

امکان‌سنجی اصلاح و پایدارسازی خاک‌های رسی با استفاده از مواد افزودنی طبیعی در راستای بهسازی محیط

مهدی غریب

گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

محمد علی ارجمند^۱

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت معلم شهید رجایی، تهران، ایران

محمود رضا عبدی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

صمد خاکسار مقامی

گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۱۴ تاریخ صدور پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۵

چکیده

هدف تحقیق، بررسی امکان اصلاح و پایدارسازی خاک‌های رسی با استفاده از مواد افزودنی طبیعی می‌باشد. نوع هدف کاربردی و روش کار آزمایشگاهی است. سه افزودنی خاکستر پوسته برنج و نانوکیتین و نیز آهک با درصدهای وزنی متفاوت به خاک رس اولیه اضافه شده و جداگانه مورد بررسی قرار گرفتند. آزمایشات فشاری، محوری و چسبندگی برای هر یک انجام شده و برای نتیجه‌گیری نهایی از میکروسکوپ الکترونی روبشی محیطی و طیف‌سنج برآش اشعه ایکس استفاده گردید. نتایج نشان داد افزودن درصدهای مختلف دو ماده نانوکیتین و خاکستر پوسته برنج، کاهش‌های به مراتب بیشتری در شاخص خمیری حاصل می‌کند و باعث بهبود مطلوب‌تر میزان شاخص خمیری و خصوصیات خمیری خاک‌های مشکل‌آفرین خواهد شد. همچنین تمامی ترکیبات و درصدهای مختلف وزنی سه ماده آهک، نانوکیتین و خاکستر پوسته برنج، منجر به افزایش مطلوب مقاومت فشاری نمونه خاک اولیه مورد آزمایش شده‌اند. در زمان افزودن ۶ درصد آهک به نمونه خاک اولیه، مقاومت فشاری به نحو مطلوب و مؤثری افزایش پیدا کرده و در مقایسه با نتایج مقاومت نمونه خاک اولیه، افزایش‌هایی، به ترتیب، برابر ۷۲، ۱۱۸، ۱۳۲ و ۱۵۴ درصد در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸، ۴۲ و ۹۰ روزه، در مقاومت نمونه‌ها حاصل گردیده که این افزایش، مطلوب و قابل توجه بوده است. در تمام نمونه‌ها، در تمام دوره‌های عمل‌آوری، چسبندگی نسبت به نمونه خاک اولیه، روندی صعودی داشته است. در نهایت، می‌توان عنوان نمود که اضافه شدن خاکستر پوسته برنج و نانوکیتین و آهک سبب افزایش مقاومت و پایداری خاک رس گردیده و نیازی به مواد شیمیایی و صنعتی نیست.

کلمات کلیدی: پایدارسازی خاک، خاک رس، پوسته برنج، افزودنی طبیعی، بهسازی محیط

مقدمه

از جمله مباحثی که اخیراً نظر متخصصین خاک و پی را به خود معطوف داشته است، تعیین روش‌های نوین بهسازی خاک در کلیه سازه‌های خاکی می‌باشد. این عمل، به منظور اصلاح کاربرد مهندسی خاک برای دستیابی به اهداف مختلف انجام می‌شود. روش‌های بهسازی خاک بسیار متنوع و متعدد می‌باشند. انتخاب روش‌های بهسازی، بستگی به عوامل متعددی، از جمله نوع خاک، درصد ریزدانه (لای و مقدار رس)، مساحت و عمق بهسازی، مقاومت و تراکم‌پذیری خاک مورد نظر، ضوابط نشست، دسترسی به مهارت‌های فنی، نوع تجهیزات، مصالح و هزینه بهسازی دارد (بیات، ۱۳۹۳). استفاده از خاک‌های مختلف رسی با پلاستیسیته بالا در پروژه‌های مختلف محیط زیستی و ژئوتکنیکی، روزبه‌روز در حال فزونی است (تقوایی و همکاران، ۱۳۹۶؛ ۳۴۷). یکی از نقاط ضعف خاک‌های رسی، پتانسیل انقباضی در هنگام خشک شدن است که باعث گردیده به تنهایی قادر به تأمین نیازهای بهره‌برداری نباشد و نیاز به اصلاح خواص این مصالح به وسیله ترکیب با سایر مواد، ضروری به نظر می‌رسد (رحیمی و عباسی، ۱۳۹۴؛ ۱۳). همچنین، اکثر خاک‌های رسی، دارای مقاومت برشی پایین هستند که نیاز به افزایش مقاومت دارند. برای اصلاح خواص مکانیکی خاک‌های رسی، از ترکیبات شیمیایی و افزودنی‌های مختلف، از جمله آهک و سیمان (افزودنی تثبیتی) و برای حل معضل مقاومت برشی پایین، از مواد پلیمری و ژئوسینتتیک‌ها، به صورت المان تسلیح، استفاده شده است. امروزه، برای تثبیت، به غیر از مواد تثبیت‌کننده سنتی، از تثبیت‌کننده‌هایی در ابعاد نانو نیز استفاده می‌شود (Al-Rawas et al., 2002).

با توجه به این که در ایران، یکی از مشکلات تثبیت خاک‌ها برای پروژه‌های بزرگ، خصوصاً ساخت و ساز، وجود خاک رسی می‌باشد (عبادینی و همکاران، ۱۳۹۲)، با استفاده از تکنولوژی نانو، نظیر مواد نانوپلیمر نیز می‌توان ویژگی‌های مهندسی این نوع خاک را تغییر داد، اما مشکل این است که اولاً می‌باید به وسیله کاربرد پوزولان، استفاده از مواد شیمیایی نظیر آهک و سیمان و ... را به دلیل مشکلات زیست‌محیطی و قیمت بالا کاهش داد و همچنین برای خاکی که هم با مشکل خواص انقباضی و یا تورمی و هم با مشکل کمبود مقاومت برشی مواجه باشد، می‌باید با افزودنی‌های خاص، نسبت به از بین بردن خواص انقباضی و یا انبساطی اقدام نمود که این امر، جدا از هزینه بالای اجرا، زمان‌بر نیز می‌باشد (Beeghly, 2003; 4). به همین دلیل، باید نسبت به کاهش هزینه‌ها، افزایش سرعت اجرا و کاهش استفاده از مصالح غیرسازگار با محیط زیست، تدابیری اندیشیده شود. استفاده بی‌رویه از مواد شیمیایی در پروژه‌ها، سالیان درازی است که از منظر محیط زیستی کشور را به سمت یک بحران سوق می‌دهد. از سوی دیگر، لزوم بهره‌گیری و استفاده جامع از مواد شیمیایی سازگار با محیط زیست و مطابق نیاز یک پروژه، بسیار با اهمیت است (رضایی‌زاده مهابادی و همکاران، ۱۳۹۸). به همین دلیل، ضرورت نگاه عمیق به حل معضلات ذکر شده بر پایه اصول زیست‌محیطی، با نگاه استفاده از روش‌های جدید برای حل معضلات خاک‌ها، بسیار جدی است. برای تثبیت خاک‌های رسی و حل معضلات تورم و یا انقباض، معمولاً از مواد شیمیایی نظیر آهک و سیمان استفاده می‌شود که بسیار ناسازگار با محیط زیست است.

هدف از انجام این تحقیق، بررسی امکان اصلاح و پایدارسازی خاک‌های رسی با استفاده از مواد افزودنی طبیعی می‌باشد.

مبانی نظری

در چند دهه اخیر و به دنبال پیشرفت‌های صورت گرفته در مهندسی ژئوتکنیک، مبحث بهسازی خاک و تقویت زمین‌های سست، به عنوان یکی از موضوعات جدید و در عین حال پراهمیت، جهت اصلاح خاک مطرح شده است. به طور کلی، بهسازی توده خاک جهت بهبود مقاومت برشی خاک و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری، کاهش نشست، افزایش ضریب اطمینان در مقابل لغزش شیروانی خاکریزها و سدهای خاکی و همچنین کاهش خصوصیات جمع-شدگی و تورم خاک انجام می‌شود (محتشم و دیگران، ۱۳۹۰؛ ۱). یکی از مؤثرترین روش‌های بهبود کیفی مشخصات فنی خاک‌های رسی که استفاده از آن متداول است، بهره‌گیری از آهک است. تثبیت خاک رس به وسیله آهک، به معنای ترکیب و مخلوط کردن آهک با رطوبت بهینه به صورت هیدروکسید کلسیم (آهک شکفته و یا آهک زنده)، با خاک رس و متراکم کردن این مخلوط است که عمل تثبیت خاک رس، به علت واکنش‌های شیمیایی رس و آهک است و اصولاً آهک با بیشتر خاک‌های رسی دارای خواص خمیری بالا واکنش شیمیایی خوبی خواهد داشت (تیموری و تیموری یانسری، ۱۳۹۳؛ ۱۳).

تکنیک اصلاح خاک با آهک، از زمان‌های قدیم در اجرای ابنیه به کار رفته است، پس از سال ۱۹۴۵، اصلاح خاک با آهک شکفته در آمریکا و اصلاح شن‌های رس‌دار تثبیت شده با سیمان در آمریکا متداول شد. در نواحی مرطوب اروپایی و با توجه به شرایط آب و هوایی آن ناحیه، اصلاح خاک با آهک، با کاربرد آهک زنده به جای آهک شکفته صورت گرفت. این روش اصلاح، در دهه‌های ۵۰ و ۷۰ میلادی در اغلب کشورهای اروپای شمالی و آلمان، اتریش، سوئیس، فرانسه و بلژیک، مرسوم بوده است (Chang et al., 2010). خاک‌های رسی، معمولاً ورقه‌ای و نازک بوده و به همین دلیل دارای مساحت سطح زیادی هستند. به دلیل جایگزینی اتم‌های سیلیسیم و آلومینیم به وسیله اتم‌هایی با ظرفیت کم‌تر، سطح ذرات کانی‌های رسی دارای بار منفی است. وجود این بار منفی، باعث جذب یون‌های مثبت می‌شود که این یون‌های مثبت می‌توانند مقدار زیادی آب را جذب کرده و باعث کاهش مقاومت و افزایش حجم خاک شوند (Petry & Little, 2002). این یون‌ها که جاذب آب نیز نامیده می‌شوند، قویاً به سطح خاک رس پیوند خورده و به راحتی قابل جدا کردن نیستند. یکی از موادی که برای تثبیت خاک‌های رسی استفاده می‌شود، آهک است. اضافه کردن آهک به خاک رس، باعث به وجود آمدن واکنش‌هایی می‌شود که این واکنش‌ها در کوتاه‌مدت و بلندمدت، باعث بهبود ویژگی‌های خاک می‌شوند (طاهرخانی و جوانمرد، ۱۳۹۴). برخی از خاک‌ها، با آهک واکنش نشان نمی‌دهند که به دلیل فقدان سیلیکات‌ها و آلومینات‌ها در خاک است. در این موارد، می‌توان از ترکیب آهک با یک ماده پوزولانی مانند خاکستر بادی و یا میکروسیلیس استفاده کرد (Beeghly, 2003; Liongso, 2012; Mishra, 2012; Sharma et al., 2012).

امروزه، برای تثبیت، به غیر از مواد تثبیت‌کننده سنتی، از تثبیت‌کننده‌هایی در ابعاد نانو نیز استفاده می‌شود. با توجه به این که در ایران، یکی از مشکلات تثبیت خاک‌ها برای پروژه‌های بزرگ، خصوصاً ساخت و ساز، خاک مسئله‌دار رسی می‌باشد (ریگی و همکاران، ۱۳۹۸)، با استفاده از تکنولوژی نانو، نظیر مواد نانوپلیمر نیز می‌توان ویژگی‌های مهندسی این نوع خاک را تغییر داد، زیرا ماده نانوپلیمر، باعث کاهش قدرت جذب آب در خاک رس‌دار می‌شود (جان‌بزرگی و قنّاد، ۱۳۸۹).

مواد افزودنی مورد مطالعه در تحقیق

سنگ‌های آهکی، چه از نوع کربنات کلسیم و چه از نوع دولومیتی، عمده‌ترین سنگ‌ها از خانواده کربنات‌ها می‌باشند که ۲۵ درصد پوسته زمین را تا اعماق ۱۶ کیلومتری تشکیل می‌دهند. این نوع سنگ‌ها که منابع اصلی برای تهیه آهک صنعتی می‌باشند، در کشور ما به وفور یافت می‌شوند (محمدزاده ثانی و همکاران، ۱۳۸۹). زمانی که به خاک، آهک اضافه می‌شود، واکنش‌هایی نظیر واکنش تبادل کاتیونی، واکنش پوزولانی و واکنش کربناسیونی رخ می‌دهد. تقریباً ریزدانه‌ها وقتی با آهک مخلوط می‌شوند، در مدت زمان کوتاهی، از خود واکنش تبادل را نشان می‌دهند. در مبادله کاتیونی، کاتیون‌های قابل تبادل خاک رس با کاتیون‌های آهک جایگزین می‌شوند. در این حالت، کاتیون‌های تک‌ظرفیتی که همراه رس هستند، با یون‌های دو ظرفیتی کلسیم و یا یون‌های چندظرفیتی جایگزین می‌شوند. در طی این واکنش، تمرکز الکترونی اطراف ذرات رسی تغییر می‌کند، به نحوی که مقدار بار الکتریکی در اطراف ذرات رسی، کم و یا زیاد می‌شود. نتیجه این امر، ایجاد جاذبه الکترونی بین ذرات رس و لخته و دانه شدن بخش رسی خاک است. در واقع، بر اثر این انفعال، بافت خاک رس از نظر فیزیکی تغییر کرده و مانند لای و ماسه عمل می‌کند و در نتیجه، عملاً ذرات رسی، تمایل به جفت شدن با یکدیگر و تشکیل ذرات بزرگ‌تر را دارند (Dedzo & Detellier, 2017).

آنچه باعث افزایش قابل توجه مقاومت در ترکیب خاک-آهک می‌گردد، واکنش پوزولانی است. با اضافه کردن مقدار مناسب آهک به خاک، pH مخلوط افزایش یافته و حدوداً به ۱۲/۴ می‌رسد. افزایش pH، باعث حل شدن سیلیکات و آلومینات موجود در خاک رس شده و با آزاد شدن این واحدها، تشکیل سیلیکات با آلومینات کلسیم میسر می‌گردد. ترکیبات سیلیکات و آلومینات، با آهک، تشکیل سیلیکات یا آلومینات کلسیم هیدراته را می‌دهند. این مواد پوزولانی، به صورت کریستال و شبیه ترکیب سیمان می‌باشند (Djellali et al., 2012).

در طی سال‌های اخیر، استفاده از نانو تقویت‌کننده‌های آلی با منشأ طبیعی، به دلیل زیست‌تخریب‌پذیری بالا و تولید آسان‌تر و کم‌هزینه‌تر، در مقایسه با نانو ذرات معدنی و سنتزی، توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده‌اند. نانوکریستال‌های سلولز، نشاسته، کیتین و کیتوسان، از جمله مهم‌ترین این نانو ذرات طبیعی محسوب می‌شوند که استفاده از آنها در تولید نانوکامپوزیت‌های پلیمری و بیوپلیمری، روز به روز در حال گسترش می‌باشد (Chang et al., 2010).

کیتین، بعد از سلولز، فراوان‌ترین بیوپلیمر موجود در طبیعت است و در ساختار موجوداتی مانند میگو، خرچنگ، حشرات و لاک‌پشت وجود دارد. کیتین، مانند سلولز و نشاسته‌ی پلیمری، نیمه‌کریستالی محسوب می‌شود و با استفاده از هیدرولیز اسیدی یا سایر روش‌ها، می‌توان نواحی آمورف این بیوپلیمر را تجزیه نموده و نانوکریستال کیتین به دست آورد. تاکنون، تولید موفق نانویوسکرهای کیتین از پوسته‌ی خرچنگ و ضایعات خارجی میگو، گزارش شده است (Ravi Kumar, 2001).

افزودنی طبیعی دیگر که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد، خاکستر پوسته برنج است. عمده کاربرد علمی و مهندسی خاکستر پوسته برنج در صنعت ساخت و ساز، این است که به صورت ماده پوزولانی در سیمان‌های ترکیبی و هیدرولیکی، حداکثر تا حدود ۴۰ درصد وزنی، جایگزین سیمان می‌شود و با هیدراتاسیون آرام و حرارت هیدراته

پایین، خصوصاً در بتن‌ریزی‌های حجیم که نیاز به کنترل درجه حرارت هیدراتاسیون می‌باشد، کاربرد داشته و از همه مهم‌تر، کارایی و مقاومت بتن یا ملات سیمانی را افزایش داده و هزینه تولید و اجرای بتن‌ریزی را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر، وزن مخصوص کمتر پوزولان‌ها، در نهایت، موجب افزایش حجم ماتریس سیمانی می‌شود (تویسرکانی و صداقت، ۱۳۹۱).

در گذشته، مطالعات متعددی در مورد تثبیت خاک‌های تورمی با استفاده از مواد افزودنی متعددی مثل سیمان، آهک، خاکستر، محصولات پسماند صنعتی، کلسیم کلرید و اسید فسفریک انجام شده است که به اصلاح خواص انقباضی و مکانیکی خاک‌ها، مثل استفاده از زهکشی عمودی همراه با اضافه‌بار، کمک می‌نماید (Croft, 1967; Al-zoubi, 1993; Bell, 1996; Locat et al., 1996; Rao et al., 2001).

برخی از محققان، این‌گونه بیان کردند که کمک فیبرها به قدرت خاک‌هایی که با این ماده تحکیم شده‌اند، وابسته به جهت توزیع فیبرها می‌باشد (Neyshabouri et al., 2013). از سوی دیگر، مطالعات نشان داده است که اضافه کردن سبوس گندم به خاک‌های رسی، باعث افزایش قدرت برشی و کاهش انقباض خاک می‌شود (Shatnawi & Attom, 2005). همچنین؛ برخی از کارشناسان اثرات اضافه نمودن نانومواد بر کیفیت و مقاومت خاک رس را بررسی و تایید کردند (سلیمی و همکاران، ۱۳۹۰). مطالعات نشان داده است که افزودن نانورس، موجب کاهش پتانسیل واگرایی خاک‌های رسی می‌شود (Abbasi et al., 2017).

پژوهش‌های انجام شده در مباحث مکانیک خاک نشان می‌دهد که اضافه کردن مقدار کمی از نانوذرات به خاک، سبب تغییرات معناداری در برخی از ویژگی‌های مکانیکی نظیر مقاومت برشی و حدود خمیریایی خاک می‌شود (Zhang, 2007 Taha & Taha, 2012; Taha, 2009; Taipodia et al., 2011; Majeed & Taha, 2013;)

تحقیق حاضر برحسب هدف، از نوع کاربردی است که به روش آزمایشگاهی انجام گرفته است. به منظور بررسی و مقایسه برای انتخاب نمونه‌های مناسب، ۳۱ نمونه اولیه تهیه شد. خاک رس مورد استفاده در این پژوهش، با عنوان کائولینیت ZMK2، در بسته‌های ۵۰ کیلوگرمی از شرکت خاک چینی ایران تهیه گردیده است. آهک، در بسته‌های ۴۰ کیلوگرمی از کارخانه‌ی آهک پارس شیمی تهیه و جهت جلوگیری از واکنش آن با دی‌اکسیدکربن موجود در هوا، در کیسه‌های نایلونی نگهداری شده است. خصوصیات خاکستر پسته برنج مورد مطالعه که بر اساس معیارهای استاندارد ASTM مربوطه تعیین گردیده، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱): مشخصات شیمیایی خاکستر پسته برنج

ردیف	عنصر	درصد وزنی
۱	اکسید کلسیم / CaO	۰/۶۷
۲	سیلیس / SiO ₂	۸۸/۳۲
۳	اکسید آلومینوم / Al ₂ O ₃	۰/۴۶
۴	اکسید آهن / Fe ₂ O ₃	۰/۶۷
۵	اکسید منیزیم / MgO	۰/۴۴
۶	سولفات / SO ₄	-
۷	اکسید سدیم و پتاسیم	۳/۱۳

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۸

نانوفیبر کیتین مورد استفاده در این تحقیق، از شرکت نانونین پلیمر در بسته‌های ۲۵۰ گرمی تهیه شده است که از پوسته سخت میگو تولید می‌شود. ابتدا، پوسته میگو پروتئین‌زدایی شده و سپس، بعد از حذف مواد معدنی و رنگبری، کیتین با خلوص بالا تولید می‌گردد. کیتین خالص تولید شده، با فرآیندهای مکانیکی، به نانوفیبر کیتین تبدیل می‌شود که قطر نانوفیبرهای آن، کمتر از ۳۰ نانومتر می‌باشد. درجه کریستالی نانوفیبر کیتین، ۸۸ درصد و درجه دی‌استیلیشن آن، ۱۹/۵ درصد محاسبه گردیده است.

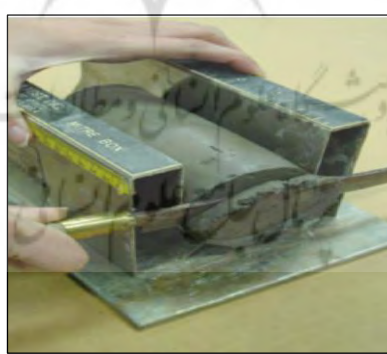
ابتدا، به منظور کاهش اثرات مخرب تورم‌پذیری این خاک مشکل‌آفرین و برای پایین آوردن شاخص خمیری بالای آن، اقدام به افزودن ۶ درصد وزنی آهک به خاک گردید که شاخص خمیری به نحو مطلوبی کاهش یافت. سپس، به منظور بررسی اثر خاکستر پوسته برنج و نانوکیتین بر خصوصیات این خاک متورم‌شونده، اقدام به افزودن مجدد این دو ماده به همراه آهک مصرفی گردید و نتایج به دست‌آمده از افزودن درصدهای مختلف این مواد افزودنی و تأثیر آن بر حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

آزمایشات شامل سه مرحله جداگانه به شرح زیر می‌باشند: آزمایشات دانه‌بندی خاک، حدود آتبرگ (حد روانی و حد خمیری) و آزمایشات شیمیایی.

در این تحقیق، انجام آزمایش‌ها، بر اساس استانداردهای ASTM صورت گرفته است. هدف از انجام این آزمایش‌ها، بررسی تأثیر افزودن همزمان آهک و مقادیر مختلف دو ماده نانوکیتین و خاکستر پوسته برنج و مقایسه تأثیر افزودن دو ماده در درصدهای وزنی مختلف، بر خصوصیات آتبرگ نمونه خاک مورد آزمایش می‌باشد. آزمایش‌های آزمایشگاهی، یکی از مهم‌ترین راه‌های تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها و پیش‌بینی رفتار آنها تحت شرایط مختلف می‌باشند. آزمایش اولیه انجام شده بر روی نمونه خاک، آزمایش حدود آتبرگ، مطابق استاندارد ASTM-D4318 می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱ (پ): آزمایش فشاری تک‌محوری



شکل ۱ (ب): برش و آماده‌سازی نمونه



شکل ۱ (الف): ابعاد نمونه‌ها

محاسبات، بر اساس کرنش و تنش‌های محوری انجام شده و مقدار تنش نهایی (q_u)، از روی منحنی‌های تنش-کرنش به دست می‌آید. کرنش محوری ϵ از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\epsilon = \Delta L / L \quad (۱)$$

در رابطه بالا؛ ΔL : تغییر طول نمونه، خوانده شده از کرنش‌سنج؛ و L_0 : طول اولیه نمونه. تنش لحظه‌ای را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$\sigma = P / A \quad (۲)$$

در رابطه فوق؛ P : بار روی نمونه در لحظه قرائت ΔL ؛ و A : سطح مقطع نمونه در لحظه قرائت P . تعیین مقدار دقیق سطح مقطع در هر لحظه، مهم است. سطح مقطع در هر لحظه را می‌توان با ثابت در نظر گرفتن حجم نمونه به دست آورد. در لحظه شروع آزمایش، حجم نمونه عبارت است از (Morsy, 2010):

$$V_T = A_0 \times L_0$$

بعد از تغییر طول نمونه، حجم نمونه عبارت است از:

$$V_T = A_0 (L_0 - \Delta L)$$

با تساوی این دو رابطه، مساحت سطح مقطع واقعی در هر لحظه، عبارت است از:

$$A' = A / (1 - \epsilon) \quad (3)$$

مقدار مقاومت چسبندگی C_u ، نصف تنش فشاری q_u است و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید (Bae & Moon, 2010):

$$C_u = q_u / 2 = P / 2A \quad (4)$$

ابزار مورد استفاده در آزمایش‌های شیمیایی عبارت بودند از:

- میکروسکوپ الکترونی روبشی محیطی^۱ به منظور تصویرسازی نمونه‌های آزمایشگاهی و توزیع اندازه ذرات پودرها و بررسی مورفولوژی پودرها از این دستگاه استفاده می‌شود (Pradip et al., 2004; Pohl, 2011).

- طیف‌سنج پراش اشعه ایکس^۲ ناحیه پرتو x در طیف الکترومغناطیس، در محدوده بین پرتو γ و پرتو فرابنفش قرار دارد. با استفاده از این ناحیه طیفی، می‌توان اطلاعاتی در خصوص ساختار، جنس ماده و همچنین، تعیین مقادیر عناصر، به دست آورد (Pohl, 2011; Bae & Moon, 2010).

- میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) برای مشاهده اجسام و نمونه‌های با ابعاد بسیار ریز در حد مولکول‌های کوچک و اتم‌ها، نمی‌توان از میکروسکوپ‌های معمول استفاده کرد، چرا که این نمونه‌ها، ابعاد نانویی دارند و میکروسکوپ‌های معمولی، قادر به نشان دادن ابعاد نانویی نیستند. یکی از این ابزارها، میکروسکوپ نیروی اتمی می‌باشد که با استفاده از انبرک و نوکی از یک تک‌اتم الماس ساخته شده است و اطلاعاتی از نمونه‌ها به شیوه غیرمستقیم به دست می‌دهد. دقت بالا، عدم محدودیت در بررسی اغلب سطوح در شرایط محیطی مختلف، عدم نیاز به آماده‌سازی نمونه در اغلب موارد، سرعت بالای اندازه‌گیری، تهیه تصاویر سه‌بعدی و توانایی بررسی انواع خواص سطحی، موجب توجه ویژه و رو به رشد به AFM شده است (Ramírez et al., 2010; Pohl, 2011).

یافته‌های پژوهش

نتیجه آزمایش حدود آتربرگ بر روی نمونه خاک اولیه با افزودن ۶ درصد آهک به خاک مورد آزمایش، به شرح جدول ۲ می‌باشد که پس از این آزمایش، مقادیر مختلف دو ماده نانوکیتین و خاکستر پوسته برنج در درصد‌های

¹ Environmental Scanning Electron Microscopy (ESEM)

² X-Ray Diffraction (XRD)

وزنی متفاوت ۱، ۲، ۴، ۶ و ۸ به نمونه خاک افزوده شده و مجدداً آزمایش‌های آتبرگ بر روی ترکیبات مختلف حاصل، صورت پذیرفته است. همچنین، نتیجه آزمایش تک‌محوری محصورنشده بر روی نمونه خاک اولیه و افزودن ۶ درصد آهک به خاک مورد آزمایش، به شرح جدول ۳ می‌باشد. پارامترهای مختلف مربوط به آزمایش تک‌محوری محصورنشده، برای هر دو نمونه خاک اولیه و نمونه خاک اولیه با افزودن ۶ درصد آهک نیز، ارائه شده است. در مرحله بعد، مقادیر مختلف دو ماده نانوکیتین و خاکستر پوسته برنج، در درصد‌های وزنی متفاوت، به نمونه خاک افزوده شده و مجدداً آزمایش‌های تک‌محوری بر روی ترکیبات مختلف صورت پذیرفت.

جدول (۲): نتایج آزمایش حدود آتبرگ بر روی نمونه خاک اولیه با افزودن ۶ درصد آهک

ردیف	درصد اختلاط	LL	PL	PI
۱	Soil Sample without Added	۶۴/۵۱	۳۳/۸۷	۳۰/۶۴
۲	0%R+0%N+0%P.B+6%A	۳۲/۰۷	۲۳/۳۸	۸/۷۰

منبع: یافته‌های پژوهش

جدول (۳): نتایج آزمایش تک‌محوری محصورنشده بر روی نمونه خاک اولیه و نمونه خاک اولیه با افزودن ۶ درصد آهک

ردیف	q_u (kg/cm ²) درصد اختلاط	روز ۷	روز ۲۸	روز ۴۲	روز ۹۰
۱	Soil Sample without Added	۱/۲۳	۱/۲۳	۱/۲۳	۱/۲۳
۲	0%R+0%N+0%P.B+6%A	۲/۱۱	۳/۰۸	۳/۵۵	۴/۱۲

نتایج آزمایش تک‌محوری بر روی نمونه اولیه خاک مورد آزمایش	h_0 (cm)	d_0 (cm)	ω (%)	G_s	γ_d (gr/cm ³)	e_0	S_r	q_u (kg/cm ²)
۸	۳/۸۰	۱۵	۲/۶۷۵	۱/۶۵	۰/۸۱	۰/۴۷	۱/۲۳	

نتایج آزمایش تک‌محوری بر روی نمونه اولیه خاک و آهک ۶ درصد	روزهای آزمایش	h_0 (cm)	d_0 (cm)	ω (%)	G_s	γ_d (gr/cm ³)	e_0	S_r	q_u (kg/cm ²)
۷	۸	۳/۸۰	۱۱	۲/۶۷۵	۱/۶۵	۰/۵۵	۰/۱۹	۲/۱۱	
۲۸	۸	۳/۸۰	۷	۲/۶۷۵	۱/۶۳	۰/۵۷	۰/۰۹	۳/۰۸	
۴۲	۸	۳/۸۰	۵	۲/۶۷۵	۱/۵۸	۰/۶۲	۰/۰۸	۳/۵۵	
۹۰	۸	۳/۸۰	۴	۲/۶۷۵	۱/۵۰	۰/۷۱	۰/۰۷	۴/۱۲	

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۸

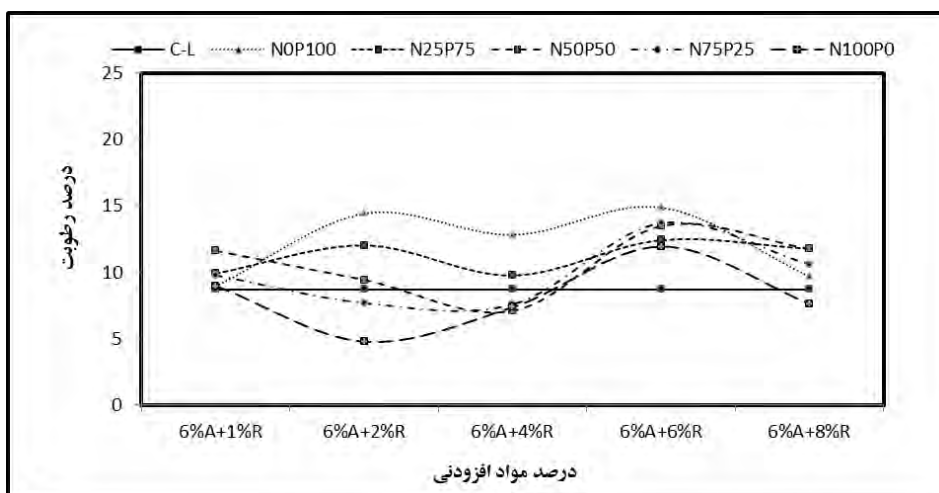
مقایسه نتایج شاخص خمیری برای نمونه‌های حاوی ترکیبات مختلف مواد افزودنی در درصد‌های وزنی متفاوت، با شاخص خمیری نمونه خاک اولیه و ۶ درصد آهک، در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین، تغییرات شاخص خمیری برای نمونه‌های حاوی ۶ درصد آهک و درصد‌های مختلف وزنی از دو ماده افزودنی، در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول (۴): مقایسه نتایج شاخص خمیری برای نمونه‌های حاوی ترکیبات مختلف مواد افزودنی در درصد‌های وزنی متفاوت

(۱، ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد)، با شاخص خمیری نمونه خاک اولیه و ۶ درصد آهک

درصد اختلاط	PI (1%R)	(%) Δ PI With 6%A	PI (2%R)	(%) Δ PI With 6%A	PI (4%R)	(%) Δ PI With 6%A	PI (6%R)	(%) Δ PI With 6%A	PI (8%R)	(%) Δ PI With 6%A
0%R+0%N+0%P.B+6%A	۸/۷۰	۸/۷۰	۸/۷۰	۸/۷۰	۸/۷۰	۸/۷۰	۸/۷۰	۸/۷۰	۸/۷۰	۸/۷۰
0%N+100%P.B+6%A	۸/۹۴	+۳	۱۴/۴۲	+۶۶	۱۲/۸۲	+۴۷	۱۴/۸۸	+۷۱	۹/۶۷	+۱۱
25%N+75%P.B+6%A	۹/۹۱	+۱۴	۱۲/۰۳	+۳۸	۹/۷۶	+۱۲	۱۲/۴۲	+۴۳	۱۱/۷۷	+۳۵
50%N+50%P.B+6%A	۱۱/۶۲	+۳۳	۹/۴۳	+۸	۷/۱۰	-۱۸	۱۳/۴۸	+۵۵	۱۱/۷۷	+۳۵
75%N+25%P.B+6%A	۹/۷۸	+۱۲	۷/۶۹	-۱۲	۷/۵۹	-۱۳	۱۳/۷۰	+۵۷	۱۰/۶۰	+۲۲
100%N+0%P.B+6%A	۸/۹۹	+۳	۴/۷۹	-۴۵	۷/۳۸	-۱۵	۱۱/۹۴	+۳۷	۷/۶۴	-۱۲

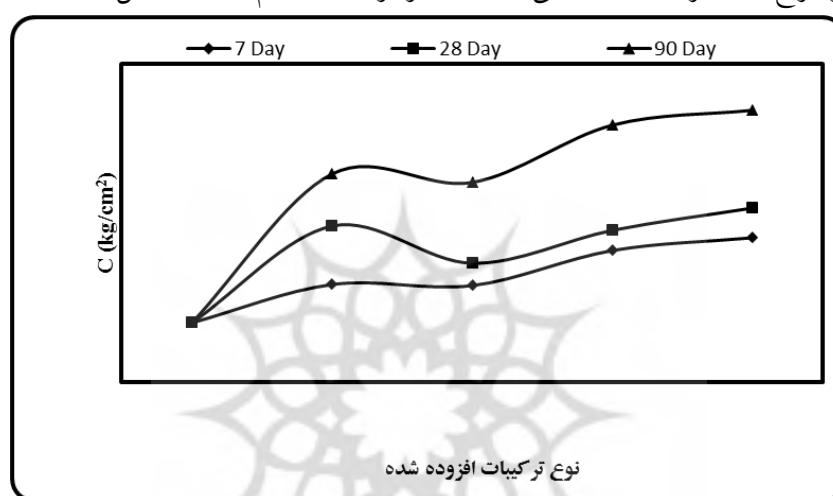
منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۸



شکل (۲): نمودار روند تغییرات شاخص خمیری نمونه‌های حاوی ۶ درصد آهک و درصد‌های مختلف وزنی از دو ماده افزودنی، نسبت به شاخص خمیری نمونه خاک اولیه (یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۸)

همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند کاهش در شاخص خمیری، که مطلوب محققان جهت کاهش خصوصیات تورم‌پذیری این نمونه خاک مشکل‌آفرین و متورم‌شونده بوده، با سرعت خوب و شیب نسبتاً تندی به وقوع پیوسته است. همچنین، مشاهده می‌گردد که این کاهش، در ۲ درصد وزنی، نسبت به سایر درصد‌های وزنی بیشتر بوده و شاخص خمیری در کمترین میزان خود، به عدد نظیر ۴/۷۹ رسیده که در مقایسه با شاخص خمیری نمونه اولیه با مقدار ۳۰/۶۴، حدود ۸۴ درصد کاهش را نشان می‌دهد که این کاهش، در ۲ درصد وزنی و سهم ۱۰۰ درصدی نانوکیتین در ترکیب به دست آمده است. در تمامی درصد‌های وزنی و ترکیبات مختلف افزودنی‌ها، کاهش محسوس و چشمگیر شاخص خمیری، به خوبی مشاهده می‌گردد و به طور متوسط، حدود ۵۰ تا ۸۵ درصد کاهش در شاخص خمیری حاصل شده است که این امر، نشان‌دهنده عملکرد مطلوب و تأثیرگذار مواد افزودنی بوده است. نکته قابل توجه، هنگام مقایسه شاخص خمیری در درصد‌های وزنی و ترکیبات مختلف مواد افزودنی، با شاخص خمیری نمونه خاک اولیه با ترکیب ۶ درصد آهک، این است که در برخی درصد‌های وزنی، قدری افزایش در شاخص خمیری مشاهده می‌گردد که این افزایش، بیشتر در زمانی است که سهم خاکستر پوسته برنج نسبت به نانوکیتین، در درصد‌های وزنی، بیشتر بوده و این، نشان‌دهنده تأثیر مطلوب‌تر نانوکیتین در قیاس با خاکستر پوسته برنج بوده است. این روند، در ۲ درصد وزنی کاملاً نمود دارد، به گونه‌ای که شاخص خمیری در این درصد وزنی، از ابتدا و با افزوده شدن سهم نانوکیتین، به ترتیب کاهش‌های ۵۳، ۶۱، ۶۹، ۷۵ و ۸۴ درصدی داشته و عدد نظیر شاخص خمیری، به ترتیب، به ۱۴/۴۲، ۱۲/۰۳، ۹/۴۳، ۷/۶۹ و ۴/۷۹ رسیده است، یعنی هرچه میزان مشارکت نانوکیتین در ترکیب بیشتر شده، میزان کاهش شاخص خمیری نیز افزایش یافته و خصوصیات تورم‌پذیری نمونه خاک اولیه، به سمت کاهش پیش رفته است. در کل، می‌توان بیان داشت که ترکیب نمونه خاک اولیه و ۶ درصد آهک، میزان شاخص خمیری را به نحو مطلوبی کاهش می‌دهد، اما افزودن درصد‌های مختلف دو ماده نانوکیتین و خاکستر پوسته برنج، کاهش‌های به مراتب بیشتری در شاخص خمیری حاصل می‌کند و باعث بهبود مطلوب‌تر میزان شاخص خمیری و خصوصیات خمیری خاک‌های مشکل‌آفرین خواهد شد.

در راستای هدف تحقیق که درصد بهینه و بیشترین تأثیرگذاری بوده است، ۸ درصد وزنی دو ماده نانوکیتین و خاکستر پوسته برنج، به عنوان درصد بهینه در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، آزمایش‌های سه‌محوری با روش تحکیم-نیافته-زهکشی‌نشده (UU) بر روی نمونه خاک اولیه، نمونه خاک اولیه با افزودن ۶ درصد آهک در دوره‌های عمل-آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روز، نمونه خاک اولیه با افزودن آهک و ۸ درصد وزنی از دو ماده نانوکیتین و خاکستر پوسته برنج در سهم‌های مشارکتی ۱۰۰ درصد خاکستر پوسته برنج و صفر درصد نانوکیتین، ۲۵ درصد خاکستر پوسته برنج و ۷۵ درصد نانوکیتین و صفر درصد خاکستر پوسته برنج و ۱۰۰ درصد نانوکیتین، در دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، در قالب استوانه‌ای با قطر ۳/۸۱ سانتیمتر و ارتفاع ۷/۶۲ سانتیمتر، تحت تنش‌های همه‌جانبه ۱، ۲ و ۴ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و با سرعت گسیختگی یک میلیمتر بر دقیقه انجام شدند (شکل ۳).

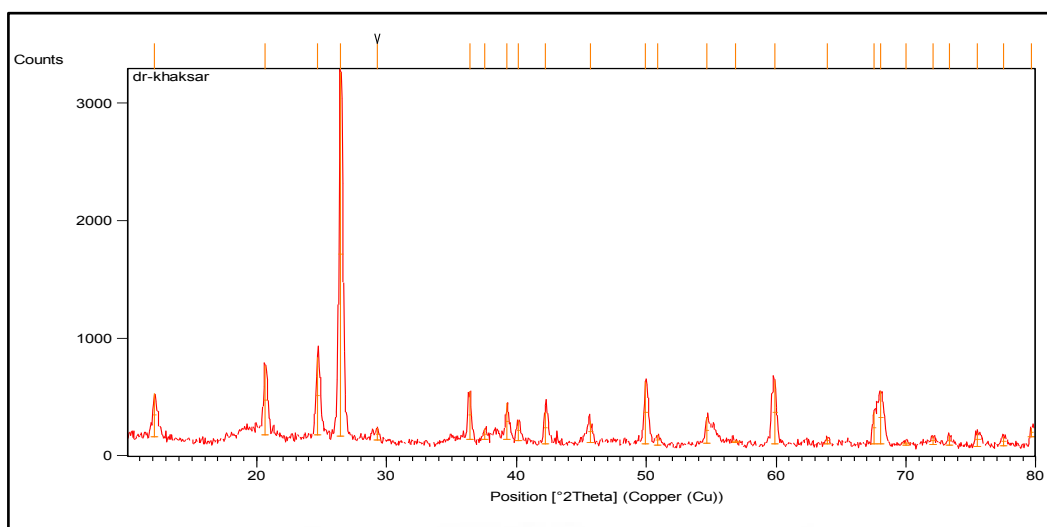


شکل (۳): نمودار روند تغییرات چسبندگی برای انواع ترکیبات، در دوره‌های عمل‌آوری مختلف (یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۸)

با توجه به نتایج حاصل و نمودار فوق، مشاهده می‌شود که در ۷ روز، در تمام نمونه‌ها، چسبندگی نسبت به چسبندگی نمونه خاک اولیه افزایش یافته و افزایش چسبندگی، در محدوده‌ای از ۱۴۳-۶۳ درصد بوده است. بیشترین افزایش چسبندگی نسبت به چسبندگی نمونه خاک اولیه در ۷ روز، در نمونه خاک اولیه با افزودن ۶ درصد آهک و مشارکت ۱۰۰ درصد نانوکیتین و صفر درصد خاکستر پوسته برنج و پس از آن، در نمونه خاک اولیه با افزودن ۶ درصد آهک و مشارکت ۷۵ درصد نانوکیتین و ۲۵ درصد خاکستر پوسته برنج مشاهده شده است که میزان این افزایش، نسبت به چسبندگی نمونه خاک اولیه، به ترتیب، ۱۴۳ درصد (۱/۴۳ برابر) و ۱۲۲ درصد (۱/۲۲ برابر) بوده است.

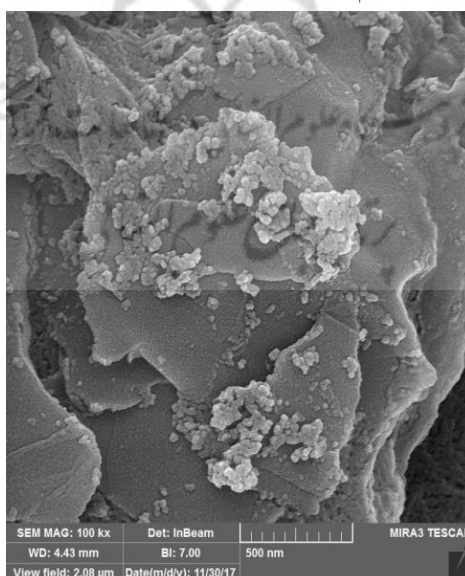
یکی دیگر از تکنیک‌هایی که می‌توان در خصوص اثبات ساختار کامپوزیت تهیه شده، از آن استفاده نمود، طیف‌بینی XRD است. شکل ۴، طیف مربوط به مخلوط نانوکیتین و خاک رس را نشان می‌دهد. در این طیف، حداکثر بازده مربوط به پیام ۰۲θ، برابر با ۲۶ درجه است که مربوط به پیوندهای Si-O می‌باشد. علاوه بر این، پیام‌هایی در ۲۴، ۳۹، ۴۲، ۴۹ و ۵۴ ظاهر شده‌اند که مربوط به ساختار نانوکیتین می‌باشند. در مقایسه با طیف XRD خاک رس، پیام ۲۶ درجه، به مکان پایین‌تر جابجا شده است که نشان‌دهنده حضور نانوکیتین در خاک رس می‌باشد. همچنین، از شدت

دیگر پیام‌های گفته شده در بالا، کاسته شده است که این، خود، نشان‌دهنده ساختار غوطه‌ور شده و یا لایه به لایه کیتین/خاک رس می‌باشد.



شکل (۴): طیف XRD کامپوزیت نانوکیتین و خاک رس (یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۸)

برای اثبات نانو و همگن بودن کامپوزیت تهیه شده، از میکروسکوپ الکترونی SEM استفاده شده است. بررسی این عکس‌ها، برهم‌کنش قوی بین نانوکیتین و خاک رس را نشان می‌دهد. در تصاویر SEM نانوکیتین/خاک رس، می‌توان ذرات خاک رس را مشاهده کرد که به صورت لایه به لایه بر روی هم قرار گرفته و نانوذرات کیتین در اندازه‌های ۲۰ تا ۳۰ نانومتر، بر روی ذرات خاک رس به صورت یکنواخت با اندکی بی‌نظمی پخش شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نقاط تاریک، مربوط به ذرات خاک رس بوده و نانوذرات کیتین، به صورت نقاط سفیدرنگ می‌باشند. نتایج به دست آمده از آنالیزهای انجام شده، نشان‌دهنده حضور نانوکیتین در خاک رس می‌باشد.



شکل (۵): تصویر SEM کامپوزیت نانوکیتین و خاک رس (یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۸)

نتیجه‌گیری و دستاوردهای علمی و پژوهشی

یکی از مشکلات عمده در رابطه با خاک‌های رسی و تورم‌پذیر و مشکل آفرین، خصوصیات خمیری بالا و متورم-

شوندگی آنها است که باعث به وجود آوردن مشکلات مختلفی شده است و همواره، محققین در صدد کاهش و کم کردن این اثرات به طرق مختلف هستند. یکی از این روش‌ها، ترکیب خاک با مواد افزودنی مختلف می‌باشد که دو ماده آهک و سیمان، از دیرباز، در این زمینه مورد استفاده قرار می‌گرفته و هنوز هم متداول هستند و تحقیقات بسیار گسترده و زیادی در رابطه با ترکیب این دو ماده صورت پذیرفته است. امروزه، برای تثبیت، به غیر از مواد تثبیت‌کننده سنتی، از تثبیت‌کننده‌هایی در ابعاد نانو نیز استفاده می‌شود. با توجه به این که در ایران یکی از مشکلات تثبیت خاک‌ها برای پروژه‌های بزرگ، خصوصاً ساخت و ساز، وجود خاک مسئله‌دار رسی می‌باشد، با استفاده از تکنولوژی نانو می‌توان ویژگی‌های مهندسی این نوع خاک را نیز تغییر داد، زیرا مواد نانو، باعث کاهش قدرت جذب آب در خاک رس‌دار می‌شوند.

پوسته برنج، محصول جانبی عمده صنعت عمل‌آوری برنج است که می‌تواند ماده خام در دسترس و از نظر اقتصادی، مقرون‌به‌صرفه‌ای برای تولید سیلیکات‌ها و سیلیکا باشد و به عنوان منبع ارزان‌قیمت جایگزین سیلیکای فعال برای تولید مواد با بنیان سیلیکون، برای مصرف تکنولوژیکی و صنعتی به کار رود. رفتار پوزولانی خاکستر پوسته برنج و واکنش شیمیایی آن، به ویژه در ترکیب با آهک، بستگی به شکل سیلیس و کربن موجود در آن و نیز درجه حرارت سوختن و زمان نگهداری در آن دما دارد. پوزولان‌ها، عبارتند از مواد سیلیسی، یا سیلیسی-آلومینی که خود، به تنهایی فاقد ارزش چسبانندگی بوده یا دارای ارزش چسبانندگی کم هستند، اما به شکل بسیار ریز در مجاورت رطوبت، طی واکنش شیمیایی با کلسیم هیدروکسید در دمای معمولی، ترکیب‌هایی با خاصیت سیمانی به وجود می‌آورند. این واکنش را واکنش پوزولانی می‌نامند. خواص پرکنندگی و واکنش پوزولانی میکروسیلیس، تأثیر بسیار قابل توجهی در افزایش مقاومت و دوام دارند.

نتیجه آزمایش حدود آتربرگ بر روی نمونه خاک اولیه و افزودن ۶ درصد آهک به خاک مورد آزمایش، به این صورت حاصل گردید که مقادیر نظیر حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری در نمونه خاک اولیه، به ترتیب، معادل ۶۴/۵۱، ۳۳/۸۷ و ۳۰/۶۴ و مقادیر نظیر نمونه خاک اولیه، با افزودن ۶ درصد آهک به عنوان درصد بهینه و پایه اصلی مقایسه‌ها و نتایج، به ترتیب، برابر ۳۲/۰۷، ۲۳/۳۸ و ۸/۷۰ به دست آمده‌اند که پس از این، آزمایش‌های افزودن درصد‌های وزنی دو ماده نانوکیتین و خاکستر پوسته برنج به نمونه خاک، انجام شده و مجدداً، آزمایش‌های حدود آتربرگ بر روی ترکیبات مختلف صورت پذیرفت.

بنابر موارد فوق، نتیجه بررسی افزودن آهک به یک نمونه خاک تورم‌پذیر با شاخص خمیری بالا و در مراحل بعد، افزودن درصد‌های وزنی مختلف از دو ماده نانوکیتین و خاکستر پوسته برنج، نشان داد که تمامی ترکیبات و درصد‌های مختلف سه ماده آهک، نانوکیتین و خاکستر پوسته برنج، منجر به کاهش مطلوب خصوصیات خمیری نمونه خاک اولیه مورد آزمایش شده‌اند. نکته قابل توجه، شدت کاهش این خصوصیات در زمان افزودن آهک تنها به نمونه اولیه بود که همانند تحقیقات گذشته، اثرات مطلوبی از لحاظ کاهش تورم‌پذیری خاک، در هنگام ترکیب با آهک مشاهده شده است.

پس از آن، هنگام افزودن آهک با درصد‌های مختلف دو ماده افزودنی، سرعت تغییرات، شدت کمتری به خود گرفته و به نوعی، یکنواخت‌تر گردیده است، اما روند کاهشی همچنان ادامه داشته و شاهد بهبود در خواص خمیری

خواهیم بود. اما مقایسه درصد‌های وزنی با حالتی که نمونه خاک و ۶ درصد آهک مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد که در برخی موارد، در خصوصیات خمیری، افزایش جزئی خواهیم داشت. البته، این افزایش، به گونه‌ای نیست که اعداد، به عددهای نظیر نمونه خاک اولیه نزدیک شوند، بلکه این افزایش، در مقایسه با اعداد نظیر نتیجه آزمایش نمونه خاک و آهک ۶ درصد است که آن هم، در تمامی درصد‌های وزنی نبوده و تنها در برخی از آنها اتفاق افتاده است.

نکته دیگر، این که بیشترین کاهش در حد روانی، در زمان افزودن درصد‌های وزنی دو ماده و حضور همزمان دو ماده رخ داده است و کاهش حد خمیری، هنگام بیشتر بودن سهم خاکستر پوسته برنج در ترکیبات و همچنین بیشترین میزان کاهش در شاخص خمیری، در زمان بیشتر بودن سهم نانوکیتین در ترکیبات افزودنی رخ داده است که قابل تأمل می‌باشد. در کل، این که، افزودن دو ماده خاکستر پوسته برنج و نانوکیتین در درصد‌های وزنی مختلف به ترکیب آهک و نمونه خاک تورم‌پذیر، منجر به حصول نتایج مطلوبی جهت دستیابی به کاهش هر چه بیشتر خصوصیات تورم‌پذیری خاک مشکل‌آفرین می‌شود.

برای مقابله با اثرات مخرب خاک‌های تورم‌پذیر، روش‌های مختلفی توسط محققان ارائه شده است. تثبیت شیمیایی خاک‌های متورم‌شونده، یکی از روش‌های مؤثر می‌باشد که به لحاظ اقتصادی و فنی، کم‌هزینه و کارآمد است. اخیراً، با پیشرفت علم نانو در زمینه تهیه و کاربرد نانومواد، استفاده از این نوع مواد در علوم مختلف، به ویژه مهندسی ژئوتکنیک، مورد توجه خاصی قرار گرفته است. یکی از اقداماتی که برای رساندن مقاومت به حد مطلوب، صورت می‌گیرد، استفاده از روش‌های اصلاح و تثبیت مناسب خاک است. مواد تثبیت‌کننده را به ۲ گروه افزودنی‌های متعارف و غیرمتعارف طبقه‌بندی می‌کنند.

افزودنی‌های متعارف، از قبیل آهک، سیمان و قیر، از پرکاربردترین افزودنی‌ها هستند که به تنهایی یا به صورت ترکیبی، در تثبیت محدوده وسیعی از خاک‌ها کاربرد دارند. هرچند برخی از این تثبیت‌کننده‌ها اثراتی غیر از چسباندن ذرات خاک را نیز دارا هستند، اما تثبیت خاک با استفاده از این تثبیت‌کننده‌ها، اغلب بر اساس چسباندن ذرات به یکدیگر صورت می‌گیرد. اساس کار دو تثبیت‌کننده اول، واکنش شیمیایی بین تثبیت‌کننده، آب و ذرات خاک است و این دو ماده، به تثبیت‌کننده‌های سیمانی معروفند. علاوه بر افزودنی‌های متعارف، دیگر افزودنی‌ها، در دسته افزودنی‌های غیرمتعارف قرار می‌گیرند. سابقه استفاده از این مواد، به جنگ جهانی دوم می‌رسد. هدف راهبردی در آن زمان، این بود که با استفاده اندک از یک ماده بتوانند ظرفیت باربری خاک را به سرعت ارتقاء دهند و فرودگاه یا مسیر مناسب برای عبور وسایل نقلیه فراهم کنند. آنچه از نتایج آزمایش‌ها برداشت گردید، نتیجه بررسی افزودن آهک به نمونه خاک تورم‌پذیر با شاخص خمیری بالا و مقاومت فشاری اندک و در مراحل بعد، افزودن درصد‌های وزنی مختلف دو ماده نانوکیتین و خاکستر پوسته برنج و سهم‌های مشارکتی مختلف آنها، نشان داد که تمامی ترکیبات و درصد‌های مختلف وزنی سه ماده آهک، نانوکیتین و خاکستر پوسته برنج، منجر به افزایش مطلوب مقاومت فشاری نمونه خاک اولیه مورد آزمایش شده‌اند. آزمایش‌های صورت گرفته، بیانگر این نکته هستند که در زمان افزودن ۶ درصد آهک به نمونه خاک اولیه، مقاومت فشاری به نحو مطلوب و مؤثری افزایش پیدا کرده و در مقایسه با نتایج

مقاومت نمونه خاک اولیه، افزایش‌هایی، به ترتیب، برابر ۷۲، ۱۱۸، ۱۳۲ و ۱۵۴ درصد در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸، ۴۲ و ۹۰ روزه، در مقاومت نمونه‌ها حاصل گردیده که این افزایش، مطلوب و قابل توجه بوده است.

سپس، به منظور تسلیح و تثبیت همزمان در یک مرحله، اقدام به افزودن دو ماده نانوکیتین و خاکستر پوسته برنج، به ترکیبات خاک و ۶ درصد آهک گردید که این ۶ درصد، میزان بهینه و مطلوب درصد ترکیب آهک، به منظور رسیدن به تثبیت مطلوب بوده است. نتایج در این مورد، نشان‌دهنده افزایش قابل تأملی بود که در مقایسه با نتایج مقاومت فشاری خاک اولیه، تغییراتی تا ۳۴۲ درصد در مقاومت نمونه اولیه حاصل گردید که نزدیک به سه و نیم برابر مقاومت فشاری اولیه بود. با مقایسه نتایج ترکیبات و درصد‌های وزنی دو ماده، با نتایج مربوط به ترکیب آهک و نمونه خاک اولیه، مشاهده گردید که در ابتدای ترکیبات و سهم مشارکت ۱۰۰ درصدی خاکستر پوسته برنج، در غیاب نانوکیتین، قدری از مقاومت کاسته شده که در مراحل مختلف و درصد‌های مختلف وزنی، چیزی در حدود ۲۰ درصد بوده است، اما شایان ذکر است که این کاهش، تنها در مقایسه با مقاومت ترکیب نمونه اولیه و آهک می‌باشد و در مقایسه با مقاومت فشاری نمونه اولیه، مقاومت، افزایش مطلوبی داشته است. با افزایش سهم مشارکت نانوکیتین در ترکیبات، افزایش در مقاومت، بیشتر و چشمگیرتر شده و هرچه سهم نانوکیتین بیشتر و سهم خاکستر کمتر شده، شدت افزایش نیز بیشتر شده است و در زمان افزودن ۸ درصد وزنی و سهم مشارکت ۱۰۰ درصدی نانوکیتین در ترکیب، شاهد بیشترین مقاومت بوده‌ایم و این مقدار، در مقایسه با مقاومت نمونه اولیه، افزایش حدود ۳/۴ برابر و در مقایسه با ترکیب نمونه اولیه و ۶ درصد آهک، افزایش حدود ۳۵ درصد داشته است.

نکته دیگر، این که به منظور حصول اطمینان از این مطلب که ۸ درصد وزنی، مقدار درصد بهینه می‌باشد، پس از اتمام آزمایش‌ها، باز هم اقدام به انجام آزمایش با ۱۰ و ۱۲ درصد وزنی از ترکیبات گردید و نتایج با زمان افزودن ۸ درصد وزنی مقایسه گردید که افزایش‌ها و تغییراتی در حدود ۱ درصد در نتایج مشاهده گردید و با توجه به این‌که ما به دنبال تثبیت و تسلیح همزمان با بهینه‌ترین درصد بودیم، همان مقدار ۸ درصد وزنی ترکیبات، به عنوان درصد بهینه ملاک قرار گرفت.

همچنین، مقایسه نتایج آزمایش‌ها در زمان‌های عمل‌آوری و تیمار نمونه‌ها، نشان داد که هرچه از زمان ساخت نمونه‌ها و عمل‌آوری آنها می‌گذرد، مقدار مقاومت فشاری، با شیبی تند و صعودی افزایش یافته و بهبود مقاومت اولیه، مشهود است. در درصد‌های پایین افزودن دو ماده نانوکیتین و خاکستر پوسته برنج، در روزهای اولیه، در مقایسه با نتایج آزمایش تک‌محوری بر روی نمونه ساخته شده از ۶ درصد آهک و خاک اولیه، حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد کاهش در مقاومت مشاهده می‌گردد و هرچه زمان عمل‌آوری و درصد وزنی دو ماده در ترکیب بیشتر گردد، این کاهش، به شدت کم شده و جای خود را به افزایش چشمگیر و مطلوبی خواهد داد. همچنین، هرچه سهم نانوکیتین در ترکیبات بیشتر باشد، شدت افزایش مقاومت، به نحو چشمگیری، مطلوب و درخور توجه خواهد بود.

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری محصورنشده و در راستای هدف تحقیق که درصد بهینه و بیشترین تأثیرگذاری بوده است، ۸ درصد وزنی دو ماده نانوکیتین و خاکستر پوسته برنج، به عنوان درصد بهینه در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، آزمایش‌های سه‌محوری با روش تحکیم‌نیافته - زهکشی‌نشده (UU) بر روی نمونه خاک اولیه، نمونه خاک اولیه با افزودن ۶ درصد آهک در دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روز، نمونه خاک اولیه با

افزودن آهک و ۸ درصد وزنی از دو ماده نانوکیتین و خاکستر پوسته برنج در سهم‌های مشارکتی ۱۰۰ درصد خاکستر پوسته برنج و صفر درصد نانوکیتین، ۲۵ درصد خاکستر پوسته برنج و ۷۵ درصد نانوکیتین و صفر درصد خاکستر پوسته برنج و ۱۰۰ درصد نانوکیتین، در دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شدند.

به طور کلی، می‌توان گفت که در تمام نمونه‌ها، در تمام دوره‌های عمل‌آوری، چسبندگی نسبت به نمونه خاک اولیه، روندی صعودی داشته است. همچنین، با افزایش زمان عمل‌آوری، افزایش چسبندگی نسبت به نمونه خاک اولیه، روندی صعودی‌تر و با شدت بیشتر داشته است. در مجموع، نتایج، تأثیر مثبت افزودن نانوکیتین و خاکستر پوسته برنج را بر چسبندگی نشان داده‌اند. همچنین، هنگام مشارکت ۱۰۰ درصدی نانوکیتین در حضور آهک، بیشترین مقدار چسبندگی نسبت به نمونه خاک اولیه، و نمونه خاک اولیه با افزودن ۶ درصد آهک تنها، حاصل شده که با توجه به این نتیجه، می‌توان گفت که تقریباً هرچه سهم نانوکیتین در ترکیبات، بیشتر و سهم خاکستر پوسته برنج کمتر شود، میزان افزایش چسبندگی بیشتر است.

همچنین، با مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های سه‌محوری برای زاویه اصطکاک داخلی، مشاهده گردید که در تمام دوره‌های عمل‌آوری، در نمونه‌های مورد بررسی (نمونه خاک اولیه با ۶ درصد آهک، نمونه خاک اولیه با ۶ درصد آهک و ۱۰۰ درصد خاکستر، نمونه خاک اولیه، ۷۵ درصد نانو و ۲۵ درصد خاکستر و نمونه خاک اولیه با ۱۰۰ درصد نانوکیتین)، زاویه اصطکاک داخلی در نمونه خاک اولیه با افزودن آهک تنها، نسبت به زاویه اصطکاک داخلی نمونه خاک اولیه کاهش یافته و در سایر ترکیبات، افزایش زاویه اصطکاک داخلی نسبت به زاویه اصطکاک داخلی نمونه خاک اولیه مشاهده شده است. همچنین، با گذشت زمان عمل‌آوری، نمودار، روند نزولی پیدا کرده است. به طور کلی، با افزایش زمان عمل‌آوری، زاویه اصطکاک داخلی، روندی نزولی را طی نموده است.

با محاسبه مقادیر ظرفیت باربری نمونه‌ها، مشاهده شد که در تمام نمونه‌ها، ظرفیت باربری نسبت به ظرفیت باربری نمونه خاک اولیه و نمونه خاک اولیه با افزودن ۶ درصد آهک، افزایش یافته و روندی صعودی طی کرده است. همچنین، در تمام نمونه‌ها، با گذشت زمان عمل‌آوری و با افزایش سهم نانوکیتین، ظرفیت باربری نسبت به ظرفیت باربری نمونه‌ی خاک اولیه افزایش یافته است. از سوی دیگر، با افزایش زمان عمل‌آوری، میزان افزایش ظرفیت باربری نمونه‌ها با افزودن مواد افزودنی در حضور آهک، نسبت به ظرفیت باربری نمونه خاک اولیه و آهک، کاهش یافته است، میزان این کاهش نسبت به نتایج ۷ روزه، در ۲۸ روز، در مقایسه با ۹۰ روز بیشتر است. به طور کلی، با توجه به این که ظرفیت باربری در خاک رس، تابعی از چسبندگی خاک می‌باشد، روند تغییرات ظرفیت باربری، مشابه تغییرات چسبندگی بوده است.

هدف از انجام این تحقیق، تثبیت و تسلیح همزمان در یک مرحله بوده است و همان‌طور که مشاهده گردید، با افزودن نانوکیتین، این هدف محقق گردید و همزمان با کاهش خصوصیات خمیری نمونه خاک تورم‌پذیر و ناپایدار اولیه، مقاومت فشاری نیز به نحو مطلوب و مؤثری، افزایش یافته و پارامترهای مقاومت برشی و همچنین، ظرفیت باربری خاک بهبود یافته است. در کل، این که ترکیبات نانوکیتین و آهک و همچنین ترکیب سه ماده آهک، نانوکیتین و خاکستر پوسته برنج، به نحو مطلوب و تأثیرگذاری، باعث کاهش خصوصیات نامطلوب نمونه خاک ناپایدار و متورم‌شونده اولیه شده‌اند و نتایج، کاملاً مؤید و تصدیق‌کننده هدف تحقیق و آزمایش‌ها می‌باشند.

خاک‌های رسی از جمله خاک‌های مسأله‌داری هستند که در نقاط زیادی از ایران و سایر نقاط جهان مشاهده می‌شوند. خصوصیات مقاومتی کم، ظرفیت باربری پایین و نفوذپذیری بالای آن‌ها، باعث شده است که این خاک‌ها گزینه مناسبی برای استفاده به عنوان تکیه‌گاه برای سازه‌ها یا به عنوان زیراساس برای راه‌ها نباشند. همچنین، با توجه به توسعه چشمگیر ایجاد فرودگاه‌ها، تونل‌های زیرزمینی، احداث اسکله‌های عظیم، بزرگراه‌ها، احداث سدها و سازه‌های مربوط به آنها، شبکه‌های عظیم آبیاری و زهکشی و ... نیاز به مصالح ساختمانی، تا حد زیادی افزایش پیدا کرده است. بر این اساس، امروزه، استفاده از مصالح جایگزین که از نظر مهندسی، کیفیتی بالاتر از مصالح مورد استفاده در گذشته داشته و همچنین، از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه‌تر باشند، مورد توجه زیادی قرار گرفته است. توجه به این قضیه که خاک نمی‌تواند تمام خصوصیات ژئوتکنیکی موردنیاز برای پروژه را در بر داشته باشد، اهمیت استفاده از روش‌های متفاوت برای بهبود شرایط خاک را روشن می‌سازد. خاک رس، به نحو گسترده‌ای در اکثر پروژه‌های عمرانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله روش‌هایی که برای بهبود خصوصیات فیزیکی و ژئوتکنیکی خاک رس به صورت دائمی انجام می‌گیرد، استفاده از مخلوط آهک و خاک رس می‌باشد. آهک، طی انجام یک سری واکنش‌های شیمیایی با ذرات رس، خصوصیات این خاک را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد. به صورتی که می‌توان از این مخلوط برای زیرسازی جاده‌ها با ترافیک سبک، سرویس کانال‌های انتقال آب، افزایش پایداری شیب‌های جانبی جاده و جلوگیری از نشست آب در زیر جاده استفاده کرد. در صورتی که در منطقه احداث سازه، خاک رس وجود داشته باشد، از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه‌تر است که با بهسازی خاک رس موجود و استفاده از آن، حتی‌المقدور، از مصالح دیگر برای احداث سازه استفاده نشود. در بعضی مواقع، مقاومت ناشی از افزودن آهک به خاک رس، به تنهایی نمی‌تواند جوابگوی نیازهای پروژه باشد و به مقاومت بیشتری نیاز می‌باشد. لذا، علاوه بر آهک، می‌توان از مواد و مصالح دیگری نیز استفاده کرد. از طرفی، مواد شیمیایی نظیر آهک و سیمان استفاده شده، بسیار ناسازگار با محیط زیست بوده و همان‌گونه که ذکر گردید، می‌باید با کاربرد یک پوزولان ارزان‌قیمت و سازگار با محیط زیست، مقدار مصرف آن را کاهش داد. در مراحل اجرا، در حالت عادی، ابتدا ژئوسینتتیک در روی خاک قرار داده شده و سپس خاک مخلوط با آهک یا سیمان، روی آن ریخته شده و کوبیده می‌شود.

با توجه به موارد فوق، پیشنهاد می‌گردد در آینده، تحقیقاتی جهت تکمیل شدن این تحقیق و تأثیر نانومواد در بهسازی خصوصیات خاک‌ها، مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

منابع

- بیات، آ (۱۳۹۳). بررسی آزمایشگاهی تثبیت خاک بستر راه شهداد نهبندان با استفاده از آهک، سیمان، ZAM1، ZAM2، RRP. پایان-نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی عمران. دانشگاه تهران. ص ۱۶.
- تقوایی، م، رضایی، م، ر، تازش، ی (۱۳۹۶). توانمندیهای محیط طبیعی و نقش آن در برنامه‌ریزی توسعه گردشگری شهری، فصلنامه علمی و پژوهشی جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای)، دوره ۸، شماره ۱، شماره پیاپی ۲۹، ۳۶۱-۳۴۵ صص.
- تویسرکانی، ح، و صداقت، ف (۱۳۹۱). کیتین و کیتوسان: ساختار، خصوصیات و کاربردها. مجله‌ی بوم‌شناسی آریزان. جلد ۲. شماره ۳.
- تیموری، ا، و تیموری یانسری، م (۱۳۹۳). تثبیت خاک و مصالح شنی با آهک در طرح روسازی. ماهنامه بین‌المللی راه و ساختمان. شماره ۹۷.
- جان‌بزرگی، ا، و قنّاد، ز (۱۳۸۹). کاربرد تکنولوژی نانو در صنعت ساختمان. فصلنامه علمی - نظری کیسون. دوره جدید. شماره ۴۴.

- رحیمی، ح.، و عباسی، ن. (۱۳۹۴). مهندسی ژئوتکنیک (خاک‌های مشکل‌آفرین). چاپ اول. فصل دوم. تهران: انتشارات دانشگاه تهران. ۲۳۱ ص.
- رضایی‌زاده مهابادی، ک.، محمدی، ح.، سرور، ر. (۱۳۹۸). امکان‌سنجی ایجاد شهرهای پایدار و هوشمند در ایران. مورد مطالعه: منطقه جنوب شرق ایران، فصلنامه علمی و پژوهشی جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای)، سال دهم، شماره ۱، ۶۵۸-۶۴۳ صص.
- ریگی، م.ر.، فراهی، م.، کلکلی، ص. (۱۳۹۸). ارزیابی شدت فرسایش بادی و پتانسیل رسوبدهی آن با استفاده از مدل اریفر در منطقه روتک و مک سوخته سراوان، فصلنامه علمی و پژوهشی جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای)، سال دهم، شماره ۱، ۴۶۴-۴۴۹ صص.
- سلیمی، ه.، کرمی، م.، و محمدی، م. (۱۳۹۰). بررسی آزمایشگاهی اثر نانوسیلیس بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس رشت. همایش ملی سازه، راه و معماری. دانشگاه آزاد اسلامی واحد چالوس. ۳ تا ۴ اسفند.
- طاهرخانی، ح.، و جوانمرد، م. (۱۳۹۴). مقایسه تأثیر سیمان، آهک و نانوپلیمر CBR PLUS در کاهش تورم خاک‌های رسی بستر رجنسازها. نشریه زمین‌شناسی مهندسی. جلد نهم. شماره ۴.
- عابدینی، ف. و همکاران (۱۳۹۲). بررسی و تحلیل چگونگی بهره‌گیری از فناوری نانو در توسعه معماری پایدار. همایش ملی معماری پایدار و توسعه شهری. بوکان. اردیبهشت‌ماه.
- محتشم، ر.، ابریشمی، س.، و طباطبایی عدنانی، ا.ع (۱۳۹۰). مطالعه و تحلیل عددی عملکرد ستون‌های سنگی محصور شده با ژئوستنتیک‌ها در خاک رس. اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه، زیباکنار. ایران.
- محمدزاده ثانی، ا.، عربانی، م.، خداپرست حقی، ا.، و جمشیدی چناری، ر. (۱۳۸۹). تأثیر نانورس بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه-های رس‌دار. چهارمین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران. تهران. آبان‌ماه.
- ASTM-D2166-06. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. ASTM International. American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- Abbasi, N., Farjad A., & Sepehri, S (2017). The use of nanoclay particles for stabilization of dispersive clayey soils. *Journal of geotechnical and geological engineering*. Vol. 35, 1-9. doi:0.1007/s10706-017-0330-9.
- Al-Rawas, A. A., Taha, R., Nelson, J.D., Beit Al-Shab, T., & Al-Siyabi, H (2002). A comparative evaluation of various additives used in the stabilization of expansive soils. *Geotechnical testing journal*. 25 (2), 199-209.
- Al-Zoubi, M.S (1993). *Effect of physicochemical changes on the compressibility of selected Azraq green clay*. Thesis Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in civil engineering at Jordan University of Science and Technology.
- Attom, M., & Shatnawi, M (2005). Stabilisation of clayey soils using Hay materials. *Journal of Solid Waste technology and management*, 31(2).
- Bae, K.P., & Moon, M.K (2010). Applications of Chitin and its derivatives in biological medicine. *International journal Molecular Sciences*. 11(12).
- Beeghly J. H (2003). Recent experiences with lime-fly ash stabilization of pavement subgrade soils, Base, and recycled asphalt. *Proceedings of the international ash utilization symposium*. University of Kentucky. Lexington, US.
- Bell, F.G (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils, *Engineering geology journal*, 42(4), 223-237.
- Chang, p., Jian, R., Yu, J., & Ma, X (2010). Starch-based composites reinforced with novel chitin nanoparticles. *Carbohydrate polymers journal*. 80(2), 420-425.
- Croft, J.B (1967). The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization. *Geotechnique journal*. London, England. 17(2), 119-135.
- Dedzo, G.K., & Detellier, C (2017). Characterization and applications of Kaolinite Robustly grafted by an ionic liquid with Naphthyl Functionality. *Materials (Basel)*. 10(9), doi:10.3390/ma10091006.
- Djellali, A., Ounis, A., 7 Saghafi, B (2012). Behaviour of flexible pavements on expansive soils. *International journal of transportation engineering*. 1(1), 1-14.

- Liongso P.E (2012). Field evaluation of stabilization in swelling clay for concrete pavement. *International conference on sustainable design and construction*. ASCE Texas section.
- Locat, J., Tremblay, H., & Leroueil, S (1996). Mechanical and hydraulic behavior of a soft inorganic clay treated with lime. *Canadian geotechnical journal*. 33, 654-669.
- Morsy, M.S., Alsayed, S.H., & Aqel, M (2010). Effect of nano-clay on mechanical properties and microstructure of ordinary portland cement mortar. *International journal of civil & environmental engineering (IJCEE)*.10(1).
- Majeed, Z.H., & Taha, M.R (2012). Effect of nanomaterial treatment on geotechnical properties of a penang soil. *Journal of Asian scientific research*. 2, 587-592.
- Mishra, E.N.K (2012). Strength characteristics of clays subgrade soil stabilization with fly-ash and lime for road works. *Indian geotechnical journal*. 4(7), 206-211.
- Neyshabouri, M.R., Mirzajani, M., & Oustan, Sh (2013). Effect of polyacrylamide and organic matter on three structure stability indices in two fine and medium textured soils under various wetting and drying cycles. *Journal of soil water science*. 22(4), 161-172.
- Petry T., & Little, D (2002). Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures-history, practice, and future. *Journal of materials in civil engineering*. 14(6), 447-460.
- Pohl, W.L (2011). *Economic geology: principles and practice: metals, minerals, coal and hydrocarbons – introduction to formation and sustainable exploitation of mineral deposits*. Chic ester, West Sussex: Wiley-Blackwell. p. 331. ISBN 978-1-4443-3662-7.
- Pradip, K.D., Joydeep, D., & Tripathi, V.S (2004). Chitin and chitosan: Chemistry, properties and applications. *Journal of scientific & industrial research*. 63, 20-31.
- Ramírez, M.A., Rodríguez, A.T., Alfonso, L., & Peniche, C (2010). Chitin and its derivatives as biopolymers with potential agricultural applications. *Biotecnología aplicada*. 27(4), 270-276.
- Ravi Kumar, M.V (2001). A Review of chitin and chitosan applications. *Reactive and functional polymers*. 46, 1-27.
- Sharma N.K., Swain S.K., & Sahoo U.C (2012). Stabilization of a clayey soil with fly-ash and lime: a micro level investigation. *Journal of geotechnical and geological engineering*. 1197-1205.
- Taha, M.R & Taha, O.M.E (2012). Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior. *Journal of nanoparticle research*. 14(1190), doi: 10.1007/s11051-012-1190-0.
- Taha, M.R (2009). Geotechnical properties of soil-ball milled soil mixtures. *Nanotechnology in construction*. 3, 377-382.
- Taipodia, J., Dutta, J., & Dey, A.K (2011). Effect of nano particle of soil. *Proceedings of indian geotechnical conference*. December 15-17. Kochi (Paper No-A-218).
- Zhang, G (2007). Soil nanoparticle and their influence on engineering properties of soils. *Advances in measurement and modeling of soil behavior*. Geo-Denver 2007. Colorado. United States. February 18-21.