

ارزیابی ویژگی‌های مهندسی خاک‌های مارنی تثبیت شده توسط آهک و نانوکامپوزیت (مطالعه

موردی: خاک مارنی منطقه سنقر)

مهدی ترابی کاوه*^۱، علی حیدری^۲

پذیرش مقاله: ۹۸/۰۵/۱۳

دریافت مقاله: ۹۷/۱۲/۲۶

چکیده

وجود خاک‌های مارنی مشکلات متنوعی را در اجرای پروژه‌های مهندسی ایجاد می‌نماید. بنابراین موضوع تثبیت این خاک‌ها با استفاده از افزودنی‌های مختلف به یکی از مهمترین موضوعات پژوهشی حوزه ژئوتکنیک تبدیل شده است. از این رو این پژوهش با هدف بررسی اثر بهبود بخشی آهک و نانوذرات بر روی رفتار مهندسی خاک‌های مارنی اطراف شهر سنقر انجام شده است. بدین صورت که پس از اخذ نمونه‌های خاک مارنی از محل مورد مطالعه، نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شده و ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی آنها قبل و بعد از تثبیت توسط افزودنی آهک و نانوکامپوزیت مورد بررسی قرار گرفته است. براساس نتایج بدست آمده، با افزایش درصد وزنی آهک، مقدار شاخص خمیری خاک در اثر واکنش‌های پوزولانی کاهش پیدا کرده است. همچنین با افزایش مقادیر درصد وزنی آهک و مدت زمان عمل‌آوری، مدول الاستیسیته و مقاومت تک محوری روند افزایشی نشان داده اند. نتایج نشان داد که با افزایش میزان نانوکامپوزیت تا مقدار ۴ درصد بدلیل پر شدن فضای خالی خاک توسط ذرات نانوکامپوزیت، مقاومت فشاری خاک افزایش یافته است و با عبور از این مقدار و در نتیجه‌ی فلوکوله شدن ذرات، روند کاهش مشاهده می‌شود. در نهایت مشخص گردید که اضافه کردن آهک اثربخشی بیشتری در مقایسه با نانوکامپوزیت در بهبود ویژگی‌های مقاومتی داشته است.

کلید واژه‌ها: خاک مارنی، تثبیت خاک با آهک و نانوذرات، ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی.

۱. عضو هیات علمی گروه زمین‌شناسی، دانشگاه یزد، یزد m.torabikaveh@yazd.ac.ir

۲. کارشناس فنی شرکت عمرانی چاوش راه بنا

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

نداشته است. علاوه بر روش‌های تثبیت سنتی، برخی از محققین از تثبیت کننده‌های صنعتی از قبیل خاکستر، هیدروکسید منیزیم و خاکستر پوسته برنج بمنظور تثبیت خاک‌های رسی استفاده کرده‌اند (Basha et al., 2005; Hossain and Mol., 2011). اگرچه در مورد تثبیت خاک‌های مارنی استفاده از این نوع تثبیت کننده‌ها در نتیجه کاهش سریع pH و واکنش‌های پوزولانی، محدود می‌گردد (Al-Amoudi et al., 2010; Chen and Lin., 2009). همچنین استفاده از انواع نانو ذرات در تثبیت خاک‌های رسی و حتی ماسه ای (Kermani et al., 2018) در سال‌های اخیر رایج شده است. در این میان نانوذره رس بدلیل سایز کوچک، ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد و واکنش پذیری سریع و کامل به یکی از رایج‌ترین ذرات نانو مورد استفاده در بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک‌های رسی تبدیل شده است (Calbi-Floody M., 2009). اوحدی و بخش‌علیپور (Ouhadi and Bakhshalipour., 2010) اثر نانورس‌ها در رفتار خاک‌های فروریزی را مورد بررسی قرار دادند. در پژوهش آنها ذرات بتونیت طبیعی با استفاده از یک دستگاه به ذرات نانومقیاس تبدیل شدند. نتایج پژوهش مذکور نشان داد که استفاده از ذرات بتونیتی در حد نانو در مقایسه با بتونیت طبیعی، به میزان زیادی پتانسیل فروریزش خاکها را کاهش می‌دهد. در پژوهشی دیگر محمد-زاده ثانی و همکاران (۱۳۸۹) آزمایش‌های حدود آتربرگ و مقاومت برشی مستقیم را بر روی نمونه‌های ماسه رسی با درصد وزنی متفاوت از نانو رس (۰/۵، ۱ و ۲ درصد) انجام دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که افزودن نانورس موجب کاهش شاخص پلاستیسیته و افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها می‌گردد. طاها و طاها (Taha and Taha., 2012) اثر نانو ذرات رس را بر روی رفتار تورمی خاک‌های رسی بررسی کردند. آنها گزارش کردند که با افزودن ذرات نانورس هر دو مقدار کرنش تورمی و کرنش انقباضی کاهش نشان می‌دهند. در نتیجه میزان ترک‌خوردگی در سطح نمونه‌های مترآم شده بدون هیچ گونه کاهش در هدایت هیدرولیکی، کاهش می‌یابد. مجید و همکاران (Majeed et al., 2014) در پژوهشی تثبیت

مارن‌ها از نهشته‌های رسوبی هستند که به طور کلی از کانی-های رسی و کربنات کلسیم با نسبت‌های مختلف (معمولاً بین ۳۵-۶۵٪) تشکیل شده‌اند (Tucker., 2009) و با افزایش و کاهش آب تغییر حجم می‌دهند. وجود کانی‌های رسی با ساختار شیمیایی متفاوت در ترکیب مارن‌ها استعداد آن‌ها را برای هوازدهی افزایش می‌دهد. خاک مارن با توجه به ویژگی‌هایی که دارد، مشکلات متنوعی را در اجرای پروژه‌های مهندسی ایجاد می‌نماید. تثبیت خاک یک تکنیک رایج در مهندسی عمران محسوب می‌گردد که در ارتباط با بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک‌هایی که دارای پلاستیسیته زیاد، نفوذ پذیری کم و مقاومت مکانیکی پایین هستند، کاربرد دارد (Sol-Sánchez et al., 2016). در بسیاری از مناطق جهان از آهک یا سیمان برای مقاوم سازی خاک‌های مارنی به عنوان روشی کارا و ساده استفاده می‌شود. فرآیند آبگیری ناشی از استفاده از این نوع تثبیت‌کننده‌ها منجر به تبادل کاتیونی و تجمع ذرات خاک می‌گردد. در نتیجه این فرآیند، یک خاک با توزیع اندازه ذرات درشت‌تر، پلاستیسیته کمتر و نفوذپذیری بیشتر ایجاد می‌گردد (Lin et al., 2007). از این رو پژوهش‌های فراوانی در این زمینه صورت گرفته است (Dang et al., 2016; Garzón et al., 2016; Harichane et al., 2018; Modarres and Nosoudy., 2015; Roshan Bakht et al., 2015; Yi et al., 2015). در یکی از مطالعات، جسمانی و همکاران (۱۳۸۷) در مقاله‌ای به بررسی ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک کویر میقان پس از اصلاح و تثبیت آن به کمک افزودن آهک پرداختند. نتایج نشان داد که درصد وزنی بین ۷ الی ۹ درصد آهک به نحو مناسبی موجب کاهش شاخص خمیری و بهبود و ارتقای مقاومت خاک شده در حالیکه درصد وزنی بین ۱ الی ۳ درصد موجب بهبود ویژگی‌های تراکمی خاک می‌گردد. همچنین برخلاف نتایج تحقیقات گذشته (Rogers., 2001; Curtin and Syers., Shi., 2003) (2001) که افزودن آهک به خاکها، مقاومت تک محوری آنها را تا ۴ برابر افزایش می‌داد، در این پژوهش افزودن آهک رشد قابل توجهی را در مقاومت تک محوری خاک به همراه

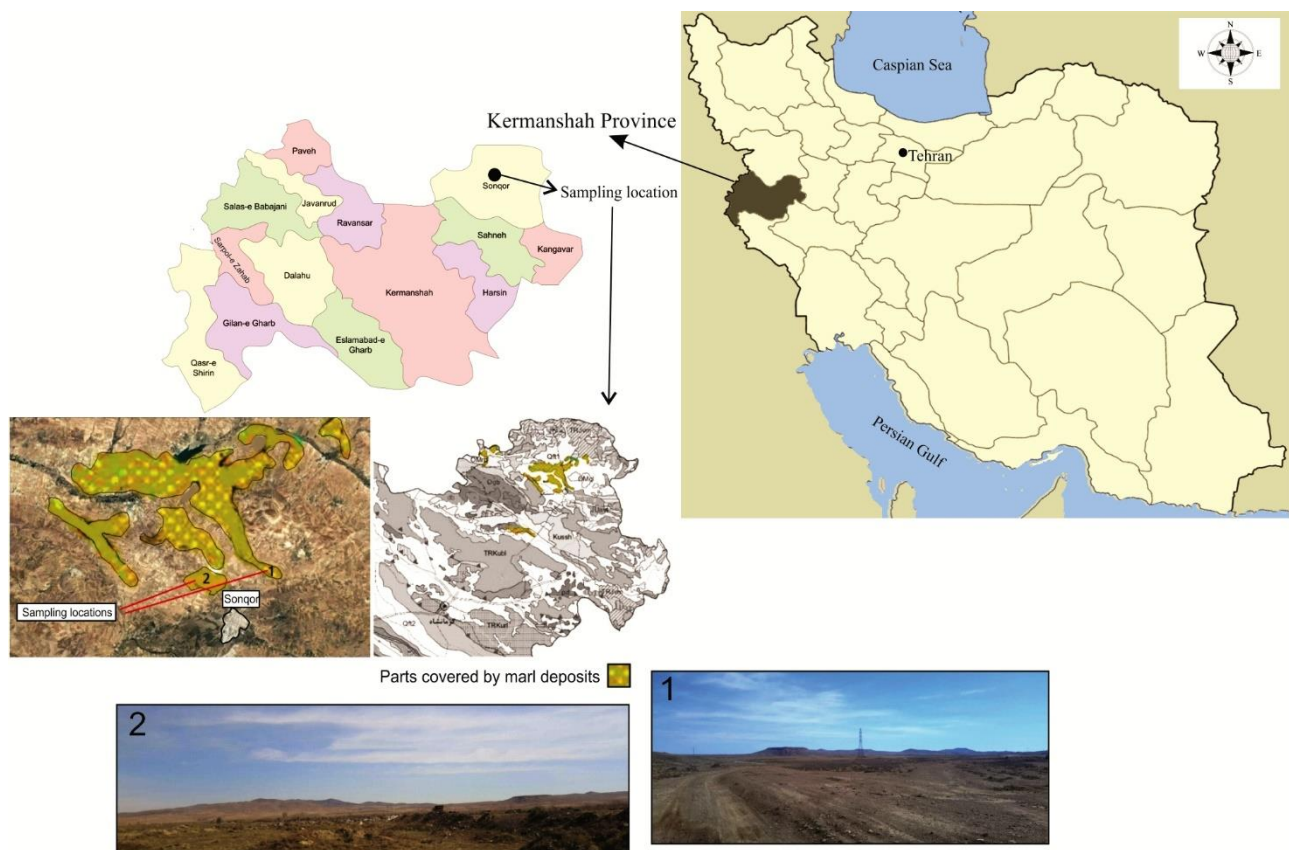
بخشی مواد مورد استفاده از طریق انجام آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد و در گام بعدی نتایج بدست آمده با هم مقایسه می‌گردند.

۲. مواد و روش‌ها

با توجه به پراکندگی خاک‌های مارنی در منطقه سنقر، خاک این شهر به عنوان نمونه مورد مطالعه انتخاب شده است و سپس نمونه‌هایی از خاک این منطقه اخذ شده و به آزمایشگاه منتقل گردیده است. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی محل برداشت خاک مارنی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بمنظور نمونه برداری ابتدا دو منطقه انتخاب شده و از هر منطقه نمونه‌هایی برای انجام آزمایشات اخذ شده است. بررسی‌های صحرائی نشان می‌دهد که ضخامت خاک سست (خاک گیاهی) در منطقه از حداقل ۱۰ سانتی متر شروع شده و به ضخامت‌های بیشتر از ۳۰ سانتی‌متر هم می‌رسد. لذا به منظور نمونه‌گیری از خاک مورد مطالعه، نمونه‌های لازم تا عمق ۱ متری گردآوری شده‌اند. نمونه‌های خاک داخل کیسه ریخته شده و با نصب دو برچسب یکی در داخل و دیگری در خارج شماره گذاری شده و به آزمایشگاه منتقل شده‌اند. در گام بعدی، با استفاده از یکسری آزمایش‌های آزمایشگاهی خصوصیات فیزیکی (دانه بندی، هیدرومتری، حدود آتبرگ، درصد رطوبت بهینه، حداکثر دانسیته خشک) شیمیایی (درصد کربنات کلسیم، XRD و XRF) و مکانیکی (مقاومت تک محوری و مدول الاستیسیته)، خاک مارن مذکور مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به هدف پژوهش، برای تثبیت خاک مارن منطقه از آهک و نانو ذرات استفاده شده است. در مرحله بعد تمامی آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی مجدداً بر روی خاک مارن تثبیت شده، انجام گرفته است. نهایتاً میزان اثر بخشی مواد افزودنی مورد استفاده بر روی ویژگی‌های خاک مورد مطالعه، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

خاک‌های رسی را با استفاده از نانو ذرات مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزودن نانو ذرات، بهبود قابل ملاحظه‌ای در مقادیر دانسیته خشک حداکثر، شاخص پلاستیسیته، انقباض خطی و مقاومت فشاری تک محوری حاصل گشته است. همچنین مشخص گردید که این بهبود ویژگی‌های مهندسی تا میزان نانو ذره ۱ درصد حاصل می‌گردد و با عبور از این مقدار، ویژگی‌های مذکور دچار افت می‌شوند. آنها گزارش کردند که افزودن نانو ذرات حتی در مقادیر بسیار ناچیز موجب بهبود ویژگی‌های خاک‌ها می‌گردد. در پژوهشی دیگر هوآنگ (Huang, 2011) بمنظور کنترل تورم خاک رس از نانو ذرات استفاده کرد. او نتیجه‌گیری کرد که نیروهای سطحی نانوذرات مانند نیروهای وان در والس و الکترواستاتیک به پایدارسازی خاک‌های رسی در برابر تورم و فرسایش، کمک می‌کنند. خالد و همکاران (Khalid et al., 2015) نیز در پژوهشی گزارش کردند که اضافه کردن ۳ درصد وزنی نانورس به خاک رس موجب ۱۷ درصد کاهش در شاخص خمیری و افزایش قابل توجه ویژگی‌های مقاومتی مانند مقاومت فشاری و مقاومت برشی می‌گردد. چنگیزی و حداد (Changizi and Haddad, 2017) در پژوهشی از نانوکامپوزیت حاصل از اختلاط نانورس و فیبر شیشه تا مقادیر ۳ درصد وزنی (۱/۵ درصد فیبر و ۱/۵ درصد نانورس) برای بهبود پارامترهای مقاومت برشی استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که افزودن نانوکامپوزیت مذکور، باعث افزایش چشمگیر مقاومت فشاری نامحدود خاک می‌گردد.

نهشته‌های مارنی در ایران نیز گسترش قابل توجهی دارند. این امر مشکلات فراوانی را در پروژه‌های عمرانی اجرا شده یا در حال اجرا به ویژه در مناطق غربی، جنوب غربی و مرکزی ایران، به دلیل وجود فراوان این نهشته‌ها، به همراه داشته است. به همین منظور ضرورت بهینه‌سازی این خاک‌ها با روش‌های متنوع و کم هزینه بیش از گذشته می‌باشد. در این رابطه، پژوهش حاضر از دو نوع تثبیت کننده شامل آهک (به عنوان اقتصادی‌ترین و ساده‌ترین روش) و نانوذرات بمنظور بهسازی خاک مارن منطقه سنقر استفاده نموده است. میزان اثر



شکل ۱. خاک مارنی منطقه‌ی مورد مطالعه و موقعیت و پراکندگی آن در نقشه جغرافیایی.

همچنین مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های دست نخورده و تثبیت شده با استفاده از استاندارد (ASTM, 2006) ASTM اندازه‌گیری شده‌اند. بدین صورت که خاک مارن یک مرتبه بدون افزودنی و یک مرتبه با افزودنی مخلوط شده و با درصد رطوبت‌های مختلف عمل‌آوری گردیده است. جهت همانند سازی خاک دست خورده با خاک دست نخورده، خاک به روش تراکم استاندارد (ASTM D698) و در درصد رطوبت‌های مختلف ریمولد شده است. سپس توسط نمونه‌گیر مخصوص تک محوری با قطر ۴۸ میلی‌متر و طول ۹۵ میلی‌متر از خاک ریمولد شده نمونه‌گیری انجام شده است. نمونه در دستگاه اندازه‌گیری مقاومت تک محوری تحت بار با نرخ بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفته است. تغییرات مقدار بار وارده و کرنش محوری نمونه‌ها ثبت شده و سپس با رسم منحنی تنش - کرنش مقدار مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیسیته هر نمونه اندازه‌گیری شده است.

۱-۲. آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی
 به منظور بدست آوردن درصد رطوبت خاک از استاندارد (ASTM D2216-10, 2010) ASTM استفاده شده است. همچنین آزمایش حدود اتبرگ با استفاده از استاندارد (ASTM D4318-17e1, 2017) ASTM انجام و رده‌ی نمونه در سیستم طبقه بندی متحد (USCS) براساس استاندارد (ASTM D2487-17, 2017) ASTM مشخص گردیده است. برای دستیابی به ترکیب شیمیایی خاک مارن منطقه مورد مطالعه از آزمایش فلورسانس اشعه^{۳۱} پی ایکس (XRF) (با استفاده از دستگاه XRF مدل PW2558.00) و جهت تشخیص نوع کانی‌های خاک مورد مطالعه، آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) (با استفاده از دستگاه Philips مدل XRD) استفاده گردیده است. همچنین برای تعیین درصد کربنات کلسیم از آزمون کلسی متری براساس استاندارد (ASTM D4373-14, 2014) ASTM استفاده شده است.

آوری تحت دمای ۴۵ درجه سانتی گراد صورت پذیرفته است. بعد از انتخاب نمودن خاک مورد مطالعه آزمایش‌های حدود آتربرگ و خصوصیات فیزیکی بر روی هر دو خاک مارن معمولی و بهسازی شده انجام شده است.

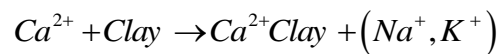
۳-۲. بهسازی خاک مارن با استفاده از نانوکامپوزیت

در این پژوهش، اثر سازگارکننده ها و خاک رس های اصلاح شده مختلف روی ویژگی‌های گوناگون نانوکامپوزیت‌های پلی پروپیلن/رس) تهیه شده با روش مخلوط مذاب (مورد بررسی قرار گرفته تا بهترین ترکیب نانو کامپوزیت پلی پرو-پیلن را در جهت تثبیت خاک مارن انتخاب گردد. به منظور تهیه نانوکامپوزیت‌ها از پلی پروپیلن پایه الیاف با شاخص جریان مذاب (۱۵gr/۱۰min)، دانسیته 0.91 gr/cm^3 ، نقطه ذوب 160°C محصول شرکت پتروشیمی اراک با نام تجاری P10800 به عنوان ماتریکس و نانو رس به عنوان پرکننده استفاده شده است. از اولیگومر PP-g-MA محصول شرکت هنام (Honam) کشور کره جنوبی نیز به عنوان پایدار کننده بهره گرفته شده است. نانو ذره رس مصرفی از نوع نانورس آلی لایه‌ای با نام تجاری کلویزیت 905A محصول شرکت Southern Clay کشور امریکا می‌باشد. این نانورس یک مونت موریلونیت اصلاح شده است که از آن به منظور بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی پلیمرها استفاده می‌شود. برای تهیه ی نانو کامپوزیت از روش مخلوط مذاب مستقیم استفاده شده است. به این منظور، پلی پروپیلن (P10800) با درصد‌های وزنی مختلف نانو رس مونت موریلونیت (اصلاح شده شیمیایی، C15A) و اولیگومر PP-g-MA در مخلوط کن در شرایط عملیاتی (دمای ۱۷۵ درجه سانتیگراد، چرخش 70 rpm و مدت زمان ۱۰ دقیقه) مخلوط شده اند و بعد از ۱۰ دقیقه مخلوط به دست آمده در دمای اتاق سرد شده است (جدول ۱).

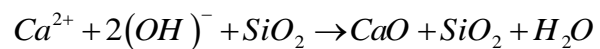
۲-۲. بهسازی خاک مارن با استفاده از آهک

اصلاح خاک با آهک به دلیل موثر و اقتصادی بودن آن روشی متداول برای بهبود خصوصیات مقاومتی خاک به ویژه خاک‌های مارنی، به شمار می‌رود (Seco et al., 2011). از این رو مطالعات فراوانی در جهت تاثیر افزودن آهک بر بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک صورت گرفته است. به طور کلی افزایش آهک به خاک موجب تولید و بروز فعل و انفعالاتی در خاک می‌گردد که از نظر جنبه های مهندسی ژئوتکنیک عملاً بهبود کیفیت و مشخصه های خاک را در پی خواهد داشت (Hausmann., 1990). واکنش های انجام شده در خاک بدلیل حضور آهک به شرح ذیل می‌باشند (نقل از اوحدی و همکاران ۱۳۹۵).

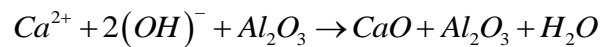
۱) واکنش تبادل کاتیونی



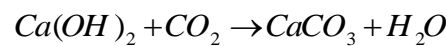
۲) واکنش لخته شدن (فولوکوله شدن)



۳) واکنش پوزولانی



۴) واکنش کربناسیون



به منظور انجام بهسازی با آهک، نمونه ای از خاک مارن با رطوبت بهینه ۲۶ درصد و حداکثر دانسیته ی خشک $1/90$ گرم بر سانتی متر مکعب همراه با ۶ و ۱۰ درصد وزن خشک خاک از آهک در میزان رطوبت های متناسب با درجه اشباع صد درصد متناظر با میزان آهک مصرفی تهیه شده است. جهت تسریع واکنش‌های شیمیایی بین خاک و آهک، عمل-

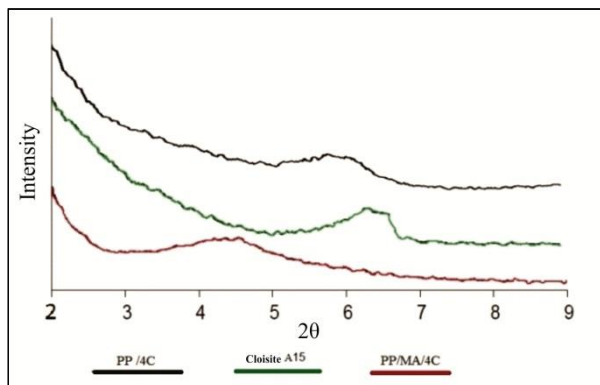
فاصله فک‌های ۵۰۰ میلیمتر و سرعت حرکت فک‌های ۳۰۰ میلیمتر بر دقیقه اندازه‌گیری شده است. برای افزایش دقت نتایج نیز اندازه‌گیری هر نمونه ۳ بار تکرار شده و مقادیر ارائه شده، میانگین نتایج آن‌ها می‌باشد تا بدین شکل درصد خطا کاهش داده شود.

جدول (۱) درصد‌های به کار رفته برای تولید هر ۵ نوع نانو کامپوزیت را در جهت انتخاب بهترین نمونه‌ی آن ارائه می‌دهد. ویژگی‌های نانو کامپوزیت‌های به دست آمده، مانند مقاومت کششی و مدول ینگ بر طبق استاندارد ASTM (ASTM D638., 2014) با دستگاه اینسترون مدل ۴۴۱۱ با

جدول ۱. درصد وزنی به کار رفته درجهت تهیهی نانوکامپوزیت‌های مختلف.

Sample code	Weight percentage of Polypropylene	Weight percentage of Oligomer (PP-g-MA)	Weight percentage of Cloisite A15	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)
PP/MA	85	15	0	34.00	1360
PP/MA/2C	83	15	2	33.90	1354
PP/MA/4C	81	15	4	32.15	1362
PP/MA/6C	79	15	6	31.67	1441
4C/PP	96	0	4	31.74	1332

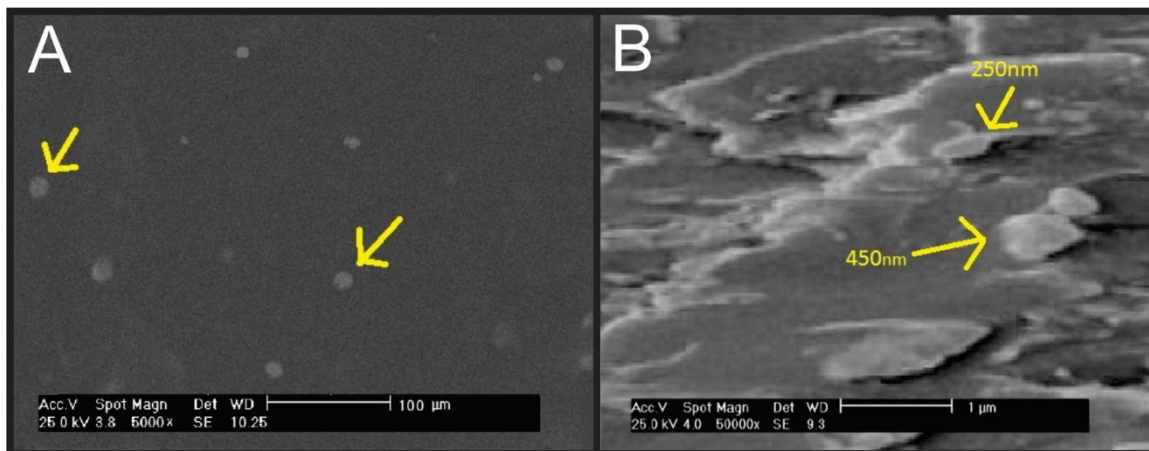
استفاده از این پایدار کننده سبب بالا رفتن فاصله‌ی بین لایه‌های رسی شده که بیانگر اینترکلیت شدن است.



شکل ۲. طیف XRD از نمونه‌های مورد مطالعه.

تصاویر SEM در نمونه PP/MA/4C در فواصل متفاوت در شکل (۳) نشان داده شده است. شکل (۳-ا) بیانگر توزیع مناسب نانو ذرات در ماتریکس پلیمری است. همچنین شکل (۳-ب) توپوگرافی سطح پلیمر PP/MA/4C را نشان داده که سطوح نانو ذرات به شکل سفید و برجسته با توجه به اندازه‌ی آن‌ها در شکل مذکور نمایش داده شده است.

هر دو تکنیک SEM و XRD به عنوان ابزار کاربردی برای ارزیابی ویژگی‌های ساختاری و ریزساختارهای نانوکامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. بطوریکه برای ارزیابی کمی و SEM بمنظور کسب اطلاعات کیفی در ارتباط با نانوکامپوزیت‌ها به کار برده شدند. الگوهای XRD کلونی‌زیت A15، PP/MA/4C و PP/4C در شکل (۲) نشان داده شده است. همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود پیک مشخصاتی کلونی‌زیت A15 در 2θ مساوی ۶/۴۵° قرار دارد در حالیکه پیک 4C/PP/MA به زوایای کوچکتر انتقال می‌یابد (2θ=۴/۷۲°)، که این نشان می‌دهد زنجیرهای پلیمری و مولکولهای PP-g-MA فاصله بین لایه‌ها را در مقایسه با فاصله بین لایه‌ی ای رس اصلاح شده، افزایش می‌دهند و ساختار اینترکلیت شکل می‌گیرد. پیک PP/4C در 2θ مساوی ۵/۹۲° قرار دارد. واضح است که فاصله بین لایه‌ی ای PP/4C، تقریباً مساوی فاصله بین لایه‌ی ای کلونی‌زیت A15 می‌باشد. این بیانگر عدم توزیع نانوذرات در ماتریکس پلیمری می‌باشد چون PP-g-MA نقش پایدار کننده را بازی می‌کند و حال آنکه PP/4C فاقد PP-g-MA می‌باشد (شکل ۲). به عبارتی



شکل ۳. تصویر A: توزیع مناسب نانو ذرات در ماتریکس پلیمری؛ تصویر B: توپوگرافی سطح پلیمر PP/MA/4C که سطوح نانو ذرات به شکل برجسه و رنگ روشن قابل مشاهده می‌باشند.

نمونه در رده CH قرار می‌گیرد (جدول ۲). میزان کربنات کلسیم (CaCO_3) در نمونه‌های مورد آزمایش نیز برابر ۳۶/۴۷ درصد اندازه گیری شده است. طیف پراش اشعه‌ی ایکس (XRD) برای نمونه مورد مطالعه در شکل (۴) ارائه شده است. براساس منحنی XRD، کانی‌های رسی به عنوان کانی-های اصلی نمونه محسوب می‌گردند و با بررسی مساحت زیر نمودار XRD مشخص گردید که حدود ۶۹ درصد این خاک از کانی‌های رسی تشکیل شده است. در بین کانی‌های تشکیل دهنده بخش رسی، ۴۵ درصد محتوی رسی مربوط به کانی اسمکتیت ($d_{001}=14.2 \text{ \AA}$)، ۱۱ درصد مربوط به کانی کائولینیت ($d_{001}=7.2 \text{ \AA}$) و ۱۳ درصد مربوط به کانی ایلیت ($d_{001}=9.40 \text{ \AA}$) می‌باشد. حدود ۳۱ درصد باقی مانده خاک نیز شامل کانی‌های غیر رسی مانند کوارتز و کلسیت به عنوان کانی‌های فرعی می‌باشد. نتایج آزمایش XRF نیز در جدول (۳) ارائه شده است. درصد بالای سیلیس و آلومینا در نمونه‌ی خاک نشان‌دهنده‌ی وجود کانی‌های رسی می‌باشد (Deer et al., 1997). لذا با توجه به بالا بودن میزان سیلیس و آلومینا در نمونه مورد مطالعه و همچنین نتایج آزمایش XRD، وجود درصد قابل توجه رس در نمونه مورد مطالعه محرز می‌باشد.

بعد از تهیه‌ی نانوکامپوزیت‌ها با ترکیبات متفاوت بهترین نمونه‌ی آنها که در آن نانوذرات توزیع مناسبی در ماتریکس پلیمری داشته اند و امکان لخته شدن آنها کمتر می‌باشد، جهت تثبیت خاک مارن مورد مطالعه انتخاب شده است. بطوریکه نمونه نانوکامپوزیت PP/MA/4C که توزیع مناسبی از نانو ذرات را در ماتریکس پلیمری نشان می‌دهد (شکل ۳) به عنوان نانوکامپوزیت مورد استفاده در این پژوهش، انتخاب شده است. در مرحله بعد از نانو کامپوزیت تهیه شده با درصدهای وزنی مختلف (۲، ۴، ۶ و ۱۰) در جهت تثبیت خاک مارن استفاده شده است. به منظور تعیین تغییرات حدود اثربرگ در اثر اضافه شدن نانوکامپوزیت، تعداد چهار آزمایش با مدت زمان عمل‌آوری متفاوت (۷، ۱۴ و ۲۸ روز) انجام گرفته است. همچنین با انجام آزمایش‌های مختلف تاثیر درصدهای وزنی نانو کامپوزیت پلی پروپیلن/رس بر پارامترهای مقاومتی و مکانیکی خاک مورد ارزیابی قرار گرفته است.

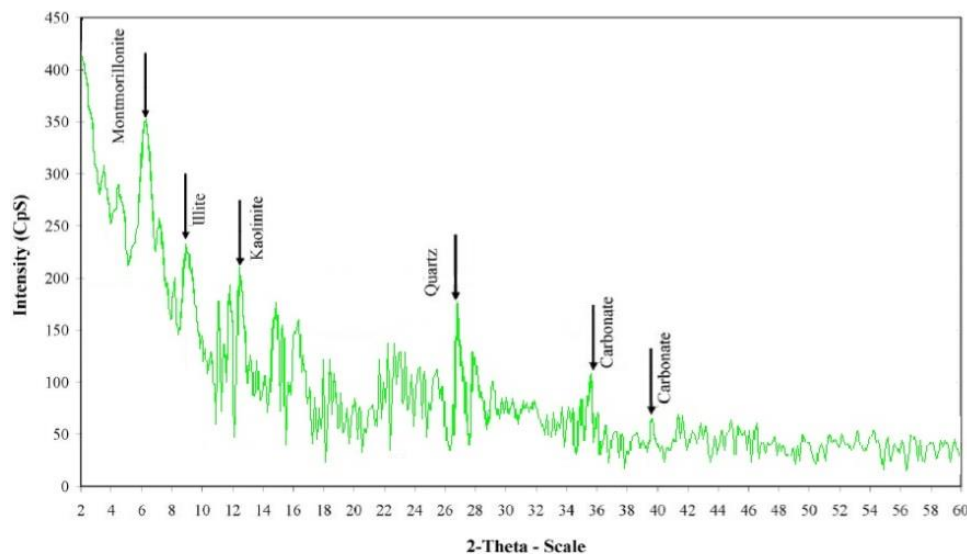
۳. نتایج و بحث و بررسی

۳-۱. خصوصیات فیزیکی خاک مارن مورد مطالعه قبل و بعد از تثبیت

با انجام آزمایش‌های هیدرومتری و حدود اثربرگ رده خاک در سیستم طبقه بندی متحد تعیین شد و مشخص گردید که

جدول ۲. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده برای خاک مارنی مورد مطالعه.

Soil class	(CaCO ₃ %)	pH	Dry unit weight (γ_d) (g/cm ³)	Specific gravity (G _s)	Liquid limit (LL, %)	Plastic limit (PL, %)	Plasticity index (PI, %)	Fine grain percentage age (%)
CH	36.47	8.3	1.90	2.58	58.00	31.0	26.0	96.0



شکل ۴. طیف XRD از نمونه ی خاک مارنی مورد مطالعه.

جدول ۳. نتایج مربوط به آنالیز XRF بر روی نمونه مورد مطالعه.

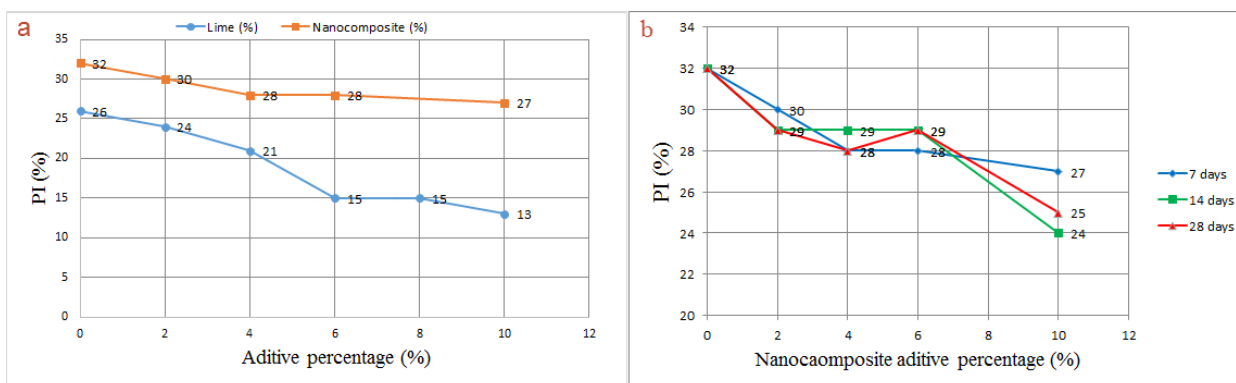
Component	Cl	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
(%)	0.05	2.45	1.84	2.32	27.14	9.10	10.58	41.36

بوده در حالیکه با عبور از این مقدار نرخ افت کاهش می‌یابد. همچنین درصد رطوبت متناظر با درجه اشباع صد در صد و حداکثر دانسیته خشک روند کاهش تدریجی داشته است. با توجه به جایگزینی رس توسط آهک این کاهش تدریجی قابل توجیه است. همچنین بایستی اشاره کرد که افزایش درصد آهک موجب افزایش اسیدیته خاک نسبت به حالت طبیعی شده است (جدول ۴).

جدول (۴) مشخصات خاک مارن مورد مطالعه را در حالت بدون افزودنی و در حالت تثبیت شده با افزودنی آهک ارائه کرده است. براساس نتایج ارائه شده در جدول (۴)، روند کاهش تدریجی در حد روانی (LL)، افزایش تدریجی در حد خمیری (PL) و همچنین کاهش قابل توجه در شاخص خمیری (PI) با افزایش درصد وزنی آهک قابل مشاهده است. شکل (۵a) نیز روند تغییرات PI را با توجه به درصد افزایش آهک برای نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. نکته قابل توجه این است که تا میزان آهک ۶ درصد نرخ افت PI شدید

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های درصد رطوبت، تراکم و pH با درصد‌های متفاوت آهک.

Lime percentage	0	2	4	6	8	10
Optimum moisture (%)	23.8	25.3	26.9	28.4	29.6	30.2
Liquid limit (LL, %)	58	57	56	54	52	50
Plastic limit (PL, %)	31	33	35	39	37	37
Plasticity index (PI, %)	26	24	21	15	15	13
Maximum dry unit weight (γ_{dmax}) (g/cm ³)	1.90	1.88	1.78	1.74	1.72	1.70
pH	8.3	9.10	11.2	12.1	12.28	12.36



شکل ۵. روند تغییر PI با توجه به درصد ماده افزودنی؛ (a) تغییرات PI در برابر درصد آهک و نانوکامپوزیت افزوده شده (مدت

زمان عمل‌آوری ۷ روزه)، (b) تغییرات PI در برابر درصد وزنی نانوکامپوزیت افزوده شده (مدت زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه)

خمیری (PI) می‌گردد. با دقت در نتایج حاصله مشخص می‌گردد که افزودن نانوکامپوزیت تهیه شده به خاک مارن مورد مطالعه باعث تغییر رفتار رس شده است، به نحوی که سبب شده رس آب کمتری جذب نموده و در نتیجه موجب کاهش شاخص خمیری شده است. همچنین جالب توجه است که با افزایش مدت زمان عمل‌آوری تاثیر نانوکامپوزیت افزودنی بیشتر شده و موجب کاهش بیشتر شاخص خمیری می‌گردد (شکل ۵b).

بمنظور بررسی تاثیر نانو ذرات بر روی خاک مارن منطقه‌ی مورد مطالعه پس از انجام آزمایش‌های فیزیکی بر روی نمونه تثبیت نشده که نتایج آن در جدول (۵) ارائه شده است، اثر درصد‌های وزنی مختلف از نانو کامپوزیت پلی‌پروپیلن/رس بر پارامترهای فیزیکی خاک مورد ارزیابی قرار گرفته است. جدول (۶) نیز تغییرات حدود آتبرگ خاک را بعد از اضافه کردن درصد‌های مختلف نانو ذره و تعداد روز عمل‌آوری مختلف (۷، ۱۴ و ۲۸) ارائه می‌دهد. براساس نتایج به دست آمده، افزودن نانوکامپوزیت به خاک، باعث کاهش شاخص

جدول ۵. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده برای خاک مارنی مورد مطالعه.

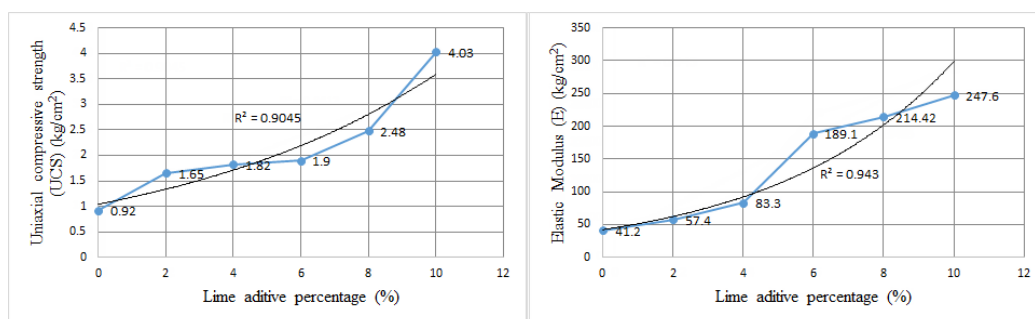
Soil class	(CaCO ₃ %)	pH	Specific gravity (G _s)	Liquid limit (LL, %)	Plastic limit (PL, %)	Plasticity index (PI, %)	Fine grain percentage (%)
CH	37.32	8.5	2.59	31	24	56	98

جدول ۶. مقادیر حدود آتربرگ بدست آمده با توجه به درصد‌های وزنی نانو کامپوزیت پلی پروپیلن/رس.

Atterberg limits	Untreated sample	Nanocomposite percentage											
		2%			4%			6%			10%		
		7 days	14 days	28 days	7 days	14 days	28 days	7 days	14 days	28 days	7 days	14 days	28 days
Liquid limit (LL, %)	56	65	66	67	62	64	65	60	62	63	59	58	59
Plastic limit (PL, %)	24	35	37	38	34	35	37	32	33	34	32	34	34
Plasticity index (PI, %)	32	30	29	29	28	29	28	28	29	29	27	24	25

مدول الاستیسیته نمونه‌های مورد مطالعه را در برابر درصد آهک افزودنی نمایش می‌دهد. بر مبنای این نمودارها ارتباط معناداری بین درصد آهک و ویژگی‌های مقاومتی نمونه‌ها وجود دارد که با یک تابع نمایی قابل بیان است. اگر چه ارتباط بین درصد آهک و مدول الاستیسیته ($R^2=0.94$) نسبت به مقاومت فشاری تک محوری ($R^2=0.90$) معنا داری بیشتری دارد. بر اساس شکل (۶) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد وزنی آهک، ویژگی‌های مقاومتی بهبود قابل توجهی یافته‌اند. این افزایش تقریباً یک روند غیر خطی (نمایی) را دنبال می‌کند.

۲-۳. خصوصیات مکانیکی خاک مارن مورد مطالعه قبل و بعد از تثبیت
 برای بررسی تاثیر آهک و نانوکامپوزیت بر روی مقاومت تک محوری خاک، آزمایش‌های متعددی با درصد‌های مختلف آهک و نانوکامپوزیت انجام شد. نتایج مربوط به آزمایش‌های تک محوره بر روی نمونه‌های تثبیت شده با آهک با مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه در جدول ۵ ارائه شده است. در ضمن انجام این آزمایش‌ها مقدار مدول الاستیسیته نمونه‌ها نیز بعنوان پارامتر معرف سختی خاک اندازه‌گیری شده است. شکل (۶) منحنی تغییرات مقاومت فشاری تک محوری و



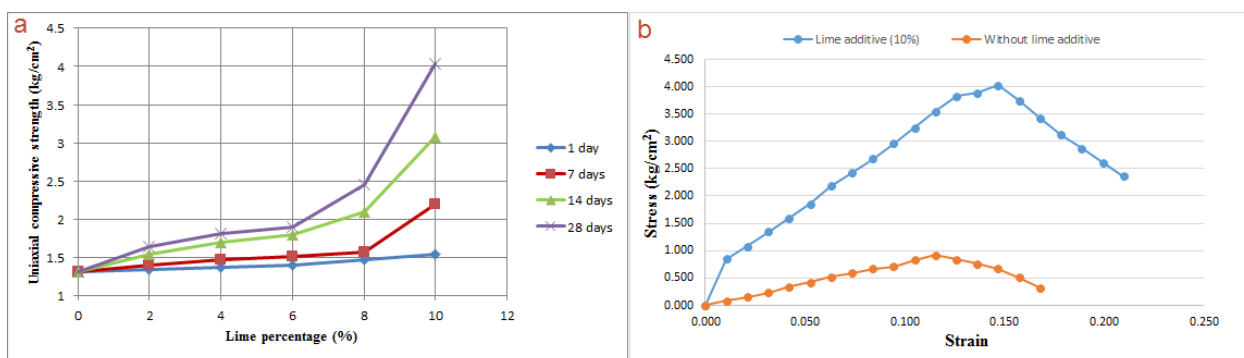
شکل ۶. روند تغییر مقاومت تک محوری (UCS) و مدول الاستیسیته (E) در برابر درصد آهک افزوده شده به خاک (دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه).

می‌باشد. همچنین بررسی بیشتر نمودارهای شکل (۷) نشان دهنده ی این مطلب است که افزایش آهک با درصد‌های مختلف تا عمل‌آوری ۷ روزه به دلیل عدم شکل‌گیری واکنش‌های پوزولانی، تغییر چندانی در مقاومت فشاری نمونه‌ها نداشته است. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقادیر درصد وزنی آهک و مدت زمان عمل‌آوری، مدول الاستیسیته و مقاومت تک محوری افزایش یافته و در نتیجه ی آن کاهش پلاستیسیته خاک (پتانسیل تورم) حاصل شده است.

به دلیل واکنش دیرتر آهک با خاک (Gallage, 2012)، اثر افزودن آهک به خاک مارن در دوره‌های زمانی عمل‌آوری متفاوت (۷، ۱۴ و ۲۸ روز) مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۸). نتایج حاصله نشان‌دهنده روند قابل توجه در افزایش مقاومت تک محوری خاک با افزایش مدت زمان عمل‌آوری است (شکل ۷a). در میزان آهک ۱۰٪ مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری تحت دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد از ۱/۳۲ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع برای ۱ روز عمل‌آوری، به ۴/۰۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع افزایش یافته است. این مقدار بیانگر حدود ۳/۵ برابر رشد در مقاومت فشاری

جدول ۸ تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های خاک در درصد مقادیر مختلف آهک و تعداد روزهای مختلف عمل‌آوری.

Curing time	Lime (0%)	Lime (2%)	Lime (4%)	Lime (6%)	Lime (8%)	Lime (10%)
	Uniaxial compressive strength (kg/cm ²)					
1 day	1.32	1.35	1.37	1.4	1.48	1.55
7 days	1.32	1.4	1.47	1.51	1.58	2.2
14 days	1.32	1.55	1.7	1.8	2.1	3.08
28 days	1.32	1.65	1.81	1.9	2.46	4.03



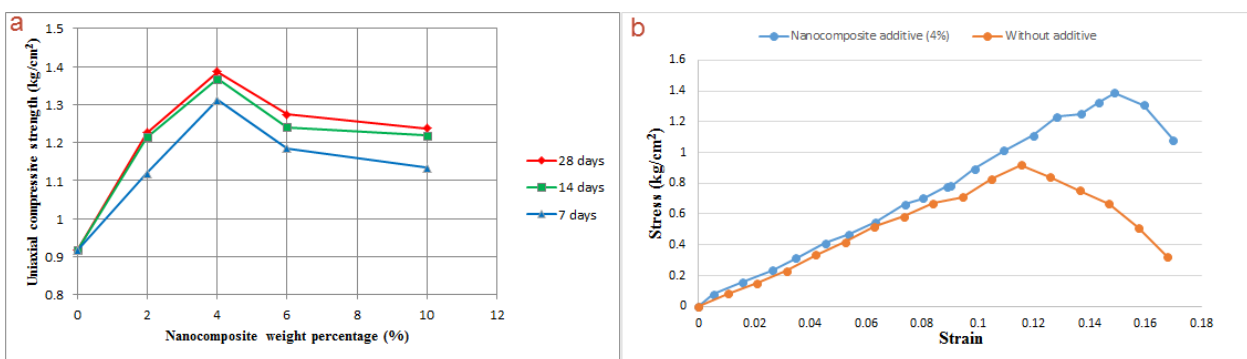
شکل ۷. (a). تغییرات مقاومت فشاری تک محوری در خاک مارن مورد مطالعه تثبیت شده با آهک با توجه به تعداد روز عمل‌آوری؛ (b) منحنی تنش- کرنش آزمایش تک محوری برای خاک بدون افزودنی و با ۱۰ درصد افزودنی آهک (عمل‌آوری ۲۸ روزه).

مختلف نانوکامپوزیت در مدت زمان‌های عمل‌آوری مختلف (۷، ۱۴ و ۲۸ روزه) مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۸a) تغییرات مقاومت فشاری محاسبه شده با توجه به میزان

در بخش دیگر از پژوهش، تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های خاک مارنی با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه‌های مخلوط شده با درصد‌های

است با این تفاوت که در این مورد نیز با افزایش مدت زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری بهبود یافته است (شکل ۸a). همچنین براساس مقایسه‌ی منحنی تنش - کرنش نمونه خاک تثبیت شده با ۴ درصد وزنی نانوکامپوزیت و نمونه خاک بدون افزودنی (شکل ۸b)، می‌توان دریافت که با افزوده شدن نانوکامپوزیت مدول الاستیسیته خاک افزایش ناچیزی داشته است.

نانوکامپوزیت پلی پروپیلن/رس به کار رفته را نمایش می‌دهد. براساس نتایج بدست آمده، با افزایش درصد نانوکامپوزیت افزودنی، مقاومت فشاری افزایش نشان داده و در نمونه خاک با مخلوط ۴ درصد نانوکامپوزیت و در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روز به بیشترین مقاومت ($1/387 \text{ kg/cm}^2$) رسیده است. سپس با عبور از این نقطه با بیشتر نمودن درصد نانوکامپوزیت مقدار مقاومت روند کاهشی یافته است. روند مشابهی نیز برای مدت زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۱۴ روزه نیز قابل مشاهده



شکل ۸. (a). نمودار تغییرات مقاومت فشاری در برابر درصد نانو کامپوزیت افزوده شده در مدت زمان‌های عمل‌آوری مختلف؛ (b) منحنی تنش-کرنش آزمایش تک محوری برای خاک بدون افزودنی و با ۴ درصد افزودنی نانوکامپوزیت (عمل‌آوری ۲۸ روزه).

شده است. بنابراین افزودنی آهک کارایی بیشتری در کاهش پتانسیل تورم خاک داشته است.

در ارتباط با اثربخشی افزودنی آهک بایستی ذکر شود که با افزودن آهک به خاک، خاصیت خمیری رس در اثر کاهش شاخص خمیری که خود نتیجه‌ی افزایش حد پلاستیک رس است (جدول ۴)، کاهش پیدا می‌کند. در توجیه این پدیده می‌توان گفت که با اضافه شدن آهک ظرفیت تبادل یونی رس تغییر یافته و ضخامت لایه آب مضاعف کاهش قابل توجهی می‌یابد. این امر موجب افت قابل توجه میزان جذب آب در رس می‌گردد. در ارتباط با نحوه اثر بخشی نانوکامپوزیت مورد استفاده در این پژوهش و کاهش شاخص خمیری خاک، این نکته بایستی ذکر شود که نانوکامپوزیت استفاده شده همانند یک انکلوزن تراکم پذیر به عنوان پرکننده در داخل خاک عمل کرده و موجب کاهش جذب آب و در نتیجه

۴. مقایسه اثر افزودنی‌های آهک و نانوکامپوزیت بر روی خصوصیات خاک مورد مطالعه

همانطور که اشاره شد یکی از مهمترین اهداف افزودن افزودنی‌ها به نمونه‌های خاک متورم شونده، کاهش پتانسیل تورم از طریق کاهش شاخص پلاستیک خاک می‌باشد. هر دوی افزودنی مورد استفاده در این پژوهش موجب کاهش شاخص پلاستیک نمونه خاک شده‌اند (شکل ۵a). اما نکته قابل توجه قابلیت بیشتر افزودنی آهک در کاهش شاخص پلاستیک نمونه خاک در مقایسه با نانوکامپوزیت مورد استفاده است. بطوریکه افزودن آهک تا شش درصد وزنی موجب افت ۴۳ درصدی شاخص تورم شده است. این در حالیست که افزودن نانوکامپوزیت در درصد وزنی بهینه خود یعنی ۴ درصد، تنها موجب ۱۲/۵ درصد افت در شاخص تورم خاک

در مجموع به نظر می‌رسد عملکرد نانوکامپوزیت به عنوان یک افزودنی جدید در مقایسه با آهک چندان موفقیت آمیز نبوده است. بنابراین استفاده از آهک با توجه به صرفه اقتصادی و اثر بهبود بخشی قابل قبول آن، همچنان توجیه پذیر می‌باشد.

۵. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر اثر بخشی تثبیت کننده‌های آهک و نوعی نانوکامپوزیت (پلی پروپیلن پایه الیاف به عنوان ماتریکس و نانو رس به عنوان پرکننده) بر روی ویژگی‌های مقاومتی خاک مارنی اطراف شهر سنقر، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور آزمایش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی قبل و بعد از تثبیت بر روی نمونه‌های مورد مطالعه، انجام شده است. نتایج نشان دهنده‌ی روند قابل توجه در افزایش مقاومت تک محوری و مدول الاستیسیته خاک با افزایش آهک است که در درصدهای بالای آهک این روند کند شده و از رشد مقادیر مقاومت تک محوری و سختی خاک کاسته می‌شود. نتایج همچنین نشان داد که افزایش مدت زمان عمل-آوری موجب افزایش اثر آهک و افزایش مقاومت خاک می-گردد بطوریکه مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل-آوری تحت دمای ۴۵ درجه سانتی گراد از ۱/۳۲ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع برای مارن فاقد آهک به حدود ۴/۰۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع برای مارن با ۱۰ درصدوزنی آهک بدست آمده که حدوداً ۳/۵ برابر می‌باشد. ذکر این نکته لازم است که افزایش آهک با درصدهای مختلف تا عمل‌آوری ۷ روزه به دلیل عدم شکل‌گیری واکنش‌های پوزولانی تغییر چندانی در مقاومت فشاری نمونه‌ها نداشته است.

بر اساس نتایج به دست آمده، افزودن نانوکامپوزیت به خاک، باعث کاهش شاخص خمیری می‌گردد. کمترین مقادیر شاخص خمیری مربوط به خاک با مخلوط ۱۰ درصد نانوکامپوزیت می‌باشد. افزودن نانوکامپوزیت تهیه شده به خاک مارن باعث تغییر رفتار رس شده است، به نحوی که سبب شده رس آب کمتری جذب نموده و در نتیجه مقاومت فشاری افزایش یافته است. با افزایش میزان نانو کامپوزیت تا

کاهش شاخص پلاستیک خاک گشته است. هرچند به نظر می‌رسد که با افزایش درصد نانوکامپوزیت به بیشتر از مقدار بهینه (۴٪) امکان حصول مقادیر کمتر شاخص پلاستیک وجود دارد، اما محتوای نانوکامپوزیت مورد نیاز برای این منظور می‌تواند مشکلاتی را در اختلاط و تراکم خاک ایجاد کند و اقتصادی نباشد.

بهبود ویژگی‌های مقاومتی خاک، هدف دیگر استفاده از افزودنی‌ها می‌باشد. بررسی اثر افزودنی‌های مورد استفاده در این پژوهش بر روی مقاومت فشاری نمونه خاک مارنی نیز نشان از برتری آهک در نرخ افزایش مقاومت فشاری (۳/۵) برابر برای آهک و ۱/۵ برابر برای نانوکامپوزیت در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه) نمونه نسبت به نانوکامپوزیت دارد (شکل‌های ۷ و ۸). در توجیه اثربخشی آهک بر روی افزایش مقاومت فشاری نمونه مورد مطالعه بایستی اشاره کرد که به دلیل کاهش ضخامت لایه آب مضاعف ذرات رس به یکدیگر جذب شده و دچار فلوکوله شدن می‌شوند. این پدیده نیز افزایش زاویه اصطکاک بین ذرات فلوکوله شده را همراه داشته و در نتیجه موجب بهبود ویژگی‌های مقاومتی از جمله مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته می‌گردد. در واقع طی فرآیند واکنش آهک با خاک رس، تغییرات بافتی در خاک رس خمیری، منجر به شکل‌گیری ساختار دانه ای در خاک می‌گردد. در مورد چگونگی اثر بخشی نانوکامپوزیت بر روی نمونه مورد مطالعه باید گفت هنگامی که مقادیر کمی از نانوکامپوزیت (تا ۴٪ وزنی) در خاک به طور یکنواخت پراکنده می‌شوند، نانوکامپوزیت‌ها می‌توانند از طریق اثر پرکنندگی، مقاومت خاک را بهبود بخشند. به عبارت دیگر، ذرات نانوکامپوزیت به عنوان پرکننده برای فضای خالی بین ذرات، ساختار متراکم تری را در خاک ایجاد می‌کنند، و بنابراین مقاومت خاک افزایش می‌یابد. این در حالیست که با افزایش مقادیر نانوکامپوزیت به بیش از ۴٪ وزنی، ذرات نانوکامپوزیت تجمع یافته و اثر منفی بر روی مقاومت فشاری به همراه دارند (شکل ۸a).

بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک مورد مطالعه شده است. این در حالست که برخلاف مصرف بیشتر افزودنی آهک نسبت به نانوکامپوزیت، در مجموع اثر بخشی آهک بیشتر از نانوکامپوزیت بوده است. از اینرو پیشنهاد می‌گردد در پژوهش‌های آینده اثر نانوذرات مختلف با درصد های وزنی متفاوت بر روی ویژگی‌های مهندسی خاک‌های ماری و رسی مورد بررسی قرار گرفته و عملکرد آنها در مقایسه با افزودنی‌های سنتی مانند آهک ارزیابی گردد.

مقدار ۴ درصد مقاومت فشاری خاک افزایش یافته و در درصد‌های بالاتر از آن این مقدار کاهش می‌یابد. روند کاهشی مشاهده شده بعد از عبور از ۴ درصد ناشی از افزایش درصد وزنی نانوکامپوزیت و تجمع ذرات نانوکامپوزیت در ترکیب خاک می‌باشد.

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ذرات نانوکامپوزیت به دلیل ابعاد کوچک دارای سطح ویژه زیادی بوده و واکنش شدیدتری با ذرات خاک در مقایسه با آهک انجام می‌دهند. بطوریکه وجود مقادیر کمی از نانوکامپوزیت در مقایسه با آهک، منجر به

منابع

- اوحدی، و.، امیری، م.، زنگنه، م.، ۱۳۹۵. ارزیابی ریزساختاری میزان مصرف آهک و پیشرفت واکنش‌های پوزولانی خاک و اگرای تثبیت شده با آهک. نشریه علمی - پژوهشی مهندسی عمران (فنی و مهندسی مدرس)، جلد ۱۶، شماره ۱، صفحه ۱۱-۲۲.
- محمدزاده ثانی، ا.، عربانی، م.، خداپرست حقی، ا.، جمشیدی چناری، ر.، ۱۳۸۹. تأثیر نانو رس بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه های رس دار. چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، تهران.
- Al-Amoudi, OSB., Khan, K., Al-Kahtani, NS., 2010. Stabilization of a Saudi calcareous marl soil. *Construction and Building Materials*, 24(10): 1848-1854.
- ASTM D 2006. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. American Society for Testing and Materials West Conshohocken, Pa.
- ASTM D- 2011. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. D3080/D3080M.
- ASTM D2216-10 2010. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D2487-17 2017. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D4318-17e1 2017. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D4373-14 2014. Standard Test Method for Rapid Determination of Carbonate Content of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org
- ASTM D698-12e2, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org
- Basha, E., Hashim, R., Mahmud, H., Muntohar, A., 2005. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Construction and building materials*, 19(6): 448-453.
- Calbi-Floody, M., Theng, B.K.G., Reyes, P., Mora, ML., 2009. Natural nanoclays: applications and future trends-a Chilean perspective. *Clay Miner*, 44(2): 161-176.
- Changizi, F., Haddad, A., 2017. Effect of nanocomposite on the strength parameters of soil. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21:676-686.
- Chen, L., Lin, D-F., 2009. Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement. *Journal of Hazardous Materials*, 162(1): 321-327.
- Curtin, D., Syers, JK., 2001. Lime-induced changes in indices of soil phosphate availability. *Soil Science Society of America Journal*, 65(1): 147-152.

- Dang, LC., Fatahi, B., Khabbaz, H., 2016. Behaviour of expansive soils stabilized with hydrated lime and bagasse fibres. *Procedia engineering*, 143: 658-665.
- Deer, WA., Howie, RA., Zussman, J., 1997. *Rock-forming Minerals: Double-Chain Silicates, Volume 2B*. Geological Society of London.
- Garzón, E., Cano, M., OKelly, BC., Sánchez-Soto, PJ., 2016. Effect of lime on stabilization of phyllite clays. *Applied Clay Science*, 123: 329-334.
- Harichane, K., Ghrici, M., Kenai, S., 2018. Stabilization of Algerian clayey soils with natural Pozzolana and lime. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(1): 1-10.
- Hausmann, MR., 1990. *Engineering principles of ground modification*.
- Hossain, K., Mol, L., 2011. Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. *Construction and Building Materials*, 25(8): 3495-3501.
- Kermani, MS., Nikudel, M., Uromei, A., 2018. The Influence of Nano Bentonite on Geotechnical Characteristics of Sand. *Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 11(1): 37-47.
- Khalid, N., Mukri, M., Kamarudin, F., Ghani, AHA., Arshad, MF., Sidek, N., Bilong, B., 2015. Effect of nanoclay in soft soil stabilization. In *InCIEC 2014* (pp. 905-914). Springer, Singapore.
- Lin, D-F., Lin, K-L., Hung, M-J., Luo, H-L., 2007. Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil. *Journal of hazardous materials*, 145(1-2): 58-64.
- Majeed, ZH., Taha, MR., Jawad, IT., 2014. Stabilization of soft soil using nanomaterials. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 8(4): 503-509.
- Modarres, A., Nosoudy, YM., 2015. Clay stabilization using coal waste and lime—Technical and environmental impacts. *Applied clay science*, 116: 281-288.
- Ouhadi, V., Bakhshalipour, H., 2010. Impact of nano clays on the behavior properties of collapsible soils. *Proc of 9th International Congress on Advanced in Civil Engineering*, 27-30
- Rogers, CDF., Glendinning, S., Roff, TEJ., Consoli, NC., Thome, A., 2001. Lime modification of clay soils for construction expediency. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Geotechnical Engineering*, 149(3): 201-202.
- Roshan Bakht, K., Khomehchian, M., Sajjedi, Rh., Nikudel, M., 2015. Biological improvement of sandy soil by microbial induced carbonate precipitation and the affecting factors. *Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 8(1-2): 1-12.
- Seco, A., Ramírez, F., Miqueleiz, L., García, B., Prieto, E., 2011. The use of non-conventional additives in Marls stabilization. *Applied Clay Science*, 51(4): 419-423.
- Shi, JH., Zhao, YS., Hong, M., 2003. A study on modification of clayey soil as landfill liner material. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 33(3): 355-359.
- Sol-Sánchez, M., Castro, J., Ureña, C., Azañón, J., 2016. Stabilisation of clayey and marly soils using industrial wastes: pH and laser granulometry indicators. *Engineering Geology*, 200: 10-17.
- Taha, MR., Taha, OME., 2012. Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior. *Journal of Nanoparticle Research*, 14(10): 1190.
- Tucker, ME., 2009. *Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks*. John Wiley & Sons.
- Yi, Y., Gu, L., Liu, S., 2015. Microstructural and mechanical properties of marine soft clay stabilized by lime-activated ground granulated blastfurnace slag. *Applied Clay Science*, 103: 71-76.