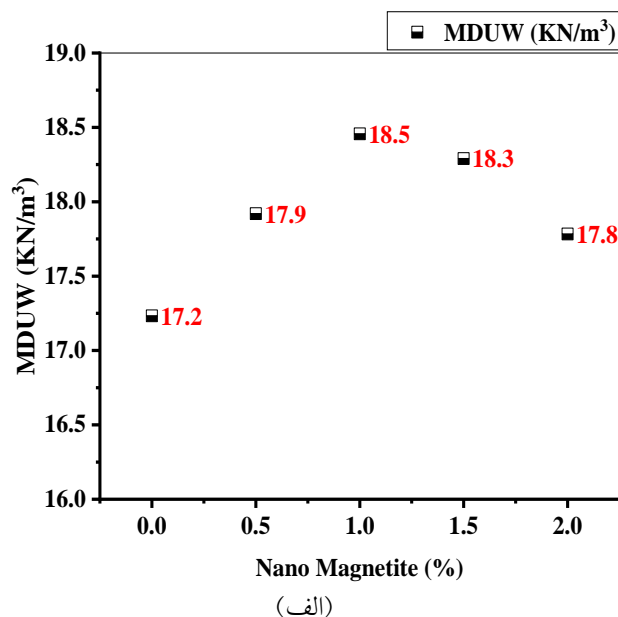
۲.۲.۲. آماده سازی نمونه

آماده سازی نمونه‌ها یکی از بخش‌های مهم در آزمایشگاه محسوب می‌شود. در این پژوهش نمونه‌ها در قالب فلزی جهت رسیدن به وزن مخصوص خشک ماکزیمم متراکم گردید. نانو مگنتیت مورد استفاده نیز بصورت محلول با غلظت ۳۰۰ گرم بر لیتر مورد استفاده قرار گرفت و میزان رطوبت بهینه برای ساخت نمونه‌ها نیز بر اساس نتایج آزمایش تراکم استاندارد اعمال گردیده است. در ادامه به منظور ایجاد اتصال مناسب بین لایه‌ها، سطح نمونه پس از تراکم هر لایه خراشیده شد. همچنین لازم به ذکر است که سطح داخلی قالب با روغن پوشانده شده است تا نمونه بدون هیچگونه تغییر شکل به راحتی از قالب بیرون آورده شود. سرانجام، پس از برداشتن نمونه‌ها از قالب فلزی با چندین لایه سلفون پوشانده شدند تا از تغییر رطوبت جلوگیری شود و عمل



شکل ۴. مقادیر حاصل از آزمایش حدود اتربرگ (الف) حد روانی و خمیری (ب) شاخص پلاستیسیته

افزودن ۲ درصد نانو مگنتیت میزان رطوبت بهینه از ۱۵ درصد به ۱۶/۵ درصد افزایش یافته است.

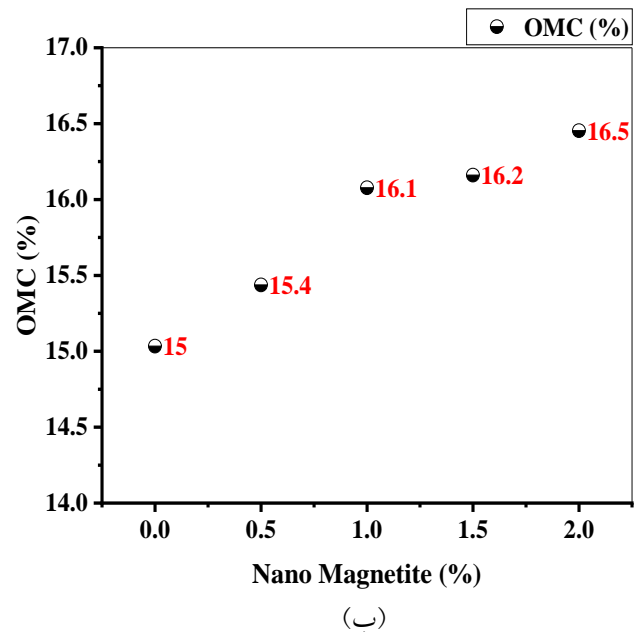


۳.۲. اثر نانو مگنتیت بر مشخصات تراکم نمونه‌ها

جهت بررسی اثر نانو مگنتیت بر روی مشخصات تراکمی نمونه خاک رسی و نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف نانو مگنتیت از آزمایش تراکم استاندارد پروکتور مطابق با استاندارد ASTM D-698 استفاده شده است که نتایج حاصل از آن در شکل (۵) آورده شده است. شکل (۵-الف) حداکثر وزن مخصوص خشک برای نمونه‌های حاوی درصد‌های متفاوت نانو مگنتیت را نمایش می‌دهد. حداکثر وزن مخصوص خشک نسبت به خاک رسی تا افزودن ۱ درصد نانو مگنتیت روند افزایشی و سپس روند کاهشی داشته بطوریکه در اثر افزودن ۱ درصد نانو مگنتیت مقدار حداکثر وزن مخصوص خشک از ۱۷/۲ کیلو نیوتن بر متر مکعب به ۱۸/۵ کیلو نیوتن بر متر مکعب تغییر یافته است. علت این افزایش را می‌توان در چگالی بیشتر نانو مگنتیت نسبت به خاک رسی و همچنین استفاده از نانو مگنتیت بصورت محلول و پراکندگی و یکپارچگی نسبتاً خوب نمونه‌ها جست و جو کرد. در ادامه با توجه به شکل (۵-ب) مشاهده می‌شود مقادیر رطوبت بهینه همواره به صورت صعودی می‌باشد که در اثر

محصور نشده برای دماهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد به ترتیب ۴۰، ۱۱۷ و ۱۵۵ درصد رشد داشته است. همچنین لازم به ذکر است افزودن نانو به میزان بیش از ۱ درصد به عنوان ذرات اضافی در بین اسکلت خاک قرار می‌گیرد و عبارتی باعث آگلومره شدن در بخش‌های مختلف نمونه شده و طبیعتاً باعث افزایش تخلخل و به دنبال آن کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌گردد. همچنین قابل ذکر است به دلیل سختی بالاتر ذرات نانو اکسید آهن نسبت به ذرات خاک و کاهش فضای خالی، نمونه‌ها مقاومت فشاری بیشتری تحمل می‌کنند و در نتیجه انتظار می‌رود سختی بالاتری را با توجه به جنس مصالح از خود نشان دهند. در این پژوهش جهت همگن سازی نمونه‌ها و همچنین اختلاط بهتر نانو مگنتیت با خاک، ماده نانو با غلظت ۳۰۰ گرم بر لیتر بصورت محلول مورد استفاده قرار گرفته است که متعاقب آن توزیع مناسب نانومواد باعث کاهش تخلخل و بهتر شدن تراکم و انسجام نمونه‌ها می‌شود (Massana et al., 2018; Rajabi et al., 2021). همچنین درمورد دلیل افزایش مقاومت در شرایط دمایی ۶۰ درجه سانتی گراد می‌توان گفت زنجیره‌های آلومینوسیلیکات در پیوند با مولکول‌های آب و تشکیل اکسیدهای فلزی همچون آهن (Fe_2O_3 و Fe_3O_4) و یا حضور همزمان دو یا چند اکسید مختلف هستند که این اکسیدها به تشکیل زنجیره‌های بلندتر، افزایش سرعت واکنش، تشکیل صفحات چندگانه و پایداری بیشتر این زنجیره‌ها و در نتیجه افزایش مشخصات مکانیکی ساختار تشکیل شده کمک می‌کنند (Elkady et al., 2016; Horszczaruk, 2020). نهایتاً می‌توان گفت علت رشد چشمگیر در دمای بالا را می‌توان در تشکیل زنجیره‌های بلندتر و پیوند بهتر آلومیناسیلیکات‌ها با یکدیگر جست و جو کرد و همچنین تأثیرات فیزیکی و شیمیایی نانو مگنتیت باعث افزایش عملکرد و مقاومت نمونه‌ها شده است.

همچنین با توجه به مقادیر حاصل شده از آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده برای نقاطی که در هر شرایط عمل



شکل ۵. مقادیر الف) حداکثر وزن مخصوص خشک

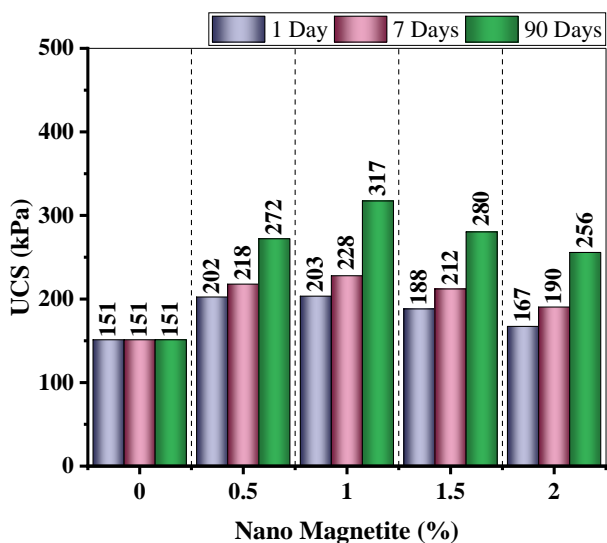
ب) رطوبت بهینه

۳.۳. اثر نانو مگنتیت بر مقاومت فشاری محصور نشده

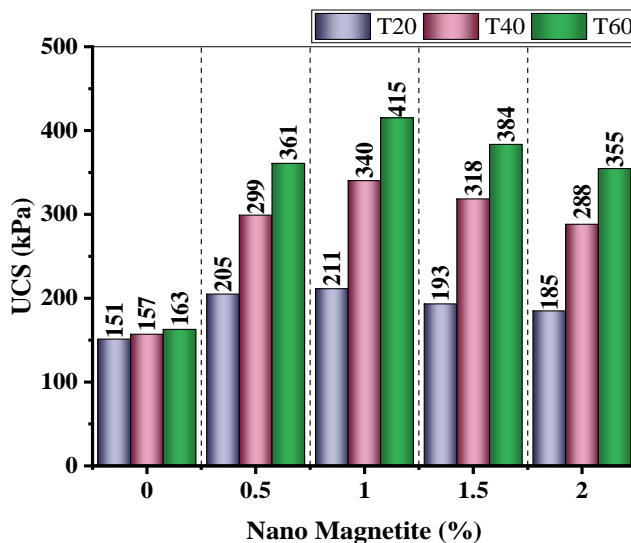
در این پژوهش جهت بررسی مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها در دو شرایط عمل آوری از آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده مطابق با استاندارد ASTM D-2166 استفاده گردیده است. مقادیر حاصل شده از آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده نیز در شکل (۶) برای هر نمونه آورده شده است. در ادامه شکل (۶-الف) نمودار تغییرات مقادیر مقاومت فشاری برای شرایط استاندارد که بیانگر دوره‌های عمل آوری کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت می‌باشد را نمایش می‌دهد که در اثر افزودن نانو مگنتیت تا ۱ درصد رفته رفته مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌ها در تمام دوره‌های عمل آوری روند افزایشی داشته بطوریکه حداکثر مقدار مقاومت فشاری محصور نشده برای شرایط عمل آوری ۱، ۷ و ۹۰ روزه به ترتیب حدود ۳۵، ۵۱ و ۱۱۰ درصد رشد داشته است. با توجه به شکل (۶-ب) مشاهده می‌گردد که حداکثر مقاومت فشاری محصور نشده در اثر افزودن ۱ درصد نانو مگنتیت برای شرایط دمایی متفاوت ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد روند افزایش داشته است بطوریکه حداکثر مقدار مقاومت فشاری

توجه به این مطلب می‌توان گفت عمل آوری در شرایط بلند مدت و اعمال دمای بالاتر از حد استاندارد آزمایشگاه می‌تواند به عنوان عامل کلیدی و مهم در بهبود وضعیت فیزیکی و همچنین ایجاد پیوند و ارتباط بین صفحات رسی عمل نماید.

آوری به نوعی حداکثر مقدار داشته‌اند، میزان رشد آنها نسبت به نمونه خاک رسی در شکل (۷) مورد ارزیابی قرار گرفته و نشان داده شده است. با توجه به شکل (۷) می‌توان دریافت که بیشترین مقادیر در عمل آوری استاندارد ۹۰ روزه و همچنین اعمال دمای ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد رخ داده است.

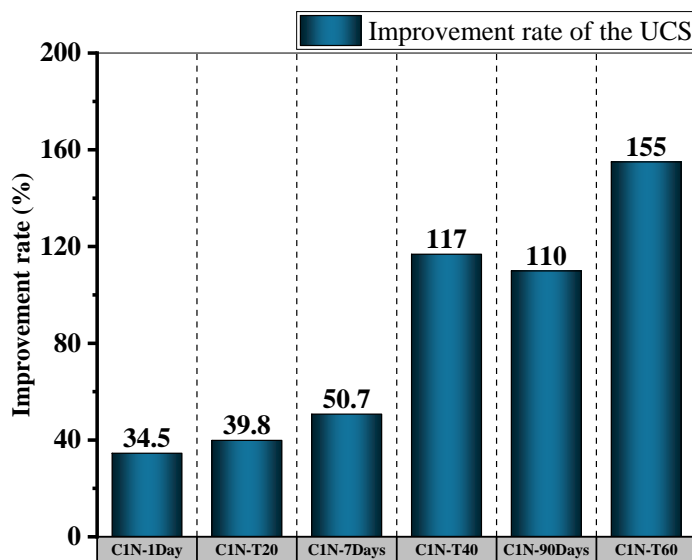


(الف)



(ب)

شکل ۶. مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده در شرایط عمل آوری (الف) استاندارد (ب) دماهای مختلف



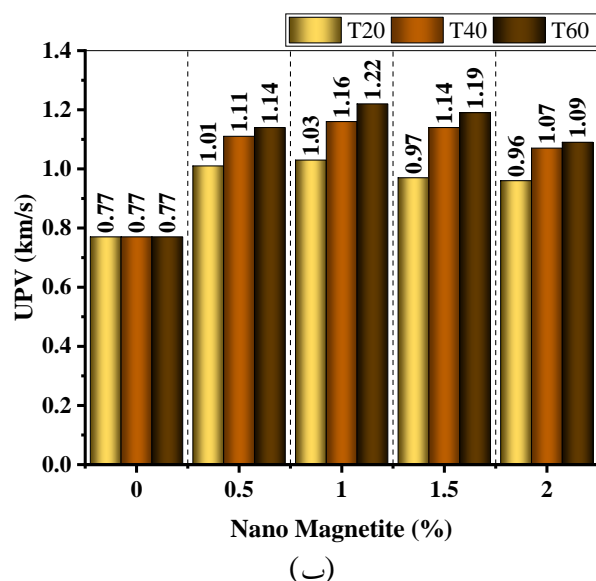
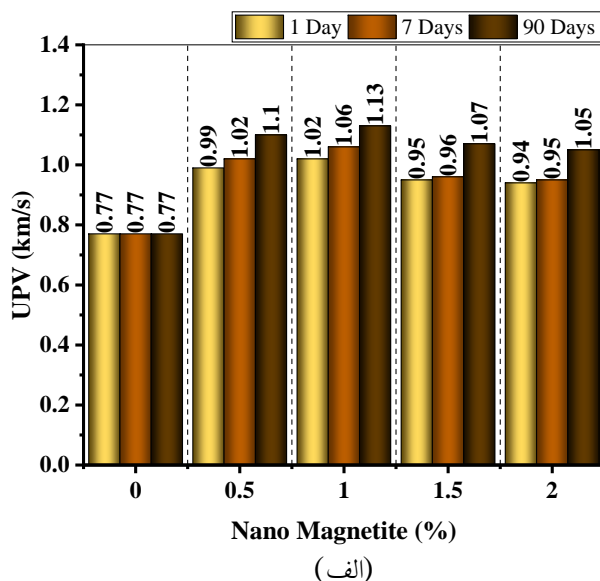
شکل ۷. نرخ تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های حاوی نانو مگنتیت نسبت به خاک رسی

۳.۴. اثر نانو مگنتیت بر سرعت عبور امواج فراصوت

نمونه‌ها

در این پژوهش جهت بررسی سرعت عبور امواج در نمونه‌ها در شرایط عمل آوری استاندارد و دماهای مختلف از آزمایش سرعت عبور امواج فراصوت استفاده گردیده است که مقادیر حاصل از آن در شکل (۸) برای هر نمونه آورده شده است. شکل (۸-الف) تغییرات سرعت عبور امواج فراصوت در شرایط عمل آوری استاندارد در روزهای ۱، ۷ و ۹۰ روزه را نمایش می‌دهد که در اثر افزودن ۱ درصد نانو مگنتیت به ترتیب حدود ۳۳، ۳۸ و ۴۷ درصد رشد داشته است. نتایج نشان می‌دهد که نانو مگنتیت در بلند مدت اثر بیشتری بر روی خاک رسی داشته است و عملاً انسجام بهتری رخ داده است. در ادامه شکل (۸-ب) تغییرات سرعت امواج فراصوت در شرایط عمل آوری در دماهای مختلف ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد نمایش می‌دهد که در اثر افزودن ۱ درصد نانو مگنتیت به ترتیب حدود ۳۴، ۴۸ و ۵۶ درصد رشد داشته

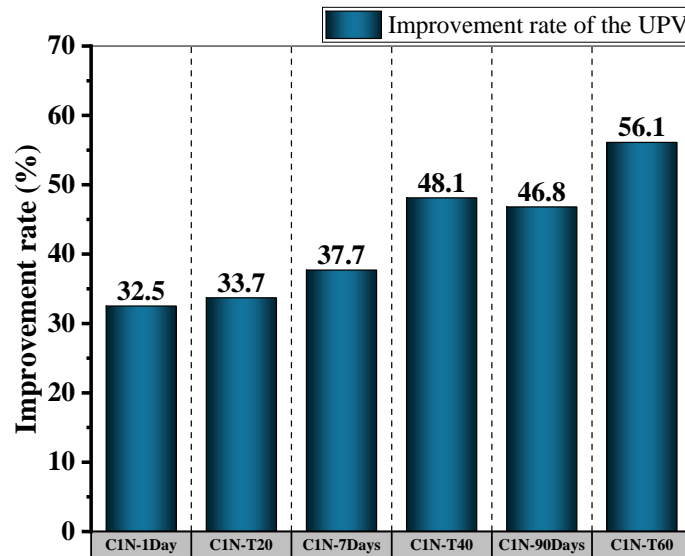
است. مقایسه نتایج در دو شرایط عمل آوری نشان می‌دهد که در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد که نزدیک به دمای استاندارد آزمایشگاه می‌باشد تغییر چشمگیری حاصل نشده و عملاً با توجه به فرآیند عمل آوری در بلند مدت و اعمال دمای بالا اثر بیشتری روی نمونه‌ها داشته و روند انجام واکنش‌های شیمیایی را تسریع می‌کند. در نهایت با بررسی شکل (۸) میتوان نتیجه گرفت بیشترین سرعت عبور امواج فراصوت در نمونه حاوی ۱ درصد نانو مگنتیت رخ داده که همین روند در بخش مقاومت فشاری نیز مشاهده گردیده است و در این پژوهش مصرف نانو مگنتیت به میزان بیشتر از ۱ درصد سبب صرف زمان بیشتری در عبور امواج می‌گردد که بیانگر استفاده از حداکثر ظرفیت نمونه‌ها و همچنین فولوکوله شدن و تجمع ذرات می‌باشد که می‌تواند سبب افزایش تخلخل و کاهش مقاومت گردد. همچنین آزمایش سرعت امواج فراصوت می‌تواند به عنوان یک روش غیر مخرب برای کنترل کیفیت و پیش بینی مقاومت در بحث تثبیت خاک استفاده شود.



شکل ۸. سرعت امواج فراصوت نمونه‌ها در شرایط عمل آوری الف) استاندارد ب) دماهای مختلف

مقدار در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد رخ داده و عملاً پارامتر دما را می‌توان به عنوان یک کاتالیزور یا پارامتر کلیدی معرفی نمود که سبب افزایش سرعت موج و همچنین بهتر شدن تراکم و پیوستگی نمونه‌ها گردیده است.

همچنین با توجه به مقادیر حاصل شده برای نقاطی که حداکثر مقدار را داشته‌اند، میزان رشد آنها نسبت به نمونه خاک رسی در شکل (۹) مورد ارزیابی قرار گرفته و نشان داده شده است. با توجه به شکل (۹) می‌توان دریافت که بیشترین



شکل ۹. نرخ تغییرات سرعت عبور امواج فراصوت نمونه‌های حاوی نانو مگنتیت نسبت به خاک رسی

نسبتاً خوبی هستند که نشان دهنده دقت مناسب آنها در تخمین مقاومت فشاری محصور نشده بر اساس سرعت امواج فراصوت است.

جدول ۴. ارتباط بین مقاومت فشاری محصور نشده و سرعت عبور امواج فراصوت

عمل آوری استاندارد (۱، ۷ و ۲۸ روزه)	$UCS = 8.8416e^{3.1826(UPV)}$ $R^2 = 0.9044$
عمل آوری در دماهای مختلف (۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد)	$UCS = 13.065e^{2.7862(UPV)}$ $R^2 = 0.8718$

۳.۵. اثر نانو مگنتیت بر پارامترهای مقاومت برشی

با استفاده از نتایج آزمایش برش مستقیم و با در نظر گرفتن معیار Mohr-Coulomb، حداکثر مقادیر تنش برشی در شکل (۱۰) ارائه گردیده و لازم به ذکر است در این پژوهش سربارهای اعمالی، مقادیر ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. از پوش‌های گسیختگی مربوط به شرایط عمل آوری استاندارد که در شکل (۱۰) نشان داده شده، می‌توان دریافت که با توجه به افزودن ۱ درصد نانو مگنتیت به خاک مقادیر حداکثر تنش برشی افزایش یافته و سپس روند

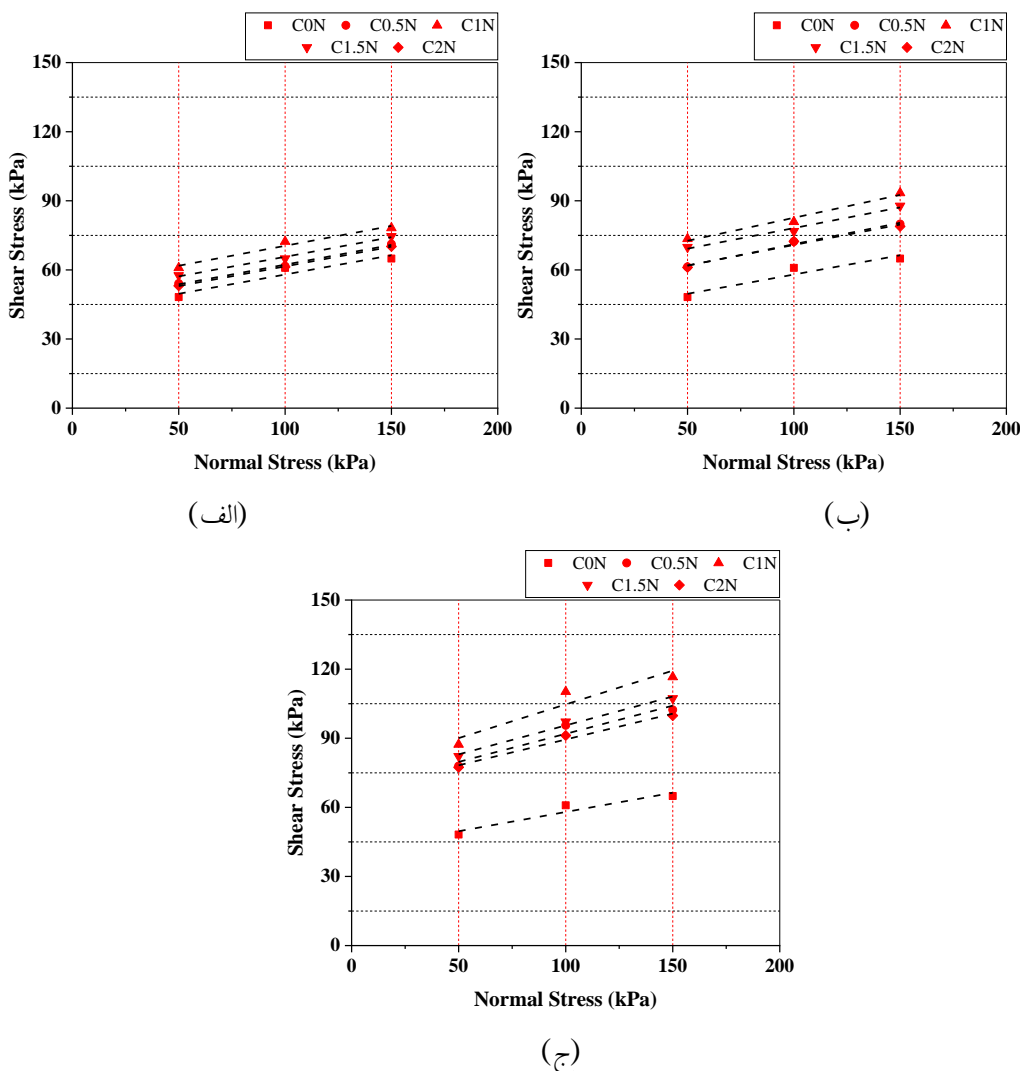
در ادامه باید گفت که رابطه مشخصی بین مقاومت فشاری محصور نشده و سرعت امواج فراصوت وجود ندارد اما با توجه به اینکه بین سرعت موج لرزه ای، مدول الاستیسیته و چگالی نمونه رابطه وجود دارد، بنابراین دلیل خوبی برای تعیین مقاومت فشاری محصور نشده بر اساس سرعت عبور امواج فراصوت می‌تواند وجود داشته باشد. از این رو معادلاتی ارائه گردیده است که نشان می‌دهد رابطه بین مقاومت فشاری محصور نشده و سرعت امواج فراصوت بصورت نمایی می‌باشد که می‌توان با رابطه (۲) آن را محاسبه نمود:

$$UCS = A * e^{B(UPV)} \quad (2)$$

که در آن UCS برابر با مقاومت فشاری محصور نشده، UPV برابر با سرعت امواج فراصوت (km/s) و A و B ثابت های تجربی می‌باشند (Ravindrarajah, 1997). در راستای این هدف رابطه‌ای بین مقاومت فشاری محصور نشده و سرعت امواج فراصوت در جدول (۴) مشاهده می‌گردد که با توجه به درصدهای متفاوت نانو مگنتیت در دو شرایط عمل آوری متفاوت ارائه شده است که همبستگی مناسب و قابل قبولی را در نمونه‌ها ایجاد کرده است. همانطور که جدول (۴) نشان می‌دهد، معادلات پیشنهادی دارای ضریب همبستگی

مدت و میان مدت در سربارهای پایین عملاً رشد بیشتری رخ داده و به افزایش چسبندگی کمک زیادی می‌کند و همچنین با توجه به عمل آوری ۹۰ روزه که شرایط بلند مدت می‌باشد پیوندهای ذرات خاک و قفل و بست بین ذرات با توجه به قرارگیری نانو مواد در منافذ بیش از پیش قابل لمس می‌باشد و افزایش چشمگیری در حداکثر تنش برشی می‌گذارد.

آن کاهش یافته بطوریکه برای سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال در اثر ترکیب خاک با ۱ درصد نانو مگنتیت به ترتیب حدود ۲۶، ۱۹ و ۲۱ درصد در عمل آوری ۱ روزه، ۵۳، ۳۳ و ۴۴ درصد در عمل آوری ۷ روزه و ۸۱، ۸۱ و ۸۰ درصد در عمل آوری ۹۰ روزه نسبت به خاک رسی افزایش داشته است. این مقادیر بیانگر آن هست که در دوره‌های کوتاه



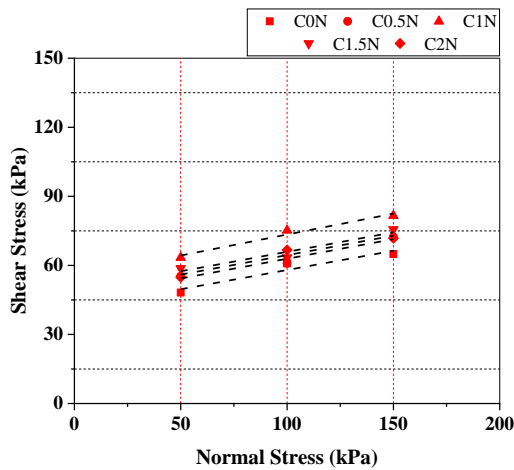
شکل ۱۰. معیار گسیختگی Mohr-Coulomb به دست آمده از آزمایش برش مستقیم برای نمونه های حاوی نانو مگنتیت در شرایط عمل آوری الف) ۱ روزه ب) ۷ روزه ج) ۹۰ روزه

سانتی گراد که در شکل (۱۱) نشان داده شده، می‌توان دریافت که با توجه به افزودن ۱ درصد نانو مگنتیت به خاک مقادیر حداکثر تنش برشی افزایش یافته و سپس روند آن کاهش

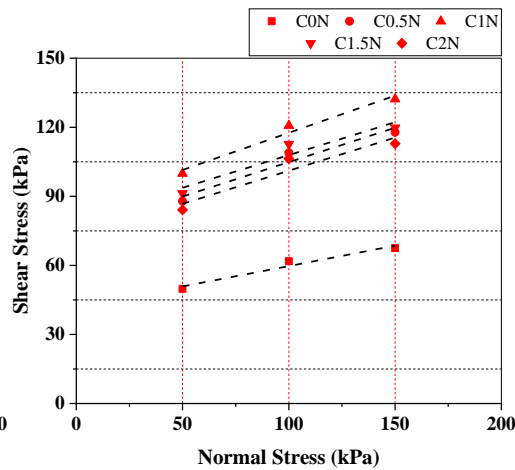
پوش‌های گسیختگی مربوط به شرایط عمل آوری در دماهای مختلف در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. از پوش‌های گسیختگی مربوط به شرایط عمل آوری در دمای ۲۰ درجه

رسی افزایش داشته است. این مقادیر بیانگر آن هست که در دمای پایین اتفاق چشمگیری نسبت به دماهای بالاتر اتفاق نمی‌افتد و عملاً با توجه به افزایش دما و انجام واکنشهای شیمیایی رشد چشمگیری در حداکثر تنش برشی نمونه‌ها اتفاق می‌افتد.

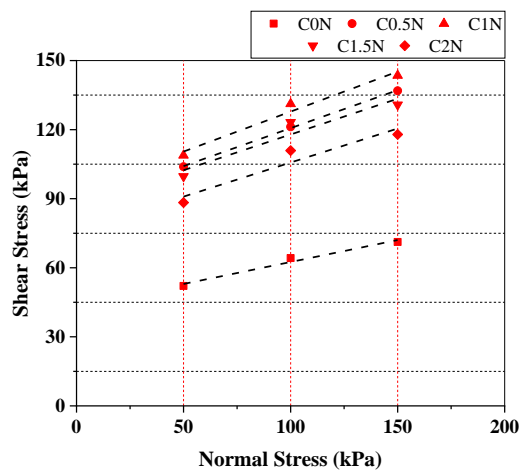
بوده بطوریکه برای سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال در اثر ترکیب خاک با ۱ درصد نانو مگنتیت به ترتیب حدود ۳۲، ۲۴ و ۲۶ درصد، در شرایط دمایی ۴۰ درجه سانتی گراد، حدود ۱۰۱، ۹۵ و ۹۶ درصد و در شرایط دمایی ۶۰ درجه سانتی گراد حدود ۱۰۹، ۱۰۴ و ۱۰۲ درصد نسبت به خاک



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۱. معیار گسیختگی Mohr-Coulomb به دست آمده از آزمایش برش مستقیم برای نمونه های حاوی نانو مگنتیت

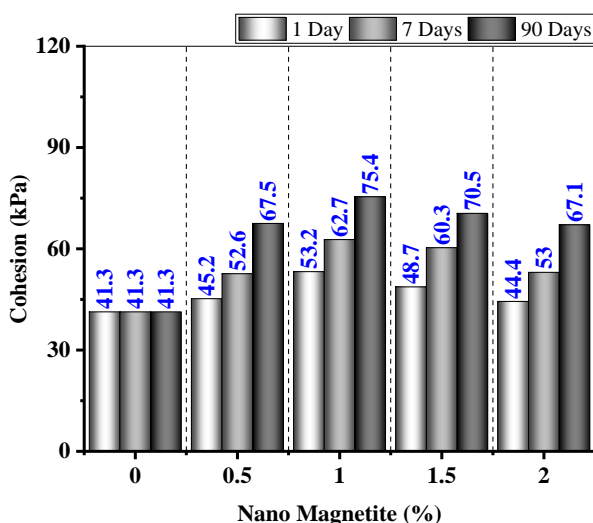
در دماهای مختلف (الف) ۲۰ درجه سانتی گراد (ب) ۴۰ درجه سانتی گراد (ج) ۶۰ درجه سانتی گراد

پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها برای درصدهای مختلف نانو مگنتیت در شرایط عمل آوری استاندارد و دماهای

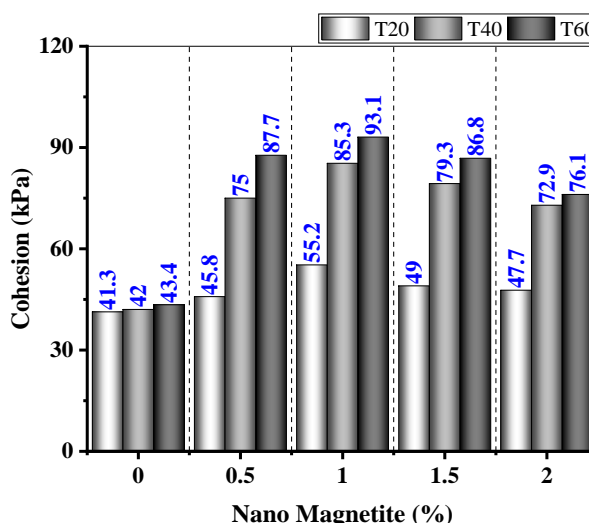
در ادامه با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم و با در نظر گرفتن معیار گسیختگی Mohr-Coulomb.

رشد داشته است. همچنین شکل (۱۲-ب) میزان تغییرات چسبندگی نمونه‌های خاک حاوی نانو مگنتیت در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. حداکثر مقدار چسبندگی در اثر افزودن ۱ درصد نانو مگنتیت به خاک در دماهای مختلف رخ داده است که برای دماهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد مقادیر چسبندگی به ترتیب حدود ۳۴، ۱۰۳ و ۱۱۵ درصد نسبت به خاک رسی رشد داشته است. در شرایط تسریع شده که بیشترین مقدار چسبندگی در آن رخ داده می‌توان گفت دما به عنوان یک پارامتر اثر گذار نقش بسزایی داشته است.

مختلف را می‌توان از پوش‌های گسیختگی مربوط به شکل‌های (۱۰) و (۱۱) تعیین نمود. تغییرات پارامترهای مقاومت برشی در اثر افزودن نانو مگنتیت به خاک نیز در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) آورده شده است. شکل (۱۲-الف) تغییرات مقادیر چسبندگی را برای نمونه‌های خاک حاوی نانو مگنتیت در شرایط عمل آوری استاندارد نمایش می‌دهد. با افزودن نانو مگنتیت به خاک، بیشترین افزایش یا به عبارتی نقطه بهینه در اثر افزودن ۱ درصد نانو مگنتیت به خاک رخ داده است که در شرایط عمل آوری استاندارد ۱، ۷ و ۹۰ روزه به ترتیب حدود ۲۹، ۵۲ و ۸۳ درصد نسبت به خاک رسی



(الف)

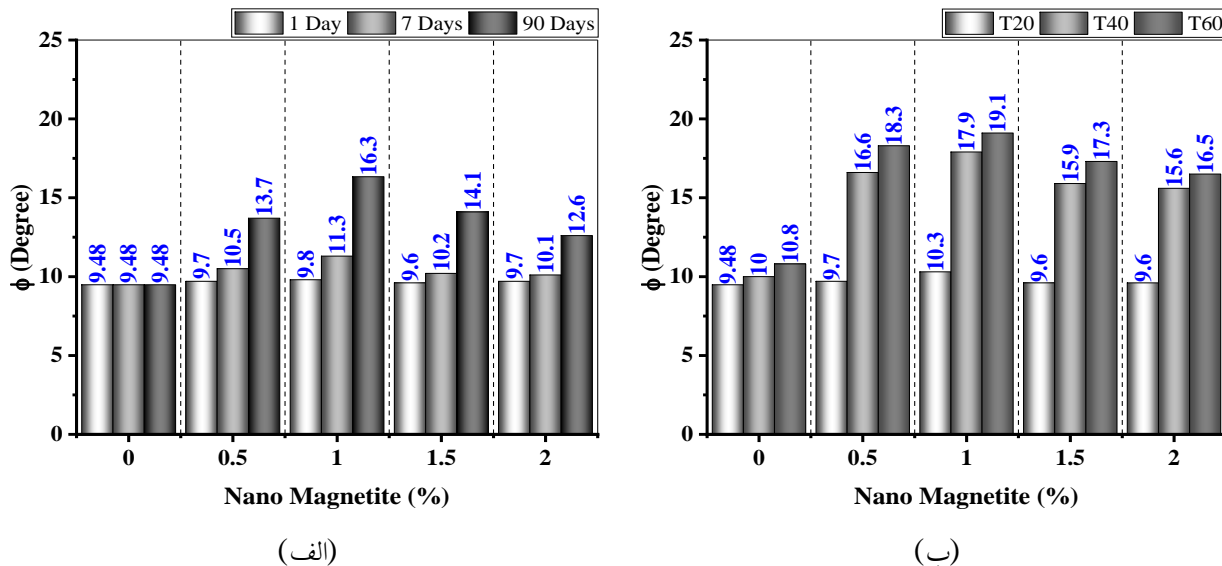


(ب)

شکل ۱۲. چسبندگی نمونه‌ها در شرایط عمل آوری الف) استاندارد ب) دماهای مختلف

عمل آوری نمونه‌ها در دماهای مختلف مشاهده گردید با اعمال دمای ۶۰ درجه سانتی گراد بیشترین مقدار زاویه اصطکاک داخلی در اثر افزودن ۱ درصد نانو به خاک رسی رخ داده که حدود ۷۷ درصد نسبت به خاک رسی رشد داشته است (شکل (۱۳-ب)).

در ادامه جهت بررسی پارامترهای مقاومت برشی، شکل (۱۳) تغییرات زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. شکل (۱۳-الف) مقادیر زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها در شرایط عمل آوری استاندارد را نشان می‌دهد که حداکثر افزایش در اثر افزودن ۱ درصد نانو مگنتیت به خاک رسی اتفاق افتاده که در دوره عمل آوری ۹۰ روزه حدود ۷۲ درصد افزایش نسبت به خاک رسی داشته است. در ادامه با توجه به



شکل ۱۳. زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها در شرایط عمل آوری الف) استاندارد ب) دماهای مختلف

عمل آوری با دمای ۶۰ درجه سانتی گراد در نمونه‌ها شده است.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله می‌توان اشاره کرد که تثبیت خاک رسی با اکسید آهن مغناطیسی در مقیاس نانو به عنوان یک روش اقتصادی و سازگار با محیط زیست برای بهسازی خاک قابلیت کاربرد صنعتی دارد. با توسعه فناوری‌های ساخت و ساز، این تکنیک بهسازی می‌تواند به عنوان روشی کاربردی و مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست برای پروژه‌های مهندسی عمران در نظر گرفته شود. همچنین در این پژوهش بررسی اثر نانو مگنتیت در شرایط عمل آوری و دمایی مختلف بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک رسی بررسی شده که نتایج آن بصورت ذیل ارائه گردیده است:

- در اثر افزودن نانو مگنتیت به خاک رسی، شاخص پلاستیسیته نمونه‌های حاوی نانو مگنتیت (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد) نسبت به خاک رسی به ترتیب حدود ۸/۱، ۲۱/۵، ۲۲/۹ و ۲۳/۵ درصد کاهش داشته و مشاهده می‌شود از ترکیب ۱ درصد نانو مگنتیت با خاک به بعد شیب کاهش کمتر شده و

در نهایت با بررسی پارامترهای مقاومت برشی می‌توان گفت افزودن نانو با توجه به سطح ویژه بالا عملاً سطح تماس بین ذرات خاک رسی با نانو مگنتیت را افزایش داده و همچنین به لحاظ فیزیکی با توجه به چگالی بیشتر نانو مگنتیت نسبت به خاک و همچنین ویژگی‌های کاتالیستی نانو که بیشترین اثر آن در اعمال دمای ۶۰ درجه سانتی گراد در این پژوهش می‌باشد، می‌توان افزایش پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها را انتظار داشت. همچنین در تحقیقات دیگر نیز با افزودن نانومواد به خاک‌های مختلف با توجه به ایجاد ترکیبات شیمیایی جدید و همچنین درگیری بهتر و قفل و بست بیشتر با ذرات خاک با توجه به سطح ویژه بالای نانومواد سبب بهبود مشخصات مکانیکی (Changizi and haddad, 2015; Choobbasti, 2019; Ahmadi and Shafiee, 2019; Rajabi et al, 2021; Mohammadi et al, 2022) در نمونه‌ها گردیده است. همچنین لازم به ذکر است در این پژوهش در هر دو بخش پارامترهای مقاومت برشی یعنی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی رشد نسبتاً چشمگیری در مقایسه با خاک رسی اتفاق افتاده و عملاً هر دو پارامتر یاد شده تاثیر گذار و کارآمد بوده و در نهایت سبب بهبود پارامترهای مقاومت برشی علی‌الخصوص در شرایط

خاصیت فیلر و کاتالیستی نانو مگنتیت بطور خاص جست و جو نمود.

- حداکثر سرعت عبور امواج فراصوت در نمونه با ۱ درصد وزنی نانو مگنتیت در شرایط عمل آوری استاندارد ۹۰ روزه و تسریع شده با دمای ۶۰ درجه سانتی گراد اندازه گیری شد که نسبت به خاک رسی به ترتیب حدود ۴۷ و ۵۶ درصد افزایش داشته است که عملاً نشان دهنده تراکم بالای نمونه‌ها در بخش فیزیکی و همچنان تشکیل پیوندهای مستحکم در اثر اعمال حرارت می‌باشد.
- تغییرات مقادیر چسبندگی برای نانو مگنتیت در شرایط استاندارد ۹۰ روزه و تسریع شده در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد نسبت به خاک رسی به ترتیب حدود ۸۳ و ۱۱۵ درصد بوده است. در ادامه تغییرات مقادیر زاویه اصطکاک داخلی برای نانو مگنتیت در شرایط استاندارد ۹۰ روزه و تسریع شده در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد نسبت به خاک رسی به ترتیب حدود ۷۲ و ۷۷ درصد می‌باشد که بیانگر کارآمدی و عملکرد مطلوب نانو مگنتیت در هر دو بخش پارامترهای مقاومت برشی می‌باشد.

عملاً در ۱ درصد اثر گذاری بیشتری در نمونه‌ها نشان داده شده است.

- در اثر افزودن نانو مگنتیت به خاک رسی به دلیل چگالی بیشتر نانو مگنتیت نسبت به خاک رسی و همچنین استفاده از نانو مگنتیت بصورت محلول و پراکندگی و یکپارچگی نسبتاً خوب نمونه‌ها، حداکثر وزن مخصوص خشک نمونه حاوی ۱ درصد نانو مگنتیت نسبت به خاک رسی روند افزایشی داشته و از ۱ درصد به بعد روند نزولی بوده است. در ادامه مقدار رطوبت بهینه نیز در اثر افزودن نانو افزایش یافته که بیشترین افزایش در اثر افزودن ۲ درصد نانو مگنتیت به خاک می‌باشد که از ۱۵ درصد به ۱۶/۵ درصد افزایش داده است.
- در اثر افزودن ۱ درصد نانو مگنتیت حداکثر مقاومت فشاری محصور نشده رخ داده است که بیشترین مقدار آن در شرایط استاندارد ۹۰ روزه و اعمال دمای ۶۰ درجه سانتی گراد می‌باشد که نسبت به خاک رسی حدود ۱۱۰ و ۱۵۵ درصد رشد داشته است و علت این افزایش مقاومت را می‌توان در

منابع

- Ahmadi, H., & Shafiee, O. (2019). Experimental comparative study on the performance of nano-SiO₂ and microsilica in stabilization of clay. *The European Physical Journal Plus*, 134(9), 459. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2019-12918-1>
- Ahmadi, H. (2021). Experimental study of the effect of nano-additives on the stiffness of cemented fine sand. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(4), 433-446. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1663067>
- American Society for Testing and Materials (Filadelfia, Pennsylvania). (2018). ASTM D4318-17e1: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM.
- American Society for Testing and Materials (Filadelfia, Pennsylvania). (2016). ASTM D2166/D2166M-16: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM.
- Arabani, M., Shalchian, M. M., & Rahimabadi, M. M. (2023). The influence of rice fiber and nanoclay on mechanical properties and mechanisms of clayey soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 407, 133542. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133542>
- ASTM, D. (2007). 421–85. Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants. American Society for testing and Materials. Annual Book of ASTM Standards.
- Astm, D. (2011). Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. D3080/D3080M, 3(9).

- ASTM, D. (2011). 2487. Standard practice for classification of soils for engineering purposes. In American Society for Testing of Materials.
- Bartos PJM (2009) Nanotechnology in construction: a roadmap for development. Nanotechnology in Construction: Proceedings of the NICOM3 (3rd International Symposium on Nanotechnology In Construction). Czech Republic. Prague. pp. 15–26.
- Changizi, F., & Haddad, A. (2017). Improving the geotechnical properties of soft clay with nano-silica particles. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 170(2), 62-71. <https://doi.org/10.1680/jgrim.15.00026>
- Changizi, F., & Haddad, A. (2017). Effect of nanocomposite on the strength parameters of soil. KSCE Journal of Civil Engineering, 21, 676-686. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-1471-8>
- Choobbasti, A. J., Samakoosh, M. A., & Kutanaei, S. S. (2019). Mechanical properties soil stabilized with nano calcium carbonate and reinforced with carpet waste fibers. Construction and Building Materials, 211, 1094-1104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.306>
- Cui, H., Jin, Z., Bao, X., Tang, W., & Dong, B. (2018). Effect of carbon fiber and nanosilica on shear properties of silty soil and the mechanisms. Construction and Building Materials, 189, 286-295. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.181>
- Elkady, M., Hassan, H. S., & Hashim, A. (2016). Immobilization of magnetic nanoparticles onto amine-modified nano-silica gel for copper ions remediation. Materials, 9(6), 460. <https://doi.org/10.3390/ma9060460>
- Eshghi, P., & Shalkoohy, A. J. (2022). Laboratory evaluation of the effect of polymer carpet waste on geotechnical properties of Bandar Anzali sandy soil. Iranian Journal of Engineering Geology, 15(1).
- Eshghi, P., Shalkoohy, A. J., Khodashahri, H. T., & Pourdada, A. (2022). Laboratory Evaluation of polypropylene fibers and nano-SiO₂ on geotechnical properties of clayey soils. Iranian Journal of Engineering Geology, 14(4).
- Ghasabkolaei, N., Janalizadeh, A., Jahanshahi, M., Roshan, N., & Ghasemi, S. E. (2016). Physical and geotechnical properties of cement-treated clayey soil using silica nanoparticles: An experimental study. The European Physical Journal Plus, 131, 1-11. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2016-16134-3>
- Gu, J., Cai, X., Wang, Y., Guo, D., & Zeng, W. (2022). Evaluating the Effect of Nano-SiO₂ on Different Types of Soils: A Multi-Scale Study. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(24), 16805. <https://doi.org/10.3390/ijerph192416805>
- Horszczaruk, E., Aleksandrak, M., Cendrowski, K., Jędrzejewski, R., Baranowska, J., & Mijowska, E. (2020). Mechanical properties cement based composites modified with nano-Fe₃O₄/SiO₂. Construction and Building Materials, 251, 118945. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118945>
- Kalhor, A., Ghazavi, M., Roustaei, M., & Mirhosseini, S. M. (2019). Influence of nano-SiO₂ on geotechnical properties of fine soils subjected to freeze-thaw cycles. Cold Regions Science and Technology, 161, 129-136. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.03.011>
- Khalid, N., Mukri, M., Kamarudin, F., Abdul Ghani, A. H., Arshad, M. F., Sidek, N., ... & Bilong, B. (2015). Effect of nanoclay in soft soil stabilization. In InCIEC 2014: Proceedings of the International Civil and Infrastructure Engineering Conference 2014 (pp. 905-914). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-287-290-6_79
- Krishnan, J. and Shukla, S., 2019. The behaviour of soil stabilised with nanoparticles: an extensive review of the present status and its applications. Arabian Journal of Geosciences, 12, pp.1-25.
- Laborel-Préneron, A., Aubert, J. E., Magniont, C., Tribout, C., & Bertron, A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. Construction and building materials, 111, 719-734. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.119>
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (2008). The Improvement of Soil. Soil Mechanics: SI Version, 517-520.
- Liu, C., Zhang, Q., Zhao, C., Deng, L., & Fang, Q. (2023). Assessment of strength development of soil stabilized with cement and nano SiO₂. Construction and Building Materials, 409, 133889. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133889>
- Majeed, Z. H., & Taha, M. R. (2013). A review of stabilization of soils by using nanomaterials. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 7(2), 576-581.

- Massana J, Reyes E, Bernal J, León N, Sánchez-Espinosa E (2018) Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete. *Constr Build Mater* 165:93–103.
- Mohammadi, M., Khodaparast, M., & Rajabi, A. M. (2022). Effect of nano calcium carbonate (nano CaCO₃) on the strength and consolidation properties of clayey sand soil. *Road Materials and Pavement Design*, 23(10), 2394-2415. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1976255>
- Rajabi, A. M., Ardakani, S. B., & Abdollahi, A. H. (2021). The effect of nano-iron oxide on the strength and consolidation parameters of a clay soil: an experimental study. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45(3), 1759-1768. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00640-9>
- Ravindrarajah, R. S. (1997). Strength evaluation of high-strength concrete by ultrasonic pulse velocity method. *NDT and E International*, 4(30), 261.
- Sharo, A. A., & Alawneh, A. S. (2016). Enhancement of the strength and swelling characteristics of expansive clayey soil using nano-clay material. In *Geo-chicago 2016* (pp. 451-457). <https://doi.org/10.1061/9780784480120.046>
- Standard, A. S. T. M. (2007). D698. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Standard, A. S. T. M. (2016). D854-14; Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- Yazdi, N. A., Arefi, M. R., Mollaahmadi, E., & Nejand, B. A. (2011). To study the effect of adding Fe₂O₃ nanoparticles on the morphology properties and microstructure of cement mortar. *Life Science Journal*, 8(4), 550-554.