ارزیابی بهبود مقاومت خاک‌های مارنی تثبیت شده با نانوسیلیس توسط سیمان و آهک (مطالعه موردی: خاک مارن اطراف شهر کازرون)

مقاله علمی - پژوهشی

سید یعقوب ذوالفقاری فر*، گروه مهندسی عمران و معماری، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران
محمد نعیمی، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی، کازرون، ایران
زریر صالحپور سروک، گروه مهندسی عمران و معماری، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sy.zolfegharifar@iau.ac.ir

دریافت: ۱٤۰۳/۰۸/۲۰- پذیرش: ۱٤۰٤/۰۳/۰۱

صفحه ۲۷۲-۲۵۷

چکیده

در دنیای پر رقابت امروز، بهسازی شیمیایی خاک با استفاده از آهک و نانوسیلیس به دلیل بهبود ویژگی‌های ژئوتکنیکی و همچنین فرآیند تثبیت برای طولانی مدت مورد استقبال قرار گرفته است. هدف از این پژوهش بررسی ویژگی ریزساختاری و مشخصات ژئوتکنیکی خاک‌های مارن و ارائه راهکار برای بهبود خواص و خصوصیات مهندسی این خاکها است. در این راستا تاثیر افزودنی آهک و ترکیب آهک و نانوسیلیس بر ویژگیهای ریزساختاری و ژئوتکنیکی خاک بررسی شد. پس از اخذ نمونه‌های خاک مارنی اطراف شهر کازرون نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شده به منظور تعیین ویژگی فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی و رده‌بندی خاک، حدود اتربرگ، تراکم و مقاومت فشاری محدود نشده روی خاک مبنا انجام شد. تثبیت خاک مارنی توسط افزودنی آهک و نانوکامپوزیت با درصدهای مختلف وزن خشک خاک توسط آزمایش مقاومت تک‌محوری ارزیابی شد. نمونه‌های لازم با نسبت‌های مختلف سیمان و میکروسیلیس در رطوبت بهینه تهیه و بعد از عمل آوری تحت آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده (UCS)، آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا و PH قرار گرفت. آزمایش تعیین حدود اتربرگ بعد از چند روز عمل آوری بر روی ترکیب‌های مختلف خاک- آهک- نانوسیلیس انجام شد. نتایج آزمایشات نشان داد، که با اضافه نمودن ۳٪ نـانوسیلیس و ٤٪ آهک برای پارامتر چسبندگی و همچنین با اضافه کردن ۱٪ نانوسیلیس و ۲٪ آهک برای پارامتر زاویـه اصطکاک داخلی مقدار بهینه افزودنی حاصل شد. حضور نانوسیلیس در سیستم خاک-آهک، منجر به توزیع یکنواخت ترکیبات کلسیم سیلیکات هیدراته در خاک شد.

واژه‌های کلیدی: خاک رس، مارن، CBR، UCS، PH، آهک، نانوسیلیس، سیمان

۱-مقدمه

مارن گونه‌ای خاک کلسیم کربنات است که چندین نوع مواد معدنی و آراگونیت در خود دارد. در اصطلاح علمی مارن به خاک‌هایی گفته می‌شود که دارای ۳۵ تا ٦۵ درصد رس، و ٦۵ تا ۳۵ درصد کربنات‌اند.در صورت سنگ شدگی خوب به آن مارن استون گویند. بهبود کیفیت خاک‌ها از دیرباز مورد توجه مهندسان عمران قرار گرفته است. خاک‌های مارنی جزو خاک‌هایی به حساب می‌آیند که بخش اعظم ساختمان آن‌ها را رس تشکیل می‌دهد. مارن‌ها گروهی از خاک‌های نامساعد هستند

که به دلیل کمبود مقاومت برشی، نشست غیرمجاز، عدم پایداری و غیره، برای عملیات اجرایی مشکلاتی را به‌همراه دارند. سیمان، آهک و پلیمرهای متداول امروزی که از نفت خام ساخته می‌شوند، با توجه به محدود بودن منابع نفتی و ضررهایی که برای محیط‌زیست دارند، قابل جایگزینی با بیوپلیمر هستند که از منابع تجدیدپذیر قابل استحصال می‌باشند و ضرر بسیار کمی برای محیط‌زیست به همراه دارند (ترابی و همکاران، ۱۳۹۸).

یکی از روش‌های اصلاح شیمیایی خاک استفاده از مواد افزودنی مانند آهک، سیمان و نانوذرات است. از گذشته تا به حال از تثبیت خاک، به عنوان روش نتیجه بخشی در افزایش توان باربری و کاهش تغییر شکل پذیری و خواص خمیری بسیاری از خاک‌ها استفاده شده است.

تثبیت خاک، عموماً با به کارگیری: آهک، سیمان، قیر، مواد شیمیایی مختلف و مصالح ژئوسنتتیک امکانپذیر است.

۲-پیشینه تحقیق

در تثبیت مصالح خاکی، مواد تثبیت کننده با ذرات خاک آمیخته می‌شوند و گاه ترکیبات شیمیایی جدیدی با خواص متفاوت به‌وجود می‌آورند. بعنوان مثال: آهک، چه به صورت زنده (با ترکیبات شیمیایی CaO) و یا $Ca(OH)_2$، با ذرات رس ترکیب می‌شود و خصوصیات فیزیکی آن را بهبود می‌بخشد. این عمل، یعنی استفاده از آهک به عنوان تثبیت‌کننده ارزان، قابل دسترس، و بسیار نتیجه بخش، سالیان دراز است که در بسیاری از پروژه‌های عمرانی مورد استفاده قرار گرفته است. اصولاً پس از افزودن آهک به خاک، دو دسته واکنش آلی در خاک صورت می‌گیرد. (عساکره و همکاران، ۱۳۹۸).

این دو واکنش عبارتند از: ۱-واکنش جایگزینی یون‌های مثبت ۲- واکنش تجمع-تراکم. در طی این دو واکنش، ذرات آهک با خاک رس ترکیب شده، به یکدیگر می چسبند و یک مخلوط سیمانی با اجزای درشت تر را به وجود می‌آورند که دارای خواص خمیری کمتر و مقاومت بیشتری است و پس از آن نیز در بلند مدت، واکنش‌های دیگری بین اجزای رسی خاک و آهک صورت می‌گیرد. واکنش‌های پوزولانی که طی آن، مواد سیمانی شده بیشتری تولید می‌شود و مقاومت بلند مدت خاک بر آن اساس قرار دارد، همچنین واکنش‌های کربناسیون که به تولید مواد غیر محلول در آب می‌انجامد، از جمله این واکنش‌ها هستند. افزایش مواد سیمانی کننده در خاک تا یک سطح مشخص، می‌تواند به افزایش تعداد نقاط برخورد و چسبندگی اجزای درشت‌تر بیانجامد و مقاومت مخلوط را افزایش دهد. علاوه برخاک‌های رسی در موارد متعددی از آهک، جهت سیمانی شدن مصنوعی مصالح درشت دانه‌تر مانند ماسه‌ها استفاده می‌شود که از جمله آن می‌توان به کاربرد آهک زنده در تثبیت ماسه‌ها در آلمان و موارد دیگر در بازسازی ماسه‌های ریزدانه در شمال غربی قاره استرالیا اشاره نمود (آزادگان و همکاران،۲۰۱۰). آهک و سیمان از متداول ترین موادی هستند که برای اصلاح و بهبود خصوصیات محدوده وسیعی از خاک‌ها به کار می‌روند. سابقه استفاده از آهک به دوران باستان بر می‌گردد و این در حالی است که تثبیت خاک‌ها با استفاده از سیمان تنها ۷۰ سال قدمت دارد. در سال ۱۹۳۵ اولین راه تثبیت شده با سیمان، در جنوب کالیفرنیا ساخته شده که تاکنون به بهره‌دهی خود ادامه می‌دهد. دلایل اصلی برای استفاده از سیمان در تثبیت: موثر بودن آن در مواجه شدن با خاک‌های با خصوصیات مختلف، دسترسی آسان، سادگی و سهولت استفاده از آن در زمینه‌های اجرا و صرفه‌جویی در هزینه‌هاست. غالبا تصور می‌شود که سیمان برای تثبیت خاک‌های درشت دانه به کار می‌رود ولی سیمان برای بهبود مقاومت و سختی خاک‌های ریزدانه هم به‌کار می‌رود (فخاریان و همکاران،۱۳۹۲). اصلاح خاک با سیمان به دلیل مؤثر و اقتصادی بودن آن روشی متداول برای بهبود خصوصیات مقاومتی خاک به شمار می‌رود. پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهند که تثبیت با سیمان، ساختار خاک، خصوصیات خمیری خاک، روانی، پراکندگی، تورم و انقباض، رفتار نشست و نفوذپذیری را تغییر می‌دهد و موجب بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک می‌شود؛ اما از سوی دیگر تشکیل ترکیبات متورم شوندهای مانند اترینگایت و تاموسایت در فرایند تثبیت با سیمان در خاک‌های مارنی موجب شکست فرایند تثبیت شده است (امیری و همکاران،۱۳۹۹). بهبود خواص خاک‌ها با سیمان در کوتاه مدت به سبب واکنش تبادل یونی و در دراز مدت ناشی از واکنش‌های پوزولانی و تشکیل اجزا سیمانی باعث درشت‌تر شدن دانه‌بندی خاک‌ها می‌شود. در سیمان علاوه بر دو واکنش فوق، تشکیل اجزا سیمانی اولیه نیز به بهبود دانه‌بندی در

کوتاه مدت کمک می‌کند پژوهش‌های انجام شده در زمینه بهره‌گیری از مواد نانو در بتن و مصالح سیمانی بسیار محدود بوده است. آنچه مسلم است تحقیقات زیادی می‌تواند بر استفاده از نانو تیتانیوم اکسید ($Nano\text{-}Tio_2$)، نانو اکسید آهن ($Nano\text{-}Fe_2O_3$) و نانوسیلیس ($Nano\text{-}Sio_2$) صورت بگیرد. (عساکره و همکاران،۱٤۰۰) از بین نانو مواد مذکور، نانوسیلیس به دلیل دارا بودن خواص پوزولانی از جایگاه بهتری برخوردار بوده و عملکرد مناسب تری از خود نشان داده است. ایزمیک و همکاران (۲۰۲۱) با ارزیابی ژئوتکنیکی خاک‌های رسی اصلاح شده با گرد و غبار کوره سیمان در طی چرخه ذوب یخ زده را بررسی نمودند. برای ارزیابی خواص ژئوتکنیک و ویژگی‌های دوام خاک رس آردن پس از مخلوط کردن آن با غبار کوره CKD طراحی شد. بررسی مربوط به تست ۱۰۵ نمونه خاک رس CKD برای تعیین نسبت بهینه خاک به خاک برای بهبود خواص هیدرولیکی آن است. با استفاده از استانداردهای ASTM، یک سری از نمونه‌های خاک برای شناسایی و شناسایی میکروبی قبل و بعد از مخلوط کردن با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ٪ CKD توسط وزن تهیه شد. مجموعه دوم نمونه‌ها تحت ۵، ۱۱، ۱۵، و ۲۰ آزمایش یخ زده (F - T) آماده و تست شدند.

نتایج نشان داد که افزودن ۲۰٪ CKD، خواص مکانیکی خاک رس، از جمله دوام F - T خود را بهبود بخشید.

سیکل F - T برای کاهش مقاومت فشاری محدود نشده خاک ناپایدار تا ۸۸ ٪ یافت شد در حالی که تنها ۲۱٪ برای خاک CKD شده CKD بود. به طور کلی، تثبیت CKD منجر به افزایش ۱۲ برابر در قدرت تراکم محدود نشده به علاوه بهبودهای مشخص در پلاستیسیته و انعطاف پذیری خاک منجر شد. نتایج بدست‌آمده از این تحقیق، حمایت و استفاده از CKD را به عنوان یک پایدارساز عالی برای ارتقای عملکرد مهندسی خاک ماسه دار تشویق می‌کنند. علاوه بر این، استفاده از زباله صنعتی برای اهداف مفید، با بازیافت مواد زائد مواد زاید خطرناک، منجر به منافع قابل‌توجه اقتصادی، زیست‌محیطی و پایداری برای ساخت زیرساخت‌ها می‌شود. میرزابابی و همکاران (۲۰۲۱)، "تأثیر افزودنی‌های نانو بر ویژگی‌های مقاومت و دوام مارن" را بررسی نمودند. این مطالعه استفاده از ترکیب پوزولانی انتخاب مواد افزودنی را مورد بررسی قرار داد، بعنوان مثال نانوسیلیکا و نانو – آلومینا و سیمان برای کاهش استفاده از سیمان برای دستیابی به نتایج تثبیت خاک مناسب استفاده نمود. یک سری از مقاومت فشاری محدود UCS، برش مستقیم و آزمایش‌های مقاومت در اثر نانو افزودنی‌های نانو (۰,۱ تا ۱,۵ ٪)، ۳ ٪ سیمان، و ترکیب ۳ ٪ سیمان و افزودنی‌های نانو انجام شد. مقاومت برشی و برشی با مواد افزودنی نانو، با افزودنی‌های نانو به یک مقدار نانو ذره نانو از ۱ درصد افزایش یافت که بیشتر با زمان درمان تشدید شد. سنگ‌های مارنی با استحکام نانو، استحکام و دوام طولانی تری را در زیر آب نشان دادند، در حالی که سیمان سمنته شده به زودی تجزیه شد. بررسی میکرو نمونه‌های سنگ مارنی پایدار، رشد قابل‌توجه فراورده‌های کلسیم سیلیکات هیدرات را در بافت میکرو با خاک نانو با مقادیر کم منافذ در داخل ذرات متراکم نشان داد. نتایج تایید کردند که مواد افزودنی نانو می‌تواند سیمان را تا حدی جایگزین کند تا به بهبود چند برابر در ویژگی‌های قدرت آسیب برسد. دبیری و کاکاوند(۲۰۱۸) به مطالعه تجربی کاربرد نانو سیلیس کلوئیدی در بهبود مخلوط‌های سیلت شنی پرداختند. خاک ماسه‌ای با گل و لای در ۵ ٪، ۱۰ ٪ و ۱۵ ٪ مخلوط شد. سپس نمونه‌ها در شرایط خشک و اشباع‌شده تحت نفوذ سیلیکا قرار گرفتند. برای تعیین خواص مکانیکی نمونه‌های اصلاح‌شده، تست برش مستقیم در سه حالت (خشک، اشباع‌شده، و تزریق) انجام شد. علاوه بر این، برای مطالعه وضعیت زه‌کشی پس از تثبیت نمونه‌ها، ثابت ثابت، تست نفوذپذیری انجام شد. نتایج نشان داد که مشخصات هیدرولیکی در حالت تزریق‌شده در مقایسه با حالت غیر تزریق، افزایش‌یافته است.

به طور کلی، این افزایش در چسبندگی و اصطکاک انتگرالی به ترتیب به طور متوسط در نمونه ۲ ٪، ۱,۱۸ ٪ و در حالت اشباع معادل ۱,۲۱ ٪، ۱,۱۳ ٪ می‌باشد. علاوه بر این، با تزریق نانو سیلیس، مقدار اسکان عمودی در نمونه‌ها به طور متوسط ۲۲ درصد کاهش‌یافته است. علاوه بر این، مقدار نفوذپذیری مواد تثبیت‌شده، به طور متوسط ٪ ۵۸ کاهش یافت. قربانی و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر نانو ذره‌های منتخب بر استحکام مکانیکی خاک‌های رسی با پلاستیسیته بالا تثبیت شده با آهک را بررسی نمودند. اثر نانو سیلیس و نانو اکسید بر روی خاک رس خمیری بالا ارزیابی شد.

آزمایشات مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) و نسبت باربری کالیفرنیا بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از نانوذرات انتخاب‌شده به شدت بر نمونه‌ها در مقایسه با خاک عمل‌آوری نشده را افزایش داده‌است.

مقدار UCS نمونه‌های حاوی ٦ ٪ آهک و ۱,۵ ٪ نانوذرات پس از ۲۸ روز تیمار با ۵ برابر افزایش در مقایسه با نمونه‌های فرآوری نشده، افزایش یافت. علاوه بر این، نمونه‌های حاوی ٦ ٪ آهک و ۲ ٪ نانو ذرات با شرایط پرداخت مشابه، افزایش ۵,۳ برابر در مقدار UCS در مقایسه با نمونه‌های عمل‌آوری نشده را تجربه کردند. این ترکیب‌ها به عنوان مقادیر بهینه در نظر گرفته شدند و بالاترین قدرت مکانیکی را در هر دو تست UCS و CBR نشان دادند. همان روند در تست CBR شکل گرفت، که در آن مقدار CBR برای مخلوط‌های بهینه حاوی نانو زینک اکساید و نانو سیلیس به ترتیب ۱٤,۸ و ۱٦,٦ برابر بیشتر از خاک رس با پلاستیسیته بالا بود. در نهایت، نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز میکروسکوپ الکترونی نشان داد که نانو ذرات باعث ایجاد یک ماتریس فشرده برای تشکیل خاک بهسازی شده در خاک مبدا شد که منجر به افزایش مقاومت مکانیکی نمونه‌های عمل‌آوری‌شده گردید. رجبی و عبدالهی (۲۰۱۹)، اثر نانو سیلیس بر پارامترهای مقاومت و تثبیت خاک‌های رسی کرج را بصورت تجربی بررسی نمودند. در این پژوهش با افزودن نان سیلیس به نوعی خاک رس در شهر کرج (غرب تهران)، رفتار مقاومت این نوع خاک مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، پس از انجام آزمایش‌های شاخص و شناسایی بر روی خاک طبیعی، نانو سیلیس را به خاک مورد مطالعه اضافه کردیم. سپس برش مستقیم، مقاومت فشاری محدود نشده، و تحکیم آزمایش بر روی این خاک‌ها انجام شد. علاوه بر این، تصویرسازی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM برای ارزیابی و مقایسه ویژگی‌های بافتی خاک قبل و بعد از فرآیند تثبیت، گرفته شد.

نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانو سیلیس به ۲ درصد منجر به افزایش مقاومت فشردگی تک محوری، پارامترهای مقاومت برشی (از جمله چسبندگی داخلی و زاویه اصطکاک داخلی) و کاهش تراکم پذیری و تورم پذیری خاک مورد مطالعه شد. در این مطالعه، واضح است که تکنیک تثبیت خاک با نانو سیلیس، روش بسیار موثری برای بهبود زمین است که مقاومت برشی، مقاومت فشرده سازی محدود، و پارامترهای تثبیت خاک را بهبود می‌بخشد؛ در نتیجه، پایداری ساختارها را افزایش می‌دهد، مانند پایه سازی و بستر جاده‌ها با توسعه تکنولوژی ساخت، این تکنیک بهبود را می توان به عنوان یک روش عملی برای بهبود رفتار قدرت رس در بسیاری از زمینه‌های مهندسی ژئوتکنیک، در نظر گرفت. لوسین و همکاران در سال ۲۰۱۲ اثر سیمانی شدن مصنوعی و طبیعی را در کالیفرنیا بررسی کردند. در این تحقیق مقاومت نهایی نمونه‌ها با سیمانی شدن افزایش یافت و با افزایش درجه سیمانی شدن، افزایش حجم در هنگام برش در محدوده کرنش‌های کوچکتری ظاهر شد. همچنین تأثیر ماده سیمانی بعد از گسیختگی به صورت چسبندگی باقی ماند و مقاومت کششی ماده سیمانی شده درحدود ۱۰ برابر مقاومت فشاری تک محوری گردید. براساس استانداردهای مختلف از جمله ASTM و AASHTO چند روش مختلف برای طرح مخلوط‌های آهکی پیشنهاد شده است. تثبیت خاک با آهک می‌تواند به یکی از چهار طریق زیرمنجر به بهبود خاک گردد و طراحی مخلوط‌های تثبی شده با آهک نیز مطابق با نیاز طراح، در راستای یکی از چهار طریق انجام پذیر است.

-افزایش مقاومت
- افزایش مدول الاستیسیته یا مدول برجهندگی و سختی
- مقاومت در برابر خستگی و شکست
- افزایش دوام

روش‌های مختلف تثبیت خاک با آهک را به صورت زیر بیان می‌کنند. این روش‌ها در اغلب مراجع معتبر به عنوان روش‌های طرح مخلوط‌های تثبیت شده با آهک مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

روش PH: بر اساس این روش هنگامی که PH مخلوط به حدود ٤,۱۲ برسد.

روش دامنه خمیری: تعیین آهک بهینه با استفاده از حالتی که دامنه خمیری به حد مطلوب کاهش پیدا کند.

روش نسبت باربری کالیفرنیاCBR: تعیین آهک بهینه بوسیله مقاومت CBR تعیین می‌گردد.

روش AASHTO: مقاومت مخلوط بر اساس درصد بهینه مقاومت فشاری نمونه تثبیت شده با آهک بدست می‌آید.

روش مقاومت فشاری: تعیین آهک بهینه بر اساس مقاومت تک محوری نمونه تثبیت شده با آهک بدست می‌آید.

بررسی نتایج سری آزمایشات آزمایشگاهی (شناسایی و طبقه بندی خاک، تراکم، نفوذپذیری و برش مستقیم) اجرا شده توسط عبدالکریم محمد و همکاران در سال ۲۰۱٤ بر روی رس پیش تحکیم یافته تورم‌پذیری که شاهد وقوع خرابی‌های مکرر بر شالوده مسیرهای ارتباطی و سازه‌های سبک می‌باشد، نشان می‌دهد که ظرفیت باربری خاک رس تثبیت یافته، ترکیب سیمان پرتلند و آهک مرده) و تراکم یافته در رطوبت بهینه و تحت شرایط استاندارد بهبود یافته و مقاومت و دوام خاک به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. آمو و همکارانش (۲۰۱٤) از سیمان و خاکستر بادی برای تثبیت یک خاک رس متورم شونده استفاده کردند، خصوصیات تراکمی و مقاومتی خاک رس را بررسی کردند. آنها سه ترکیب مختلف شامل خاک بدون تثبیت کننده، خاک رس با ۱۲٪ سیمان و خاک رس با ۹٪ سیمان و ۳٪ خاکستر بادی با هم مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد که افزودن ۳٪ خاکستر بادی و ۹٪ سیمان بالاترین افزایش در مقاومت را داشت.

۳-مواد و روش تحقیق

نمونه‌های این پژوهش در شهر کازرون استان فارس بدست آمده و آزمایش‌ها بر روی این نمونه‌ها انجام شده است. نمونه‌گیری پژوهش حاضر در سه منطقه (دریاچه پریشان، جره و بالاده و چنارشاهیجان) مربوط به حومه شهرستان کازرون واقع در استان فارس است. شهرستان کازرون از خاور به شهرستان شیراز، از شمال به شهرستان کوه چنار و از باختر و جنوب به استان بوشهر و از جنوب خاوری به شهرستان فراشبند محدود می‌شود. پس از اخذ نمونه‌های خاک مارنی از محل مورد مطالعه، خاک اطراف شهر کازرون نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شده به منظور تعیین ویژگی و رده بندی خاک، حدود اتربرگ، تراکم و مقاومت فشاری محدود نشده روی خاک مبنا انجام شده است. ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی آنها قبل و بعد از تثبیت توسط افزودنی آهک و نانوکامپوزیت مورد بررسی قرار گرفت. نانوسیلیس استفاده شده در این پژوهش به صورت پودری مورد استفاده قرار گرفته و برای مطالعه تاثیر نانوسیلیس بر رفتار خاک درصدهای مختلفی از آن به خاک مارنی موضوع پژوهش اضافه گردید. ماده تثبیت کننده اولیه سیمان با نسبت‌های مختلف درصد وزن خشک خاک مارنی که به آن میکروسیلیس نیز با نسبت‌های مختلف وزن خشک خاک افزوده شد. آزمایش مقاومت تک‌محوری انجام گرفت. نمونه‌های لازم با نسبت‌های سیمان و میکروسیلیس در رطوبت بهینه تهیه و بعد از عمل آوری تحت آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) و آزمایش CBR قرار گرفت. آهک شکفته‌ای در این پژوهش از الک گذرانده می‌شود و PH آن اندازه‌گیری شد. بعد از اختلاط کامل آهک و نانوسیلیس به اندازه درصد رطوبت بهینه آب افزوده می‌شود. نمونه‌ها به منظور توزیع یکنواخت رطوبت، ترکیب می‌شوند تا به صورت همگن درآیند. آزمایش تعیین حدود اتربرگ بعد از چند روز عمل آوری بر روی ترکیب‌های مختلف خاک- آهک- نانوسیلیس انجام می‌شود. در گام بعدی از آهنگ ثابت نشست استفاده می‌شود. آهنگ نشست براساس ضریب نفوذپذیری خاک و اندازه صفحه انتخاب می‌شود تا آزمایش در شرایط زه‌کشی نشده انجام شود. آهنگ نشست برای صفحه‌هایی به قطر ۳۰ تا ٦۰ سانتی‌متر را به عنوان یک الگوی تقریبی می‌توان ۲/۵ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفت. آزمایش تا نشست حداکثر ۱۵ درصد قطر صفحه ادامه می‌یابد در انتها نتایج ارزیابی مقاومت خاک مارنی نمونه‌های پژوهش برای دو آزمایش آهک نانوسیلیس و سیمان نانوسیلیس مقایسه می‌شوند.

هدف پژوهشگر، کمک به تعیین پارامترهای مهمی مانند مدول یانگ، ضریب عکس العمل بستر و مقاومت مجاز مصالح آزمایش شده و در نهایت تعیین مقاومت خاک مارنی منطقه و نمونه‌های موضوع پژوهش بود. در آزمایش‌هایی که روی خاک و رس‌نرم و خاک‌مارنی انجام می‌شود، محل آزمایش باید به طور کامل دست نخورده باشد و هرگونه مصالح دست خورده یا سست شده را باید برداشت. سطح مورد آزمایش باید صاف باشد و در صورت امکان، بهتر است آماده سازی با دست انجام گیرد. ابتدا سطح آزمایش با گچ یا ملات سیمان صاف شد. اگر سطح مورد آزمایش بسیار سخت باشد، استفاده از لایه‌های متعدد گچ یا ملات سیمان برای بدست آورد سطح کاملاً صاف ضروری است. در آزمایش‌هایی که روی سطح افقی انجام می‌شود، می‌توان از لایه نازکی از ماسه نرم و یکنواخت نیز استفاده کرد که در این صورت، ضخامت آن اغلب ۱ تا ۲ سانتی متر است و در مواردی که مصالح درشت دانه نیز در مصالح مورد آزمایش دیده شود این مقدار تا ۵ سانتی‌متر قابل افزایش است. این لایه وظیفه زهکشی مصالح را نیز در هنگام بارگذاری بر عهده دارد. در چنین مواردی، می‌توان اطراف صفحه را هم با لایه ماسه نرم و یکنواخت پوشش داد (حسینی، ۱۳۹۸). خاک به کار رفته در این تحقیق پس از مطالعه و بررسی تعداد قابل توجهی نمونه خاک رسی از سه منطقه (دریاچه پریشان، جره و بالاده و چنارشاهیجان) شهرستان کازرون انتخاب گردید (شکل ۱).

شکل ۱. منطقه‌های نمونه‌گیری موضوع پژوهش

نظر به اینکه در گذشته خاک‌های مارنی چسبنده، مشکلات اجرایی متعددی در پروژه‌های عمرانی ایجاد نموده‌اند، متاسفانه در بیشتر موارد بدون بررسی این نکته که آیا امکان استفاده از این خاک‌ها در پروژه‌های عمرانی (مثل راه) وجود دارد یا نه، اقدام به تعویض آن با مخلوط قابل کوبش می‌گردد؛ از همین رو تصمیم بر آن شد تا یک نمونه خاک چسبنده با محتوای رسی، از یکی از مناطق سطح استان فارس انتخاب گردد. نمونه برداری جهت دانه‌بندی باید به روش استاندارد (ASTMD 422-63) انجام شد بدین صورت که کلیه‌ی نمونه‌ی برداشته شده آزمایش می‌شود، مگر در موارد به خصوص که نمونه تقسیم می‌شود. روش آماده کردن نمونه یا تقسیم آن به دو صورت تقسیم با جدا کننده و تقسیم با چهار قسمت کردن نمونه (چهار قسمتی) انجام می‌شود. در تهیه نمونه برای انجام دانه‌بندی در این پروژه از روش تقسیم با چهار قسمت استفاده شد. در این روش نمونه روی یک سطح تمیز، صاف و محکم ریخته می‌شود که هیچگونه امکان اضافه شدن یا ریزش به آن نباشد. نمونه خوب مخلوط شده و در آخر به صورت مخروطی در آورده می‌شود، سپس با فشار دادن نوک مخروط خاک به صورت مسطح در می‌آید و بعد به چهار قسمت تقسیم می‌شود. بهتر است از طریق قطر دو قسمت روبه‌رو به عنوان نمونه مورد آزمایش انتخاب و به طور کامل برداشته شود. به طوری که هیچگونه مصالح ریزدانه برجا نماند. اگر باز هم زیاد بود به همین طریق ادامه داده شده می‌شود تا میزان مطلوب به‌دست آید. در این پروژه از نانوسیلیس موجود در آزمایشگاه که به صورت پودر خشک با فرمول شیمیایی SiO_2 استفاده شده که از شرکت نانو سیلیس ایساتیس واقع دریزد خریداری شده است.

میزان خلوص این ماده ٪۹۹ می‌باشد. آهک خالص مورد استفاده قرار گرفته در این پژوهش از کارخانه تولید آهک نی‌ریز در استان فارس و آهک دولومیتی مصرفی از معدن سنگ دولومیت ده بالا در استان یزد تهیه شد. مشخصات فنی آهک‌های مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. آب استفاده شده، آب شرب منطقه شهرستان کازرون بود.

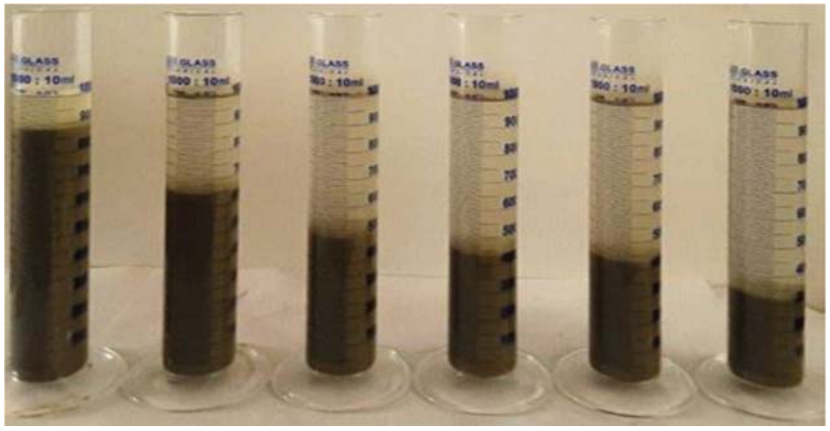
جدول ۱. مشخصات فنی آهک مصرفی

آهک دولومیتی			
TiO_2L		SO_3	
Fe_2O_3		K_2O	
Al_2O_3		Na_2O	۱/۱
SiO_2		MgO	
L.O.I		Cao	
آهک غیردولومیتی			
$Ca(OH)_2$	% 90	رطوبت	% 0/7
$Mg(OH)_2$	حداکثر 2 %	نامحلول در اسید	% 0/1
SiO_2	% 0/7		

بحث و بررسی نتایج

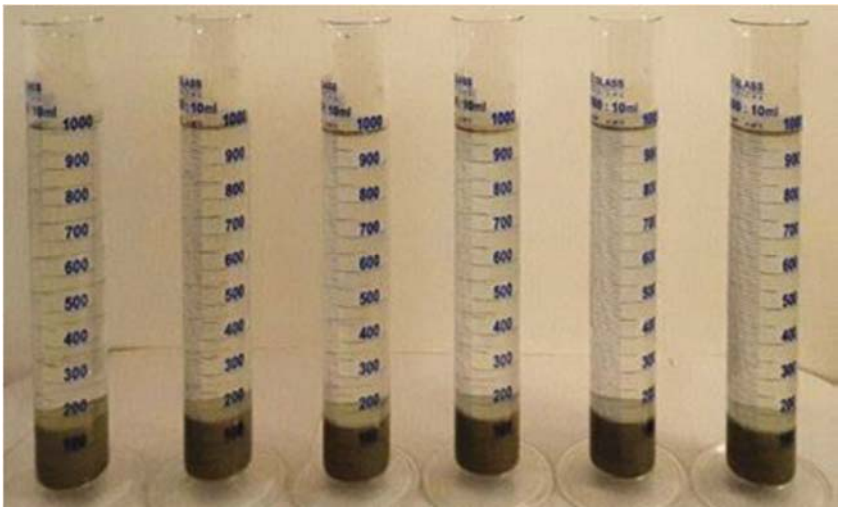
دانه‌بندی خاک‌های ریز دانه را می‌توان با استفاده از روش ته نشینی تعیین کرد این روش مبتنی بر قانون استوکس می‌باشد که مربوط به سرعت سقوط ذرات کروی شکل معلق در مایعات می‌باشد. ذرات بزرگتر سرعت سقوط بیشتری دارند و ذرات کوچکتر با سرعت کمتری ته نشین می‌شوند که شکل ۱. منطقه‌های نمونه‌گیری موضوع پژوهش را نمایش می‌دهد. در شکل ۳ فرآیند رسوب نمونه‌های موضوع پژوهش پس از گذشت ۵ دقیقه نشان داده شده است.

شکل ۲. نمونه‌های موضوع پژوهش



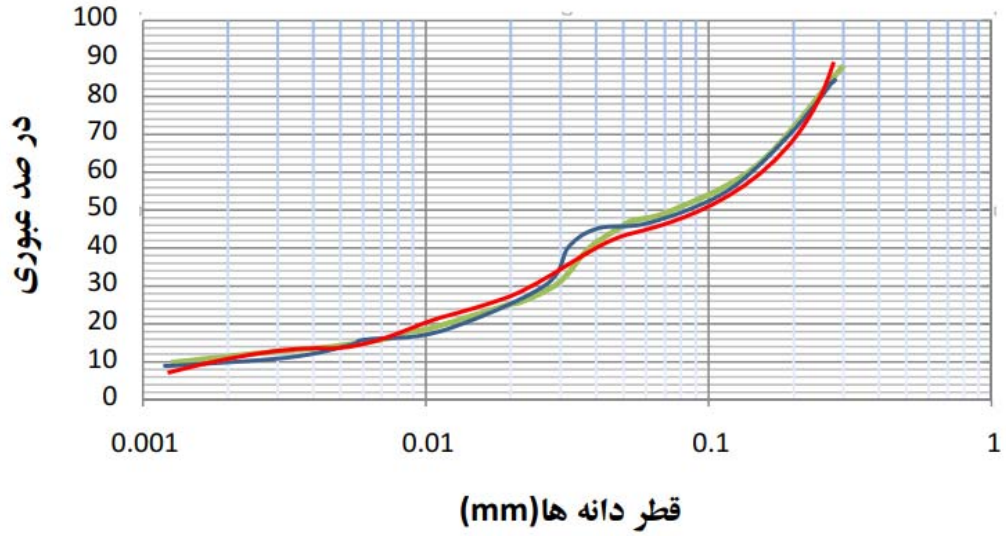
شکل ۳. فرآیند رسوب نمونه‌های موضوع پژوهش (زمان ۵ دقیقه)

در شکل ٤ فرایند رسوب نمونه‌های موضوع پژوهش پس از گذشت ۱٤٤۰ دقیقه نشان داده شده است.



شکل ٤. فرآیند رسوب نمونه‌های موضوع پژوهش (زمان ۱٤٤۰ دقیقه)

شکل دانه‌بندی خاک حاصل از روش الک و هیدرومتری ترسیم گردیده است. خطوط آبی سبز و قرمز به ترتیب خاک دریاچه پریشان و جره و بالاده و چنار شاهیجان مرتبط می‌شوند.



شکل ٥. دانه‌بندی خاک حاصل از روش الک و هیدرومتری

جدول ۲. نتایج حدود اتربرگ دریاچه پریشان، جدول ۳. نتایج حدود اتربرگ جره و بالاده و جدول ٤. نتایج حدود اتربرگ چنار شاهیجان که از نتایج حاصل از آزمایش حدود اتربرگ ترسیم شده است، می‌توان چنین نتیجه گرفت با اضافه کردن آهک و نانو سیلیس به خاک موجب تبادل کاتیونی میان کلسیم اکسید موجود در آهک و نانوسیلیس موجود در سیلیس می‌شود و باعث شده ذرات رس به یکدیگر نزدیکتر شوند و در اثر این فعل و انفعالات تغییراتی از نظر فیزیکی و شیمیایی در خاک بوجود می‌آید که باعث تغییرات اساسی در پارامترهای خمیری خاک می‌گردد.

جدول ۲. نتایج حدود اتربرگ دریاچه پریشان

نوع نمونه	LL حدروانی	PL حد خمیری	PI نشانه خمیری	IL نشانه روانی	Ic نشانه استحکام	رابطه اسکمپتن CC تراکم شاخص
A بدون نانو وآهک	22	14	6	1	20	0.16
A۱٪نانو ۲٪آهک	32	13	18	1	32	0.26
A۲٪نانو ۳٪آهک	36	12	25	1	38	0.19
A۳٪نانو ۴٪آهک	33	18	15	1	43	0.24

جدول ۳. نتایج حدود اتربرگ جره و بالاده

نوع نمونه	LL حدروانی	PL حد خمیری	PI نشانه خمیری	LI نشانه روانی	CI نشانه استحکام	رابطه اسکمپتن C_C تراکم شاخص
B بدون نانو وآهک	23	16	7	1	22	0.18
B۱٪نانو ۲٪آهک	31	14	17	1	30	0.27
B۲٪نانو ۳٪آهک	37	13	24	1	38	0.20
B۳٪نانو ۴٪آهک	33	17	15	1	42	0.25

جدول ٤. نتایج حدود اتربرگ چنار شاهیجان

نوع نمونه	LL حدروانی	PL حد خمیری	PI نشانه خمیری	IL نشانه روانی	CI نشانه استحکام	رابطه اسکمپتن C_C تراکم شاخص
Cبدون نانو وآهک	25	17	7	1	23	0.18
C۱٪نانو ۲٪آهک	33	15	18	1	32	0.25
C۲٪نانو ۳٪آهک	38	13	25	1	38	0.19
C۳٪نانو ۴٪آهک	34	19	15	1	43	0.23

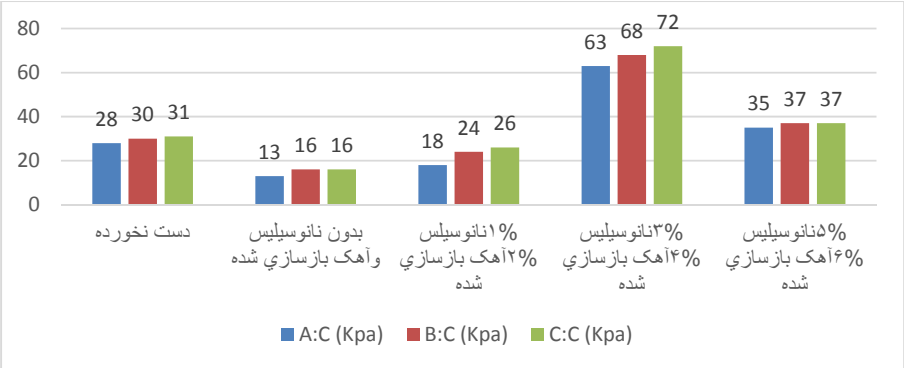
با توجه به یکسان بودن نشانه روانی برای در صدهای مختلف نانو سیلیس و آهک در درصد رطوبت حد روانی (۲۵ ضربه در منحنی جریان) می‌توان چنین نتیجه گرفت که نشانه روانی مستقل از سایر پارامترهاست و به رطوبت محل ساختگاه وابسته است. مقدار مساوی با عدد یک پارامتر فوق نشان دهنده‌ی این است که رطوبت خاک در محل ساختگاه درآستانه رطوبت حد روانی است و رس از نوع غیرحساس است. عامل کوتاه زمان برای به‌عمل‌آوری خاک اصلاح شده با نانو سیلیس و آهک برای پروژه‌هایی که با نیاز فوری به سرعت اجرا دارند سودمند است. با توجه‌به آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های مختلف مشخص گردید (۲٪ نانو سیلیس و ۳٪ آهک) برای پارامتر نشانه خمیری، عدد فعالیت حد روانی بهینه می‌باشد. در پارامترهایی نظیر نشانه استحکام، شاخص تراکم از رابطه تجربی اسکمپتن و نشانه خمیری از روی نمودارها به خوبی

مشخص است که با اضافه کردن نانوسیلیس توام با آهک بیشتر، روند پایین آورنده پارامترهای فوق برقرار است. با توجه به PI بدست آمده، حدود اتربرک، خاک نواحی سه‌گانه مورد مطالعه در محدوده CL- ML قرارگرفته است (نمودار کاساگرانده) و برابر طبقه بندی یونیفاید خاک (CL رس لای دار با خاصیت خمیری کم) می‌باشد. در آزمایش برش مستقیم جهت آماده سازی نمونه‌ها، ابتدا با استفاده از مقادیری که براساس) حجم قالب دستگاه برش مستقیم، درصد رطوبت بهینه و جرم حجمی خاک خشک حداکثر بدست آمده از آزمایش تراکم محاسبه و تهیه گردیده است، مقدار آب مورد نظر را درون بشر ریخته نانوسیلیس را به آن اضافه می‌کنیم و به مدت ۱۰ دقیقه توسط میکسر آنرا هم زده تا نانو سیلیس به طور همگن در آب حل شود. سپس محلول فوق را به خاک مخلوط شده با آهک اضافه کرده و مدت ۲۰ دقیقه به هم می‌زنیم تا در پایان مخلوط همگن و بدون کلوخه‌ای بدست آید.

بدیهی است تهیه نمونه‌های تحت شرایط مساوی وهمگن در نتایج بسیار موثر می‌باشد. نمونه‌های تهیه شده برای جذب رطوبت به مدت ۱۸ ساعت درون محفظه عایق (زیپ کیف) قرار گرفته وسپس به مدت ۲٤ ساعت در آب اشباع شدند و در دور کاملاً آرام به منظور بدست آورد پارامترهای تحکیم یافته – زهکشی شده در دستگاه برش مستقیم مورد آزمایش قرار گرفتند. به منظور یافتن درصد بهینه نانوسیلیس و آهک از ۱،۳،۵ در صد نانوسیلیس و۲،٤،٦ درصد آهک استفاده شده است. در تمام نتایج ارایه شده A، B و C به ترتیب مربوط به نواحی مورد مطالعه دریاچه پریشان، جره و بالاده و چنارشاهیجان است.

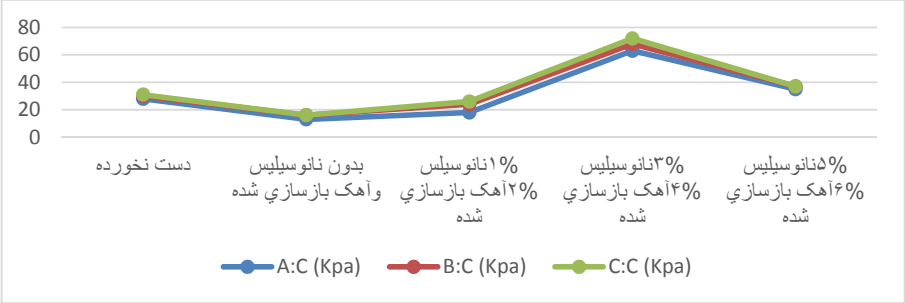
جدول ۵. مقدار چسبندگی خاک– نانو سیلیس، آهک

نوع نمونه	A:C (Kpa)	B:C (Kpa)	C:C (Kpa)
دست نخورده	28	30	31
بدون نانوسیلیس وآهک بازسازی شده	13	16	16
۱% نانوسیلس ۲٪ آهک بازسازی شده	18	24	26
۳% نانوسیلیس ۴٪ آهک بازسازی شده	63	68	72
۵% نانوسیلیس ۶٪ آهک بازسازی شده	35	37	37



شکل ۵. نمودار مقادیر چسبندگی– نانو سیلیس، آهک

با توجه به داده‌های بدست آمده در جدول ۵. مقدار چسبندگی خاک– نانو سیلیس، آهک و شکل ۵. نمودار مقادیر چسبندگی– نانو سیلیس، آهک بیشترین مقدار بدست آمده در سه نمونه خاک مربوط به ۳ درصد نانوسیلیس و ٤ درصد آهک است. با توجه به بیشینه‌ی مقدار چسبندگی برای نمونه‌های پژوهش این درصدها به عنوان درصدهای بهینه در نظر گرفته می‌شوند (شکل ٦).

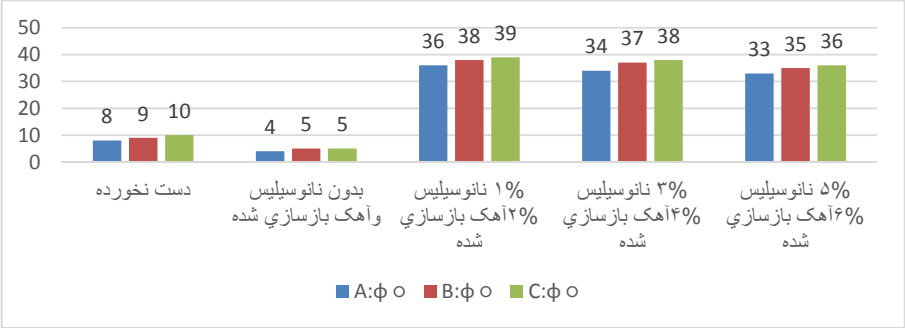


شکل ٦. نمودار خطی مقادیر چسبندگی – نانو سیلیس، آهک

در جدول ٦. زاویه اصطکاک داخلی و شکل ۷. نمودار زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها تغییرات میزان زاویه اصطکاک داخلی را برحسب درصد نانوسیلیس و آهک نشان می‌دهد همانطوری که در نمودار مشخص است نمونـه بـا ۱٪ نـانو و۲٪ آهـک بیشـترین زاویه اصطکاک را داراست و به‌عنوان درصد بهینه انتخاب می‌گردد.

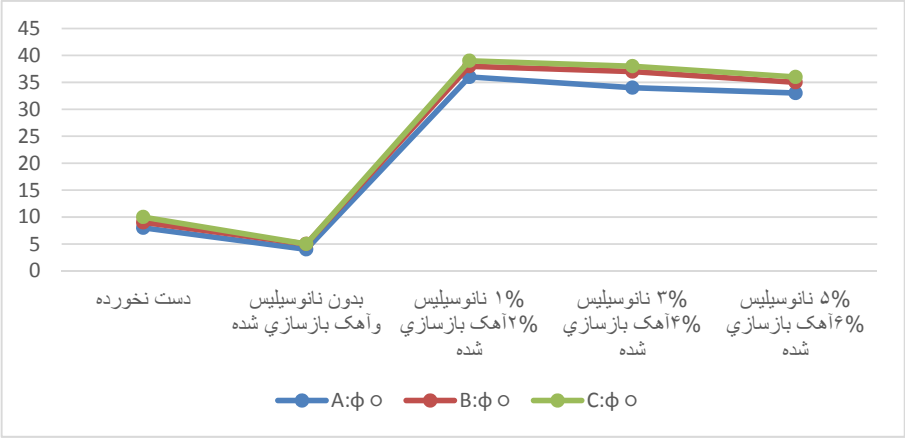
جدول ٦. زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها

نوع نمونه	A:φ°	B:φ°	C:φ°
دست نخورده	8	9	10
بدون نانوسیلیس وآهک بازسازی شده	4	5	5
۱٪ نانوسیلیس ۲٪ آهک بازسازی شده	36	38	39
۳٪ نانوسیلیس ٤٪ آهک بازسازی شده	34	37	38
۵٪ نانوسیلیس ٦٪ آهک بازسازی شده	33	35	36



شکل ۷. نمودار زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها

در شکل ۹. نمودار خطی زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها آورده شده است.

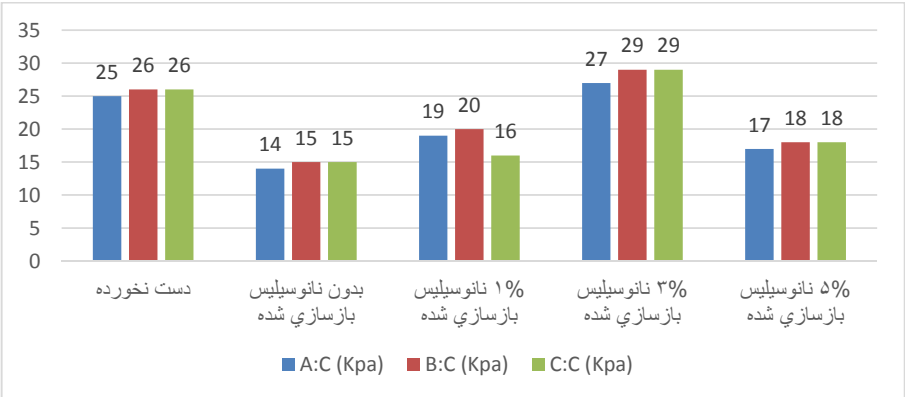


شکل ۹. نمودار خطی زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها

جهت ارزیابی تاثیر نانوسیلیس بدون حضور آهک آزمایش با ا الی ۵ درصد نانوسیلیس به صورت نمونه‌های بازسازی شده مورد آزمایش قرار گرفتند که نتایج آن در جدول ۷. مقادیر چسبندگی نمونه های حاوی نانوسیلیس (بدون آهک) مشاهده می‌شود. در شکل ۸. نمودار چسبندگی نمونه‌های حاوی میکروسیلیس (بدون آهک) نمودار میله‌ای مقادیر بدست آمده نمایش داده شده است. اکنون با بهره‌بردن از اطلاعات مقادیر چسبندگی همراه با نانو سیلیس و آهک به مقایسه مقادیر هر کدام از داده‌های دست یافته‌ی پژوهش می‌پردازد.

جدول ۷. مقادیر چسبندگی نمونه های حاوی نانوسیلیس (بدون آهک)

نوع نمونه	A:C (Kpa)	B:C (Kpa)	C:C (Kpa)
دست نخورده	25	26	26
بدون نانوسیلیس بازسازی شده	14	15	15
۱٪ نانوسیلیس بازسازی شده	19	20	16
۳٪ نانوسیلیس بازسازی شده	27	29	29
۵٪ نانوسیلیس بازسازی شده	17	18	18

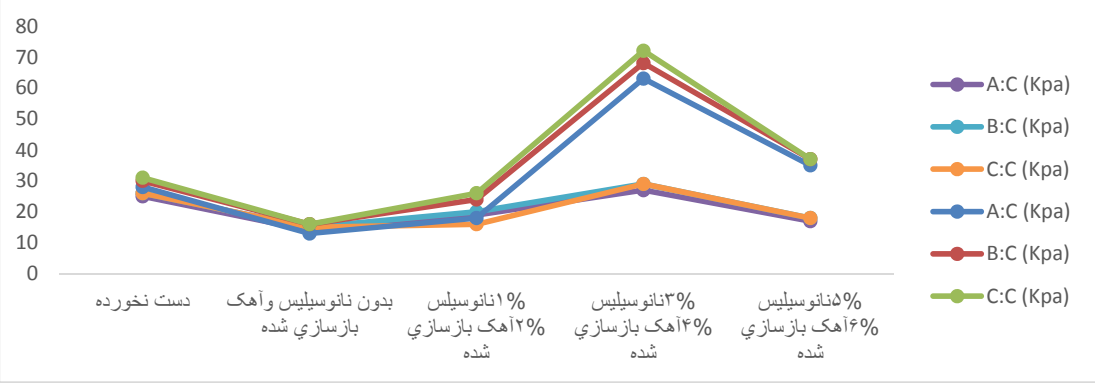


شکل ۸. نمودار چسبندگی نمونه‌های حاوی میکروسیلیس (بدون آهک)

به منظور نشان دادن رابطه و مقایسه حضور آهک در میزان چسبندگی در کنار میکروسیلیس در شکل۱۱. مقایسه مقادیر چسبندگی میکروسیلیس-آهک و میکروسیلیس (بدون آهک) آورده شده است. از شکل۱۱. مقایسه مقادیر چسبندگی میکروسیلیس-آهک و میکروسیلیس (بدون آهک) نتیجه می‌گیریم که افزایش بیش از ۳٪ نانو سیلیس باعث کم شدن چسبندگی شده یا به‌عبارتی درصدهای بالای این ماده تاثیر چندانی در تغییر پارامتر های مقاومت برشی ندارد. همچنین می‌توان چنین نتیجه گرفت که، نانوسیلیس نیاز به یک ماده فعال کننده مثل آهک (تبادل کاتیونی) دارد که در این نمودار به خوبی نمایش داده شده است.

با استفاده از جدول ۵. مقدار چسبندگی خاک– نانو سیلیس، آهک و

جدول ٦. زاویه اصطکاک داخلی که این نتایج از آزمایش برش مستقیم در شکل ٦ و شکل ترسیم شده است، می‌توان چنین نتیجه گرفت که با اضافه کردن آهک به خاک موجب می‌شود تا تبادل کاتیونی میان کلسیم اکسید موجود در آهک و نانوسیلی موجود در سیلیس، ذرات رس به یکدیگر نزدیکتر شده ودر اثر این فعل وانفعالات ذرات نانو باتوجه به سطح ویژه بالای خود و بار سطحی که دارند باعث فعل و انفعالات بین ذره‌ای شده و باعث میل ترکیبی بیشتر و سریعتر با آب، خاک رس و نهایتاً موجب تغییراتی در میزان تخلخل، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی ودیگر پارامترهای خاک رس می‌شود. بدیهی است درصدهای بالای نانو سیلیس شکل نه تنها تاثیر چندانی در تغییر خصوصیات مقاومتی خاک نداشته بلکه باعث کاهش مقاومت برشی خاک نیز می‌گردد. با توجه به گران بودن نانوسیلیس این مورد نقطه مثبتی برای استفاده از درصدهای کم این ماده گران قیمت در اصلاح و بهسازی خاک می‌باشد و نیز قابل توجیه اقتصادی برای یک پروژه می‌تواند باشد.



شکل۱۱. مقایسه مقادیر چسبندگی میکروسیلیس-آهک و میکروسیلیس (بدون آهک)

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه های مختلف مشخص گردید با افزودن ۳٪ نانو سیلیس و٤٪ آهک برای پارامتر چسبندگی و با افزودن ۱٪ نانو سیلیس و۲٪ آهک برای پارامتر زاویه اصطکاک داخلی مقادیر بهینه بودند. اضافه نمودن نانوسیلیس به تنهایی تاثیر چندانی در پارامترهای مقاومت برشی نداشته و نیاز به ماده فعال‌کننده‌ای مثل آهک دارد. با افزودن ۱٪ نانوسیلیس و۲٪ آهک برای پارامتر نشانه خمیری، عدد فعالیت و شاخص تراکم از رابطه تجربی اسکمپتون بهینه شد. در پارامترهایی نظیر نشانه استحکام، شاخص تراکم از رابطه تجربی اسکمپتون و نشانه خمیری از روی نمودارها به خوبی مشخص است که با اضافه کردن نانوسیلیس توام با آهک بیشتر، روند پایین آورنده پارامترهای فوق برقرار است. با توجه به یکسان بودن نشانه روانی برای درصدهای مختلف نانو سیلیس و آهک در درصد رطوبت حدروانی (۲۵ ضربه در منحنی جریان) می‌توان چنین نتیجه گرفت که نشانه روانی مستقل از سایر پارامترهاست و به رطوبت محل ساختگاه وابسته است. مقدار مساوی با عدد یک پارامتر فوق نشان دهنده‌ی این است که رطوبت خاک در محل ساختگاه درآستانه رطوبت حد روانی

است. عامل کوتاه زمان ۲٤ ساعته برای به عمل‌آوری خاک اصلاح شده با نانوسیلیس وآهک برای پروژه‌هایی که با نیاز فوری به سرعت اجرا دارند سودمند است. در این پژوهش عامل اصلی افزایش پارامترهای خمیری و مرتبط با آن به ساخت نمونه‌های یکسان و زمان به عمل‌آوری آنها و ترکیب بهینه نانوسیلیس وآهک با هم دارد. تاثیر بهینه نانو سیلیس در درصدهای پایین حدود ۱ الی ۳ ٪ بر روی خاک مورد آزمایش در مدت زمان نسبتاً کوتاه به عمل آوری حدود ۱۸الی ۲٤ ساعت بدست آمد. علت اصلی تاثیرات فوق بر پارامترهای مختلف آزمون‌ها تاثیر توام نانوسیلیس و آهک به دلیل تبادل کاتیونی میان کلسیم اکسید (CaO) موجود در آهک و دی اکسید سیلیسیم- سیلیس- (Sio_2) موجود در نانوسیلیس بوده که، ذرات رس به یکدیگر نزدیکتر شده ودر اثر این فعل و انفعالات ذرات نانو باتوجه به سطح ویژه بالای خود، نانو تخلخل و بار سطحی که دارند باعث فعل و انفعالات بین ذره‌ای شده و باعث میل ترکیبی با آب، خاک رس و نهایتاً موجب تغییراتی از نظر فیزیکی در میزان تخلخل، جذب رطوبت، حد روانی، حد پلاستیک و دیگر پارامترهای مرتبط با پلاستیسیته خاک‌رس (مانند، فعالیت رس، نشانه استحکام و رابطه تجربی شاخص تراکم اسکمپتن)، همچنین موجب تغییر در پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی می‌شود.

٦- مراجع

-ترابی کاوه، مهدی و حیدری، علی (۱۳۹۸). ارزیابی ویژگی‌های مهندسی خاک‌های مارنی تثبیت شده توسط آهک و نانوکامپوزیت (مطالعه موردی: خاک مارنی منطقه سنقر). *نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران*، ۱۲(۲)، ٦۹-۵۵.

-عساکره، عادل، امیری، محمد، و زارعی، حلیمه (۱۳۹۸). مطالعه ریزساختاری تثبیت خاک مارن جنوب با استفاده از آهک و نانوسیلیس. *مهندسی عمران (فنی و مهندسی مدرس)*، ۱۹(۳)، ۱۲۲-۱۱۱.

-فخاریان، هوتن و بهادری، هادی و پیرخراطی، حسین (۱۳۹۲). تاثیر ژل میکروسیلیس در تثبیت خاک مارن، *هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران*، زاهدان.

-امیری، آرش، عساکره عادل و آتشپوش حسین (۱۳۹۹). بررسی مقاومت و ساختار خاک‌های مارنی تثبیت شده با سیمان و نانوسیلیس، *نشریه زمین شناسی مهندسی جلد چهارم*، شماره ۱، *بهار*. ۵۲-۲۹.

-عساکره، عادل، امیری، محمد، و بحرینی، ریحانه السادات (۱٤۰۰). بررسی بزرگ ساختاری و ریزساختاری تاثیر آب دریا بر فرآیند تثبیت خاک‌های رسی با آهک و نانوسیلیس. *مهندسی عمران امیرکبیر (امیرکبیر)*، ۵۳(۲)، ٦۸٦-٦۷۵.

-Ismeik, M., Shaqour, F., & Hasan, S. E. (2021). Geotechnical evaluation of clayey soils amended with cement kiln dust during freeze-thaw cycling. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(19), 1-14.

-Mirzababaei M, Karimiazar J, Sharifi Teshnizi E, Arjmandzadeh R, Bahmani SH. Effect of Nano-Additives on the Strength and Durability Characteristics of Marl. *Minerals*. 2021; 11(10):1119.

-Kakavand, A., & Dabiri, R. (2018). Experimental study of applying colloidal nano Silica in improving sand-silt mixtures. *International Journal of Nano Dimension*, 9(4), 357-373.

-Ali Ghorbani, Hadi Hasanzadehshooiili, Mostafa Mohammadi, Fariborz Sianati, Mahdi Salimi, Lukasz Sadowski, Jacek Szymanowski (2019). Effect of Selected Nanospheres on the Mechanical Strength of Lime-Stabilized High-Plasticity Clay Soils", Advances in Civil Engineering, Vol. Article ID 4257530.

-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.

-Khemissa Mohamed, Mahamedi Abdelkrim, 2014, Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay Applied Clay Science Publisher: *Elsevier* .

-Charles Lucian. (2012). Stress-Strain Behaviours of Two Stage Lime-Cement Treated Expansive Soils. J. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*. 4405-4409.

-Azadegan.Omid.Yaghoubi, Javad.Pourebrahim, G.R (2010). Effect of Completely Dried Materials in Natural Condition on Mechanical Properties of Lime/Cement Treated Soils. (EJGE).

Evaluation of Improving the Resistance of Marl Soils Stabilized With Nanosilica by Cement and Lime (Case Study: Marl Soil around Kazeron City)

Sayyed Yaghoub Zolfegharifar, Department of Civil Engineering and Architecture, Yasuj, C., Islamic Azad University, Yasuj, Iran.
Mohammad Naeimi, Department of Civil Engineering, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran.
Zarir Salehpourservak, Department of Civil Engineering and Architecture, Yasuj, C., Islamic Azad University, Yasuj, Iran.

E-mail: sy.zolfegharifar@iau.ac.ir

Received: January 2025- Accepted: April 2025

ABSTRACT
In today's competitive world, chemical soil improvement using lime and nanosilica has been used for long-term improvement of geotechnical properties as well as stabilization process. The purpose of this research is to investigate the microstructural characteristics and geotechnical characteristics of marl soils and provide a solution to improve the properties and engineering characteristics of these soils. In this regard, the effect of lime addition and the combination of lime and nanosilica on the microstructural and geotechnical characteristics of the soil was investigated. After taking the marl soil samples around Kazerun city, the samples were transferred to the laboratory in order to determine the physical, chemical and mechanical properties and classification of the soil, Etterberg limits, density and unconfined compressive strength on the base soil. The stabilization of marl soil by adding lime and nanocomposite with different percentages of soil dry weight was evaluated by uniaxial strength test. The required samples were prepared with different proportions of cement and microsilica in optimal humidity and after curing, they were subjected to unconfined compressive strength (UCS), California bearing ratio (CBR) and pH tests. The Etterberg limit test was performed after several days of curing on different soil-lime-nanosilica combinations. The results of the experiments showed that by adding 3% nanosilica and 4% lime for the adhesion parameter, and also by adding 1% nanosilica and 2% lime for the internal friction angle parameter, the optimum value of the additive was obtained. The presence of nanosilica in the soil-lime system led to the uniform distribution of hydrated calcium silicate compounds in the soil.

Keywords: Clay, Marl, Lime, Nanosilca, Cement