

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



سازمان مجری ساختمانها و تاسیسات
دولتی و عمومی



مرکز تحقیقات و آموزش شهرداری

مطالعه خاک‌های مسئله‌دار در ایران و ارائه راهکارهای بهسازی

مجری: سعید هاشمی طباطبایی

همکار: امیر سعید سلامت

نماینده کارفرما: رحیم بادامیان

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	۱ مقدمه.....
۲	۱-۱ پیش بارگذاری.....
۲	۲-۱ تراکم دینامیکی.....
۳	۳-۱ ستون‌های خاک و سیمان.....
۳	۴-۱ تراکم ارتعاشی.....
۴	۵-۱ ستون سنگی جایگزینی ارتعاشی.....
۴	۶-۱ ستون‌های خاک-آهک.....
۴	۷-۱ مواد افزودنی.....
۴	۱-۷-۱ آهک.....
۵	۲-۷-۱ سیمان.....
۶	۳-۷-۱ استفاده از مواد شیمیایی نوین.....
۷	۸-۱ واکنش‌های شیمیایی میان خاک رس و آهک.....
۷	۱-۸-۱ واکنش‌های تبادل کاتیونی آهک.....
۷	۲-۸-۱ واکنش‌های پوزولانی آهک.....
۸	۳-۸-۱ واکنش کربناتاسیون آهک.....
۹	۹-۱ تأثیر آهک بر خواص مکانیکی خاک‌های رسی.....
۱۰	۱۰-۱ تأثیر آهک بر دانه‌بندی.....
۱۰	۱۱-۱ تأثیر آهک بر حدود اتربرگ.....
۱۱	۱۲-۱ تأثیر آهک بر خصوصیات تغییر حجم و قابلیت تورم خاک.....
۱۲	۱۳-۱ تأثیر آهک بر میزان تراکم.....
۱۳	۱۴-۱ تأثیر آهک بر نفوذپذیری خاک و کاهش درصد آب.....
۱۳	۱۵-۱ تأثیر آهک بر مقاومت برشی و فشاری خاکهای تثبیت شده.....
۱۴	۱۶-۱ تأثیر آهک بر روی حساسیت خاک‌های رسی.....
۱۵	۱۷-۱ تأثیر آهک بر مقاومت در برابر چرخه‌های یخ‌زدگی و آب شدن.....
۱۵	۱۸-۱ چگونگی عملکرد نانو ذرات پلیمری در خاکهای رس.....
۱۸	۱-۱۸-۱ ذرات پلیمری در خاک‌های رس.....
۱۹	۱۹-۱ جمع‌بندی.....
۱۹	۲۰-۱ روش تحقیق.....
۲۱	۲ مقدمه.....
۲۳	۱-۲ آزمایش‌های شاخص.....
۲۳	۱-۱-۲ آزمایش دانه‌بندی و هیدرومتری.....

۲۳	..... ۲-۱-۲ آزمایش تعیین حدود اتربرگ
۲۴	..... ۳-۱-۲ آزمایش تعیین درصد رطوبت خاک
۲۵	..... ۲-۲ آزمایش‌های مکانیکی
۲۵	..... ۱-۲-۲ آزمایش تراکم
۲۶	..... ۲-۲-۲ آزمایش مقاومت فشاری
۲۸	..... ۳-۲-۲ آزمایش برش مستقیم ۱۰*۱۰ cm
۳۲	..... ۳ مقدمه
۳۲	..... ۱-۳ آزمایش‌های شاخص
۳۲	..... ۱-۱-۳ آزمایش تعیین حدود اتربرگ
۳۲	..... ۱-۲-۱-۳ بررسی نتایج آزمایش اتربرگ
۳۳	..... ۳-۱-۳ آزمایش تعیین درصد رطوبت خاک
۳۴	..... ۲-۳ آزمایش‌های مکانیکی
۳۴	..... ۱-۲-۳ آزمایش تراکم
۳۴	..... ۲-۲-۳ آزمایش مقاومت فشاری
۳۶	..... ۳-۲-۳ آزمایش برش مستقیم ۱۰*۱۰ cm
۳۹	..... ۴ مقدمه
۳۹	..... ۱-۴ جمع‌بندی
۴۵	..... ۲-۴ نتیجه‌گیری
۴۷	..... فهرست منابع

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ بهسازی خاک با آهک و سیمان	۱۰
شکل ۲-۱ تغییرات حد مایع و میزان رطوبت بر حسب میزان آهک هیدراته [۳]	۱۱
شکل ۳-۱ مواد افزودنی برای پایدارسازی خاک‌ها با دانه‌بندی و پلاستیسیته متفاوت [۱۰]	۱۱
شکل ۴-۱ منحنی‌های تراکم خاک ریزدانه [۱۰]	۱۲
شکل ۵-۱ ذرات رس بعد از جذب پلیمر [۲۰]	۱۵
شکل ۶-۱ رس معدنی به مانند یک کتاب ۱۰۰ برگ است که هر صفحه از آن سطح مختص خود را دارد $200 \times a \times b =$ مساحت رس [۲۰]	۱۶
شکل ۷-۱ مولکول نانو پلیمر پلی وینیل استات [۲۰]	۱۶
شکل ۸-۱ جذب آب توسط رس [۲۰]	۱۷
شکل ۹-۱ افزایش حجم ذرات رس [۲۰]	۱۷
شکل ۱۰-۱ چسبیدن ذرات رس به هم [۲۰]	۱۸
شکل ۱۱-۱ پلی وینیل استات، در ساختار رس جایگزین مولکول‌های آب می‌شود [۲۰]	۱۸
شکل ۱-۲ محل ساختگاه مورد مطالعه	۲۱
شکل ۲-۲ نمودار روند انجام مطالعات تثبیت خاک با مواد افزودنی آهک و نانو	۲۲
شکل ۳-۲ نمودار دانه‌بندی خاک	۲۳
شکل ۴-۲ نمودار تغییرات میزان رطوبت بر اساس درصد رطوبت و مدت زمان عمل آوری	۲۵
شکل ۵-۲ دستگاه آزمایش مقاومت فشاری	۲۷
شکل ۶-۲ نحوه شکست نمونه پس از انجام آزمایش مقاومت فشاری	۲۷
شکل ۷-۲ نمودار تغییرات مقاومت فشاری درصدهای مختلف آهک در زمانهای مختلف عمل آوری	۲۸
شکل ۸-۲ الف نمونه آماده شده در قالب برش، ب دستگاه برش مستقیم	۲۹
شکل ۹-۲ نمونه‌هایی از نحوه شکست نمونه پس از انجام آزمایش مقاومت برش مستقیم	۲۹
شکل ۱۰-۲ تغییرات چسبندگی با درصدهای متفاوت آهک و در زمان‌های عمل آوری ۷،۲۸ و ۵۶ روزه در آزمایش برش مستقیم $10 \times 10 \text{ cm}$	۳۰
شکل ۱۱-۲ تغییرات زاویه اصطکاک داخلی با درصدهای متفاوت آهک زمان‌های عمل آوری ۷،۲۸ و ۵۶ روزه در آزمایش برش مستقیم $10 \times 10 \text{ cm}$	۳۰
شکل ۱-۳ نمودار تغییرات میزان رطوبت بر اساس درصد نانو و مدت زمان عمل آوری	۳۳
شکل ۲-۳ نمودار تغییرات مقاومت فشاری با درصدهای مختلف نانودر زمانهای مختلف عمل آوری	۳۵
شکل ۳-۳ تغییرات چسبندگی با درصدهای متفاوت نانو و در زمان‌های عمل آوری ۷،۲۸ و ۵۶ روزه در آزمایش برش مستقیم $10 \times 10 \text{ cm}$	۳۷

- شکل ۳-۷ تغییرات زاویه اصطکاک داخلی با درصدهای متفاوت نانو و در زمان‌های عمل آوری ۷،۲۸ و ۵۶ روزه در آزمایش برش مستقیم ۱۰*۱۰cm ۳۷
- شکل ۴-۱ نمودار تغییرات میزان رطوبت بر اساس درصدهای نانو و آهک و مدت زمان عمل آوری ۴۲
- شکل ۴-۲ نمودار تغییرات مقاومت فشاری با ۲، ۴ و ۶ درصد آهک و نانودر زمانهای مختلف عمل آوری ۴۳
- شکل ۴-۳ نمودار تغییرات چسبندگی با مقادیر ۲، ۴ و ۶ درصد آهک و نانو در زمانهای مختلف عمل آوری ۴۴
- شکل ۴-۴ نمودار تغییرات زاویه اصطکاک داخلی با مقادیر ۲، ۴ و ۶ درصد آهک و نانودر زمانهای مختلف عمل آوری ۴۵

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱ نتایج بررسی مصالح ساختمانی در چند استان کشور [۱۸].....	۱۴
جدول ۲-۱ نتایج آزمایشهای فیزیکی مصالح ساختمانی در چند استان کشور [۱۸].....	۱۴
جدول ۱-۲ مقادیر حدود اتربرگ خاک طبیعی و خاک با درصدهای مختلف آهک و عمل آوری ۷،۲۸ و ۵۶ روزه.....	۲۴
جدول ۲-۲ تغییرات میزان رطوبت بر اساس درصد رطوبت و مدت زمان عمل آوری برای نمونه‌های حاصل از آزمایش مقاومت فشاری.....	۲۵
جدول ۳-۲ مقادیر رطوبت بهینه و حداکثر دانسیته خشک خاک اصلی و خاک با درصدهای معین آهک....	۲۶
جدول ۴-۲ نتایج تغییرات حداکثر مقاومت فشاری با درصدهای مختلف آهک و زمانهای مختلف عمل آوری.....	۲۸
جدول ۵-۲ پارامترهای حاصله از آزمایش برش مستقیم ۱۰*۱۰cm بر روی نمونه‌های خاک طبیعی و مخلوط با آهک.....	۳۰
جدول ۱-۳ مقادیر حدود اتربرگ خاک با درصدهای مختلف نانو و عمل آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه.....	۳۳
جدول ۲-۳ تغییرات درصد رطوبت در زمانهای مختلف عمل آوری برای نمونه‌های حاصل از آزمایش مقاومت فشاری.....	۳۳
جدول ۳-۳ مقادیر رطوبت بهینه و حداکثر دانسیته خشک خاک اصلی و خاک با درصدهای معین نانو.....	۳۴
جدول ۴-۳ نتایج تغییرات حداکثر مقاومت فشاری با درصدهای مختلف نانو و زمانهای مختلف عمل آوری.....	۳۵
جدول ۵-۳ پارامترهای حاصله از آزمایش برش مستقیم ۱۰*۱۰cm بر روی نمونه‌های خاک طبیعی و مخلوط با نانو.....	۳۶
جدول ۱-۴ مقادیر حدود اتربرگ خاک با درصدهای مختلف آهک و نانو و عمل آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه.....	۴۱
جدول ۲-۴ مقادیر رطوبت بهینه و حداکثر دانسیته خشک خاک اصلی و خاک با درصدهای معین نانو.....	۴۳

فصل اول

کلیات

۱ مقدمه

خاک‌های مسئله‌دار، خاک‌هایی هستند که در پروژه‌های عمرانی مشکلات فنی و مهندسی زیادی از قبیل ریزش و یا ترک خوردگی ساختمان‌ها، نشست ناهمگون ساختمان، بالا آمدن سطح آب زیرزمینی که در نقاط پست می‌تواند به دلیل ایجاد تورم ساختگاه مشکلاتی برای پی ساختمان‌ها به وجود آورد را به همراه دارند. روان‌گرایی خاک در هنگام وقوع زلزله و استقرار شهرک‌ها بر روی خاک‌های مسأله‌دار و مشکلات فراوان دیگری از این قبیل اطلاع از خصوصیات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی محل انجام پروژه را امری اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. در سال‌های اخیر، رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای تهیه مسکن و توسعه صنعت ساختمان، با توجه به ساخت و ساز در شهرهای بزرگ، بدون رعایت مسائل زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، مشکلات فنی و مهندسی زیادی را به همراه داشته که یکی از مهم‌ترین آنها خاک‌های مسئله‌دار می‌باشد.

بهسازی خاک، در کلیه مسائل مهندسی خاک و بخصوص در شرایط ضعیف بودن آن مطرح می‌باشد. این عمل به منظور اصلاح کاربرد مهندسی خاک برای دستیابی به اهداف مختلف انجام می‌شود. انتخاب روش بهسازی خاک به صورت طبقه‌بندی شده امر مشکلی است. روش‌های بهسازی متعددی جهت خاک زیر پی از جمله عبور از اثرهای خاک ضعیف با استفاده از پی‌های عمیق، برداشت خاک ضعیف و جایگزینی با مصالح پرکننده مهندسی و بهسازی خواص خاک در محل وجود دارد. 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. اهداف متفاوتی برای بهسازی خاک وجود دارند. از جمله می‌توان به افزایش ظرفیت باربری، افزایش پایداری شیب و کاهش نشست پی برای خاک‌های دانه ریز و درشت اشاره نمود. مکانیسم‌های مرتبط با بهسازی خواص خاک‌های رسی شامل تحکیم خاک رس با انجام پیش بارگذاری، اجرای ستون‌های سیمان - خاک یا آهک - خاک و یا هر دو مصالح می‌باشد.

مکانیسم‌های مرتبط با خاک‌های ماسه‌ای رس دار، شامل تراکم دینامیکی با استفاده از ضربه زدن به سطح خاک، لرزاندن و جابجایی خاک مورد نظر با استفاده از ستون شنی جایگزینی، جابجایی مواد حفاری شده از طریق تزریق تراکمی، استفاده از مصالح چسبنده و تزریق سیمان فوق ریز و ایجاد ستون با استفاده از مخلوط خاک با آهک می‌باشد. بهسازی مشخصات مقاومتی خاک به منظور کاهش خطرات آتی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. نظر به استحصال آسان و قیمت پایین مواد افزودنی نظیر آهک، استفاده از این مواد در بهسازی مشخصات رفتاری خاک‌های مسئله‌دار در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته است.

امروزه برای تثبیت، به غیر از مواد تثبیت کننده سنتی، از تثبیت کننده‌هایی 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 مساله دار رسی می‌باشد، با استفاده از تکنولوژی نانو نظیر مواد نانو پلیمر نیز می‌توان ویژگی‌های مهندسی این نوع خاک را تغییر داد. زیرا ماده نانو پلیمر باعث کاهش قدرت جذب آب، در خاک رس دار می‌شود. در این تحقیق سعی شده با ارائه روش‌های علمی و آزمایشگاهی و استفاده از استانداردهای بین المللی روش تثبیت خاک ماسه رس دار با ماده سنتی آهک و ماده شیمیایی پلی وینیل استات، انجام و نتایج با یکدیگر مقایسه گردیده و بهترین روش جهت تثبیت این نوع خاک در پروژه‌های عمرانی ارائه گردد. در این فصل ویژگی‌های کلی مصرفی و تاثیر آهک و ماده نانو پلیمر (که به اختصار نانو نامیده می‌شود) بر روی شرایط خاک شرح داده شده است. مکانیسم‌های مختلف بهسازی خاک‌های رسی و ماسه‌ای به شرح ذیل می‌باشد:

۱-۱ پیش بارگذاری

پیش بارگذاری با قرار دادن سرباره بر روی خاک رس نرم انجام می‌گردد. این روش برای بهسازی خاک در زیر پی برای ساختمان سازی، خاک ریزی، بستر فرودگاه و کوله‌های پل بکار می‌رود. پیش بارگذاری به روش‌های مختلفی از جمله از طریق خاک دستی، آب و یا انجام مکش صورت می‌گیرد. برای کاهش زمان پیش بارگذاری استفاده از زهکشی عمودی پیش ساخته مرسوم می‌باشد. از زهکشی فیتیله‌ای^۱ که شامل مغزه‌های پلاستیکی پیچیده شده در ژئوتکستایل بوده و به طور عمودی ۴ اینچ عرض و ۱/۸ تا ۳/۸ اینچ ضخامت دارند استفاده می‌گردد. فواصل بین فیتیله‌ای زهکش‌ها به طور معمول بین ۳ الی ۶ فوت بسته به نفوذ پذیری خاک و زمان موجود متغیر است. معمولاً پیش بارگذاری بین ۳ الی ۶ ماه بسته به نفوذ پذیری خاک و درجه تحکیم مورد نیاز زمان می‌برد. پایش ساخت از طریق کنترل نشست (نشست صفحه‌ای)، کنترل فشار آب حفره‌ای (با پیژومتر)، و کنترل حرکت جانبی (با انحراف سنج) انجام می‌گردد [۱].

۱-۲ تراکم دینامیکی

تراکم دینامیکی با سقوط وزنه‌های سنگین به دفعات بر روی سطح زمین انجام می‌گردد. این روش برای خاک ماسه‌ای، خاک‌های دستی و پر کننده‌های حاوی سنگ لاشه متناسب است. کوبنده‌هایی مثل بلوک‌های بتن، وزنه‌های فولادی یا جعبه‌های فولادی حاوی شن یا بتن در این روش به کار می‌رود. وزن معمول کوبنده‌ها از ۶

1 - winch

تا ۳۰ تن بسته به عمق خاکی که باید بهسازی بر روی آن انجام گردد، متغیر است. همچنین ارتفاع وزنه در این روش می‌بایستی بین ۴۰ تا ۱۰۰ فوت باشد. این روش بیشتر برای خاک با درصد ریزدانه کمتر از ۲۵٪ مناسب است. در این روش ضخامت لایه‌های کوبیده شده بین ۱۰ تا ۳۰ فوت می‌باشد. ضخامت این لایه بر اساس فرمول ذیل محاسبه می‌گردد:

$$D \approx 0.5 \sqrt{WH} \quad (1-1)$$

D: ضخامت بهسازی خاک به متر، W: وزن کوبنده به تن، H: ارتفاع بالا بردن وزنه به متر
 لرزش زمین با فرکانس ۵/۰ اینچ بر ثانیه برای ممانعت از ایجاد ترک در دیوارها انجام می‌گیرد و یا با فرکانس ۲ اینچ بر ثانیه برای ممانعت از خسارات سازه‌ای صورت می‌گیرد. پایش ساختمان از طرق کنترل نشست القائی، کنترل ویبره زمین، کنترل تورم زمین، کنترل فشار آب حفره‌ای و استفاده از آزمون‌های صحرائی (SPT, CPT) انجام می‌گردد [۱].

۱-۳ ستون‌های خاک و سیمان

این روش با مخلوط کردن خاک برجا با مصالح افزودنی چسبنده با استفاده از مته‌های حلزونی یا پدال‌های مخلوط‌کن حفاری انجام می‌گردد. هدف تولید ستون‌های خاک-سیمان با مقاومت بیشتر، تراکم‌پذیری کمتر و نفوذپذیری کمتر نسبت به خاک محلی منطقه می‌باشد. این روش برای بهسازی ظرفیت باربری، پایداری شیب و پایداری دیوارهای ساحلی به کار می‌رود. مقاومت فشاری استوانه‌ای نمونه خاک و سیمان به طور معمول از ۱۵ تا ۳۰۰ Psi متغیر است. نفوذپذیری معمول مخلوط بین محدوده 10^{-6} الی 10^{-7} سانتی‌متر بر ثانیه متغیر است [۱].

۱-۴ تراکم ارتعاشی^۱

هدف از این روش، بالا بردن چگالی خاک‌های درشت دانه با وارد کردن میله ویبره به درون زمین است. در این روش فاصله بین میله‌ها بین ۱٫۸ تا ۱٫۳ متر متغیر است. کاربرد آن برای ماسه با درصد ریزدانه کمتر از ۱۵٪ مناسب می‌باشد. ویبراتور به شکل یک اژدر دریایی است که به صورت افقی خاک را می‌لرزاند و ۳ تا ۴٫۵ متر طول دارد. و وزن آن در حدود ۲ تن می‌باشد. میله آن تا عمق مورد نظر با کمک وزن خود و جت آب به داخل زمین نفوذ می‌نماید. عمل ویبره و جت آب، نیروهای بین دانه‌ای بین ذرات خاک را کاهش داده و سبب چگال‌تر شدن آن می‌شود. ویبراتور از کف گمانه به سمت بالا حرکت می‌نماید و همزمان خاک ماسه‌ای به درون گمانه

1 – Vibro- Compaction

اضافه می‌گردد. اگر خاک پر کننده اضافه نشود، حفره با قطر ۳ الی ۴٫۵ متر در اطراف ویراتور ایجاد می‌گردد [۱].

۱-۵ ستون سنگی جایگزینی ارتعاشی^۱

این روش برای تثبیت انواع خاک‌ها از جمله سیلت و رس مناسب است. ابتدا میله حفاری تا عمق مورد نظر نفوذ کرده سپس شن و سنگ شکسته در گمانه ریخته می‌شود. هنگام تراکم مصالح با خاک اطراف درگیر شده و ستون سنگی تشکیل می‌شود. سه روش اصلی برای اینگونه از ستون‌های شنی وجود دارد.

- روش مرطوب از بالا: که در آن حفره با جت آب اشباع می‌شود.
 - روش خشک از بالا: حفره با میله حفاری بدون آب باز می‌شود.
 - روش خشک از پایین: که شن دستی با استفاده از یک قیف بلند به کف گمانه رسانده می‌شود.
- پایش ساخت این روش از طریق کنترل نشست و تورم زمین، بررسی مقدار شن دستی مورد استفاده و بکارگیری آزمون‌های تائیدیه (SPT, CPT) انجام می‌گردد [۱].

۱-۶ ستون‌های خاک-آهک

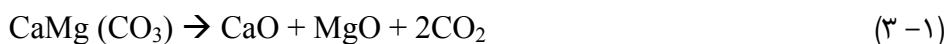
در این روش با اضافه کردن مقدار مشخصی از آهک در محدوده ۵٪ الی ۸٪ که به طور دقیق از آزمایش‌های آزمایشگاهی به دست می‌آید، ظرفیت باربری و مقاومت برشی خاک را اصلاح نموده و سبب کاهش نشست آنی و بلند مدت خاک می‌گردند. مواد و افزودنی‌های گوناگونی از جمله آهک، سیمان و ... جهت تثبیت خاک استفاده می‌گردد که در ادامه بحث خواهد گردید.

۱-۷ مواد افزودنی

۱-۷-۱ آهک

سنگ‌های آهکی چه از نوع کربنات کلسیم $[CaCO_3]$ و چه از نوع دولومیتی $[CaMg(CO_3)]$ عمده‌ترین سنگ‌ها از خانواده کربنات‌ها هستند و ۲۵ درصد پوسته زمین تا عمق ۱۶ کیلومتری را تشکیل می‌دهند. کربنات کلسیم رایج‌ترین کربنات موجود در خاک می‌باشد.

آهک فرآورده‌ای است که از پختن سنگ آهک به دست آمده و پس از ترکیب با آب شکفته شده و با جذب دی اکسید کربن هوا، دوباره به سنگ آهک تبدیل می‌شود. آهک زنده^۱ از تکلیس سنگ آهک، مطابق واکنش‌های زیر به دست می‌آید [۲].



وزن مخصوص آهک زنده حدوداً ۳/۲ تا ۳/۴ گرم بر سانتیمتر مکعب است. آهک زنده طبق واکنش زیر به آهک شکفته تبدیل می‌شود که با آزاد شدن گرما همراه است.



تبدیل آهک زنده به آهک شکفته با تغییر وزن مخصوص همراه است؛ به طوری که پس از شکفته شدن به مقدار ۲/۲ تا ۲/۴ گرم بر سانتیمتر مکعب کاهش می‌یابد، همین طور حجم آن افزایش یافته و به ۲/۵ تا ۳ برابر حجم اولیه می‌رسد [۲].

۱-۷-۲ سیمان

سیمان، گردی نرم، جاذب آب و چسباننده خرده سنگ است. این ماده از عمل آوری پخته شده اکسید کلسیم با اکسید سیلیسیوم، اکسید آلومینیوم و اکسید آهن می‌باشد. ملات این گرد به مرور در مجاورت هوا یا در زیر آب سخت و فشرده می‌شود در ضمن ثبات حجم، مقاومت خود را نیز حفظ می‌نماید.

سیمان با آسیاب نمودن مواد خام از قبیل سنگ و آهک و آلومینات و سیلیس که به صورت خاک رس و یا سنگ‌های رسی وجود دارد و مخلوط نمودن آنها با نسبت‌های معین و با حرارت دادن در کوره‌های دوار تا حدود ۱۴۰۰ درجه سانتی گراد بدست می‌آید. در این مرحله، مواد در کوره تبدیل به گلوله‌های تقریباً سیاه رنگی می‌شوند که کلینکر نامیده می‌شود.

کلینکر پس از سرد شدن با مقداری سنگ گچ به منظور تنظیم گیرش مخلوط و آسیاب شده و پودر خاکستری رنگی تولید می‌شود که همان سیمان پرتلند است. با توجه به نوع و کیفیت مواد خام، سیمان با دو روش عمده، تر و خشک تولید می‌شود، ضمن اینکه روش‌های دیگری نیز وجود دارد. البته امروزه عموماً از روش خشک در تولید سیمان استفاده می‌شود، مگر در مواردی که مواد خام، روش تر را ایجاب کند، زیرا در روش خشک انرژی کمتری برای تولید مورد نیاز است.

1- Quicklime

مواد خام مورد مصرف در تولید سیمان در هنگام پخت با هم واکنش نشان داده و عمل آوری‌های دیگری را بوجود می‌آورند. معمولاً چهار عمل آوری عمده به عنوان عوامل اصلی تشکیل دهنده سیمان در نظر گرفته می‌شوند که عبارتند از:

• سه کلسیم سیلیکات C3S

• دو کلسیم سیلیکات $\text{CaOSiO}_2=\text{C}_2\text{S}$

• سه کلسیم آلومینات $\text{CaOAl}_2\text{O}_3=\text{C}_3\text{A}$

• چهار کلسیم آلومینو فریت $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$

که اختصاراً اکسیدهای CaO را با C و SiO_2 را با S و Al_2O_3 را با A و Fe_2O_3 را با F نشان می‌دهند. سیلیکات‌های C_2S و C_3S مهمترین ترکیبات سیمان در ایجاد مقاومت خمیر سیمان هیدراته می‌باشند. در واقع سیلیکات‌ها در سیمان، ترکیبات کاملاً خالصی نیستند، بلکه دارای اکسیدهای جزئی به صورت محلول جامد نیز می‌باشند. این اکسیدها اثرات قابل ملاحظه‌ای در نحوه قرار گرفتن اتم‌ها، فرم بلوری و خواص هیدرولیکی سیلیکات‌ها دارند.

۱-۷-۳ استفاده از مواد شیمیایی نوین

استفاده از روش‌ها و مواد سنتی در زمینه تثبیت، همراه با پاره‌ای از مشکلات است که با معرفی مواد شیمیایی نوین در این زمینه، سرعت و سهولت اجرایی بالا را تداعی می‌نماید. به تازگی و با معرفی انواع مواد شیمیایی نوین (انواع آنزیم‌ها و مخلوط‌های پلیمری)، تحول شگرفی در زمینه تثبیت خاک و تحت عنوان «تثبیت شیمیایی خاک» پدید آمده است.

با تحول مواد موجود و معرفی تثبیت‌کننده‌های جدید مطالعه روی کاربرد این مواد در شرایط متفاوت بر روی مصالح مختلف برای بدست آوردن نتایج مناسب بایستی گسترش یابد.

جهت تثبیت خاک به روش‌های غیر سنتی برای نخستین بار یک ماده روغنی به بازار معرفی گردید که پس از مشخص شدن آثار زیانبخش محیط زیستی از رده خارج گردید. گزینه‌های بعدی، محلول کلرید کلسیم و قیر امولسیون بودند که تا به امروز نیز مصرف می‌شوند. اما در یک سوی دیگر و در قالب فن‌آوری‌های نوین مواد پلیمری به بازار عرضه شدند. تمامی پلیمرها قابلیت تثبیت‌کنندگی خاک را نداشتند تنها آنهایی مورد توجه قرار گرفتند که خاصیت چسبناکی خوبی با ذرات خاک داشتند، بدین ترتیب مواد پلیمری کمی برای این منظور

شناسایی و معرفی شدند. از این مواد می‌توان به آنزیم‌ها، پلی وینیل استات، پلی وینیل الکل، پلی وینیل اکلیک، پلی اکرامید اشاره نمود.

۸-۱ واکنش‌های شیمیایی میان خاک رس و آهک

هنگامی که آهک به خاک رس افزوده می‌شود، واکنش‌های متعددی انجام می‌شود که شامل مراحل زیر است:

- واکنش‌های تبادل کاتیونی یا کوتاه مدت؛
- واکنش‌های پوزولانی یا دراز مدت؛
- واکنش‌های کربناسیون.

۱-۸-۱ واکنش‌های تبادل کاتیونی آهک

تقریباً تمام خاک‌های ریزدانه وقتی با آهک و آب مخلوط می‌شوند، در مدت زمان کوتاهی واکنش تبادل کاتیونی انجام می‌دهند. در تبادل کاتیونی، کاتیون‌های قابل مبادله خاک رس با کاتیون‌های آهک جایگزین می‌شوند. در این حالت کاتیون‌های تک ظرفیتی که همراه رس هستند با یون‌های دو ظرفیتی کلسیم و یا یون‌های چند ظرفیتی جایگزین می‌شوند. ترکیب کلی تبادل یونها به شکل زیر است:



بر پایه سری فوق هر کاتیون جایگزین یون سمت راست می‌شود. برای مثال یون کلسیم می‌تواند جایگزین یون‌های سدیم و پتاسیم رس شود. بدین ترتیب تبادل یونی میان یون کلسیم- آهک و کاتیون‌های مختلف خاک به عنوان واکنش انجام شده و منجر به تجمع یون‌های کلسیم در اطراف ذرات رس می‌شود. این تجمع کاتیونی، تمرکز الکترونی اطراف ذرات رسی را تغییر داده، به نحوی که مقدار بار الکتریکی در اطراف ذرات رس تغییر می‌کند. این عمل بلافاصله پس از افزودن آب و آهک به خاک انجام گرفته و باعث کاهش پلاستیسیته و تورم خاک، افزایش کارایی و مقاومت نسبی آن و همچنین تغییر ساختمان خاک به حالت مجتمع می‌شود. در واقع بر اثر واکنش، بافت خاک رس از نظر فیزیکی تغییر کرده و مانند لای و ماسه عمل می‌کند و در نتیجه عملاً ذرات رس تمایل به جفت شدن با یکدیگر و تشکیل ذرات بزرگتر را دارند [۳].

۱-۸-۲ واکنش‌های پوزولانی آهک

آنچه باعث افزایش قابل توجه مقاومت در ترکیب خاک و آهک می‌شود واکنش پوزولانی است. با افزودن مقدار کافی آهک به خاک، PH مخلوط افزایش یافته و به بیش از ۱۲ می‌رسد. افزایش PH باعث حل شدن سیلیکات

و آلومینات موجود در خاک شده و با آزاد شدن این ترکیب‌ها از خاک رس، ترکیب آنها با کلسیم ممکن می‌شود. ترکیب سیلیکات و آلومینات با آهک تشکیل سیلیکات و آلومینات کلسیم را می‌دهد [۴ و ۵]. این مواد پوزولانی-کریستالی شبیه سیمان هستند. واکنش‌های پوزولانی تابع زمان بوده و تا هنگامی که سیلیکات و آلومینات در خاک موجود باشند، ادامه می‌یابند و کریستال‌های جدید را به وجود می‌آورند. این واکنش‌ها به صورت زیر انجام می‌شوند:



اساس کار بدین صورت است که آهک پس از افزوده شدن به خاک مرطوب، به یون‌های کلسیم (Ca^{2+}) و هیدروکسید (2OH) تجزیه می‌شود. هر اندازه مقدار آهک بیشتر باشد، OH^- نیز بیشتر بوده و PH خاک افزایش خواهد یافت. هنگامی که PH خاک به بیش از ۱۲ می‌رسد، سیلیکات و آلومینات خاک حل شده و یون‌های Si و Al در ترکیب با یون‌های OH^- تولید $\text{Al}(\text{OH})_3$ و $\text{Si}(\text{OH})_2$ می‌کنند. این هیدروکسیدها سپس با یون Ca^{2+} ترکیب شده و سیلیکات آلومینیوم و یا آلومینات کلسیم هیدراته تشکیل می‌دهند [۶ و ۷].

واکنش‌های پوزولانی بستگی به درصد رس موجود در خاک مورد استفاده دارد. تحقیقات نشان می‌دهد که مقدار رس در کل نمونه نباید کمتر از ۲۰ درصد باشد [۴].

واکنش‌های پوزولانی علاوه بر زمان، تابع درجه حرارت و رطوبت نیز هستند. در گرمای کمتر از ۵۵ درجه سانتیگراد، واکنش‌های پوزولانی کند شده و در درجه حرارت‌های بالاتر این واکنش‌ها سرعت می‌یابند [۶]. باید توجه داشت که افزایش آهک تا میزان مشخص، باعث افزایش مقاومت خاک می‌شود؛ یعنی تا زمانی که یون سیلیکات در خاک موجود باشد و پس از آن، افزایش آهک باعث کاهش مقاومت می‌شود.

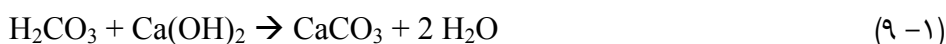
۱-۸-۳ واکنش کربناتاسیون آهک

کربناتاسیون یک پدیده نامطلوب است که در نتیجه عدم انجام واکنش خاک با آهک بوجود می‌آید. در طی این واکنش، آهک با گاز کربنیک هوا ترکیب شده و باعث ایجاد یک ماده چسبنده ضعیف (پلاستیک بالا) و بازگشت آهک به حالت غیر فعال سنگ آهک می‌شود:



از آنجائی که کربناتاسیون در زمان مخلوط کردن خاک و آهک (در هنگام ساخت و اجرا) نیز می‌تواند انجام شود، باید زمان این اختلاط را به کمترین حد ممکن رساند. در واقع کربناتاسیون، یک واکنش زیان آور برای خاک و آهک است [۶].

نوع دیگری از واکنش کربناتاسیون وجود دارد که در زمان استفاده از آهک هیدراته اتفاق می‌افتد. حاصل این واکنش تولید اسید کربنیک است که پس از واکنش آن با هیدروکسید کلسیم، کربنات کلسیم تولید می‌شود.

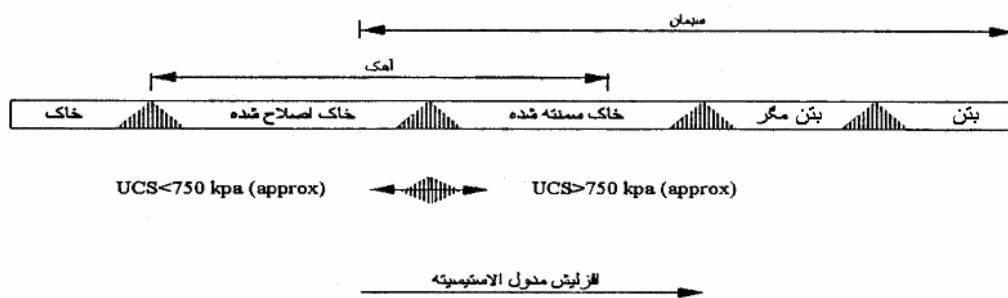


لذا چنانچه مقدار رس کافی نباشد و یا آهک بیش از حد به خاک اضافه شود به علت ایجاد CaCO_3 بهسازی خاک با آهک ناکارآمد می‌شود. لذا لازم است که درصد بهینه آهک و رطوبت بهینه طرح اختلاط با انجام آزمایش تعیین شود.

۱-۹ تأثیر آهک بر خواص مکانیکی خاک‌های رسی

در عملیات بهسازی باید هدف از اختلاط آهک با خاک قبلاً مشخص گردد. به عنوان مثال اگر مقدار کمی آهک با خاک مخلوط شود برخی از خصوصیات خاک تغییر می‌کند، ولی مقاومت فشاری و کششی به طور محسوسی افزایش نمی‌یابند. در این شرایط میزان سیمانی شدن ضعیف و فقط به صورت مرحله اصلاح انجام شده است. حد و مرز بین دو عمل اصلاح و سیمانی شدن خاک دقیقاً قابل تشخیص و یا تعریف نیست ولی می‌توان با انجام آزمایش CBR و تعیین PI، مرحله اصلاح را با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری یا کششی و یا آزمایش برش مستقیم مشخص نمود.

نقش و عملکرد آهک برای دو مرحله اصلاح و سیمانی شدن خاک به صورت شماتیک در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. در این شکل همچنین تاثیر افزودن سیمان نیز آورده شده تا میزان و حدود نقش آهک برای واکنش سیمانی شدن، تا اندازه‌ای قیاس گردد [۸].



شکل ۱-۱ بهسازی خاک با آهک و سیمان

۱۰- تأثیر آهک بر دانه بندی

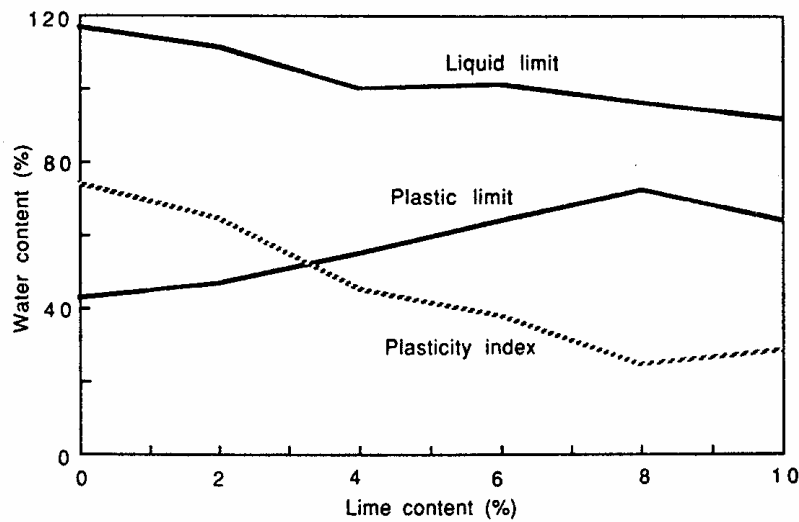
با افزایش مقادیر پایین آهک (تا حدود ۳ درصد)، فرآیند دانه‌ای شدن در بخش رسی خاکها به واسطه واکنش تبادل کاتیونی انجام می‌شود. با افزایش بیشتر مقدار آهک، درصد کمی از ذرات رسی که باقی مانده‌اند، درشت دانه می‌شوند. اما در درصدهای بالاتر (> ۶٪)، آنچه باعث تجمع و یا درشت دانه شدن بافت خاک می‌شود، واکنش‌های پوزولانی است. واکنش‌های پوزولانی، ذرات بخش ریزدانه خاک را به هم می‌چسبانند و ذرات درشت را حاصل می‌کند [۷].

۱۱- تأثیر آهک بر حدود اتربرگ^۱

افزودن آهک سبب کاهش حد روانی^۲ و افزایش حد خمیری^۳ و در نتیجه کاهش حالت خمیری خاک می‌شود که در شکل ۱-۲ این پدیده نشان داده شده است؛ به طوریکه در برخی موارد ممکن است مخلوط خاک و آهک کاملاً غیر خمیری شود [۹].

برای رس‌های غیر آلی با نشانه حالت خمیری کم تا متوسط ($PI < 50$)، بیشترین افزایش مقاومت معمولاً با افزودن ۶ تا ۸ درصد آهک بر حسب درصد وزنی خاک خشک به دست می‌آید [۴]. هر اندازه نشانه حالت خمیری خاک بیشتر باشد، خاک دارای مقدار بیشتری کانی رسی است که در نتیجه به مقدار بیشتری آهک برای رسیدن به حالت غیر خمیری نیاز دارد. در شکل ۱-۳ محدوده نشانه خمیری خاک برای استفاده از آهک نشان داده شده است.

1 - Atterberg Limits
2 - Liquid Limit
3- Plastic Limit



شکل ۱-۲ تغییرات حد مایع و میزان رطوبت بر حسب میزان آهک هیدراته [۳].

	خاک دانه ریز با بیشتر از ۲۵٪ عبوری از الک ۷۵ μm			خاک دانه درشت با کمتر از ۲۵٪ عبوری از الک ۷۵ μm		
	>۲۰	۱۰-۲۰	<۱۰	>۱۰	۶-۱۰	<۶
دامنه خمیری						
	زیاد مناسب نیست			خیلی مناسب		
پایدارسازی خاک دانه‌ای	←————→					
سیمان	←————→					
آهک-توف	←————→					
آهک	←————→					
بنتونیت	←————→					

شکل ۱-۳ مواد افزودنی برای پایدارسازی خاک‌ها با دانه‌بندی و پلاستیسیته متفاوت [۱۰].

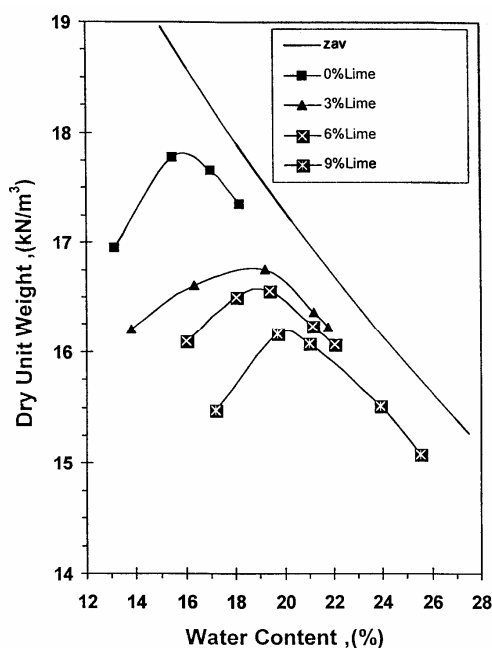
۱۲-۱ تأثیر آهک بر خصوصیات تغییر حجم و قابلیت تورم خاک

افزایش درصد بهینه آهک و زمان عمل آوری به میزان قابل ملاحظه‌ای از خصوصیات تورم (درصد تورم و فشار تورم) خاک‌های رسی می‌کاهد. مسئله جمع شدن یا انقباض خاک تثبیت شده با آهک بر اثر کاهش رطوبت آن از اهمیت زیادی برخوردار است و سبب به وجود آمدن ترک‌های انقباضی می‌شود [۱۱]. ضمناً باید به نقش سولفات‌های قابل حل (خاکهای گچ دار) در خاک ریزدانه و وارد شدن سولفات‌ها از طریق آب در خاک تثبیت شده با آهک در ایجاد تورم توجه داشت [۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶]. زیرا در این حالت به علت واکنش‌های شیمیایی بین رس و آهک و یون سولفات، کانی‌های ثانویه‌ای از قبیل اترینگایت ($\text{Ca}_6 [\text{AL} (\text{OH})_6]_2 (\text{SO}_4)_3 \cdot 26 \text{H}_2\text{O}$)

و تاماسایت $(Ca_6 [Si (OH)_6]_2 (CO_3)_2 \cdot (SO_4)_2 24 H_2O)$ ایجاد می‌شود. این کانی‌ها در حالت غیر بلوری قابلیت جذب آب بالایی دارند و می‌توانند در محیط اشباع به شدت متورم شده و باعث بروز مشکلات و خساراتی گردند.

۱-۱۳ تأثیر آهک بر میزان تراکم

مشخصات مربوط به تراکم مخلوط‌های خاک-آهک شامل حداکثر وزن مخصوص و درصد رطوبت بهینه، از اهمیت خاصی برخوردار است. مصالح متراکم و سفت، قابلیت باربری بیشتر و نشست کمتری در مقایسه با مصالح سست و نرم در مقابل بارهای وارده از خود نشان می‌دهد. برای دستیابی به نتایج عملیات تثبیت، خاک بایستی تا حد قابل قبول کوبیده و متراکم شود. علاوه بر رطوبت و انرژی تراکم به عنوان دو عامل اساسی، عوامل دیگری وجود دارد که روی تراکم‌پذیری خاک تأثیر می‌گذارند. نوع خاک و دانه‌بندی آن و نوع درصد مواد اصلاح کننده آهکی و ... هر کدام تأثیر خاصی در رفتار مهندسی مصالح از جمله وزن مخصوص خشک حداکثر و میزان آب بهینه دارند. خاک تثبیت شده با آهک حداکثر وزن مخصوص خشک کمتر و درصد رطوبت بهینه بیشتری در مقایسه با خاک تثبیت نشده دارد (شکل ۱-۴).



شکل ۱-۴ منحنی‌های تراکم خاک ریزدانه [۱۰].

هر اندازه میزان آهک مصرفی برای تثبیت خاک بیشتر باشد، مقدار این اختلاف بیشتر خواهد بود. ضمناً با گذشت زمان، هر اندازه مواد سیمانی شده بیشتری در خاک تثبیت شده تشکیل شود، حداکثر وزن مخصوص مصالح کاهش و درصد رطوبت بهینه آن افزایش خواهد یافت [۳].

۱- ۱۴ تأثیر آهک بر نفوذپذیری خاک و کاهش درصد آب

با توجه به جذب آب مورد نیاز برای شکفتن آهک از خاک اطراف، میزان آب کاهش خواهد یافت. همچنین افزایش حجم ستون و فشرده شدن خاک و حرارت حاصل از شکفتن آهک که باعث تبخیر آب می‌شود، نیز سبب کاهش درصد آب می‌شود. با در نظر گرفتن وزن خاک خشک، مقدار کاهش آب (به درصد)، معمولاً بیش از مقدار آهک افزوده شده (به درصد) می‌شود [۱۷]. همچنین از آنجائی که نفوذپذیری ستون‌های آهکی اغلب در مقایسه با خاک‌های رسی اطرافشان بیشتر است، نفوذپذیری رس نرم ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر افزایش می‌یابد [۴].

۱- ۱۵ تأثیر آهک بر مقاومت برشی و فشاری خاکهای تثبیت شده

افزایش مقاومت برشی پس از اختلاط با آهک، بخشی به دلیل مجتمع شدن رس و بخشی دیگر به علت کاهش درصد آب است. لازم به ذکر است که مقاومت برشی خاک رس در حین اختلاط کاهش می‌یابد. مقدار این کاهش در صورتی که حساسیت خاک زیاد باشد (مانند رس‌های سریع)، می‌تواند بزرگ باشد؛ اما مقاومت برشی با گذشت زمان بلافاصله افزایش خواهد یافت و پس از ۱ تا ۲ ساعت پس از اختلاط، بیش از مقاومت برشی پیش از اختلاط خواهد بود. با گذشت زمان مقاومت فشاری به خاطر واکنش‌های پوزولانی افزایش خواهد یافت. مقاومت برشی زهکشی نشده رس پایدارسازی شده تحت شرایط مناسب می‌تواند به ۰/۵ تا ۱ مگاپاسکال پس از ۱ سال برسد. به طور معمول می‌توان یک افزایش ۱۰ تا ۵۰ برابری در مقاومت برشی را در صورتی که مقاومت برشی اولیه کم و در حدود ۱۵-۱۰ مگاپاسکال بوده باشد انتظار داشت. معمولاً ۶ تا ۸ درصد وزنی آهک برای رس‌های غیر آلی با حد روانی کم ($PI < 50$) کافی است تا مقاومت برشی بین ۵۰ تا ۲۰۰ مگاپاسکال پس از ۱ سال به دست آید. تقریباً $\frac{1}{3}$ از مقاومت برشی نهایی پس از ۱ ماه و در حدود ۷۵ درصد پس از ۳ ماه به دست می‌آید [۴]. افزودن آهک به خاک به مقدار مناسب سبب افزایش مقاومت فشاری نیز می‌شود. جدول‌های ۱-۱ و ۲-۱ نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی خاکهای چند منطقه از ایران با پخت آجر را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۱ نتایج بررسی مصالح ساختمانی در چند استان کشور [۱۸].

درصد آهک				نتایج آزمایش‌ها	
۰	۵	۷	۹		
۱/۹۱	۱/۸۵	۱/۸۱	۱/۷۸	وزن فضایی kg/cm ³	نتایج آزمایش‌ها بر روی خشت‌های تثبیت شده با خاک معدن کوره سنتی آجرپزی ترابی و آهک عمل آوری شده به مدت ۹۰ روز در دما و رطوبت ثابت
۳۹/۲	۴۵/۲۰	۴۹/۹	۴۳	مقاومت فشاری kg/cm ³	
وارفت	۲۶/۵	۲۸/۹	۲۵	مقاومت فشاری kg/cm ³²	نتیجه همان نمونه عمل آوری شده به مدت ۸۹ روز در دما و رطوبت ثابت و یک روز زیر آب
۱/۹۱	۱/۸۳	۱/۷۰	۱/۶۸	وزن فضایی kg/cm ³	نتایج آزمایش‌ها بر روی خشت‌های تثبیت شده با خاک معدن کارخانه چوار ایلام و آهک عمل آوری شده به مدت ۹۰ روز در دما و رطوبت ثابت
۲۶/۹	۲۹/۲	۳۱/۲	۲۸/۵	مقاومت فشاری kg/cm ³	
وارفت	۱۸/۵	۲۰/۵	۱۷	مقاومت فشاری kg/cm ³	نتیجه همان نمونه عمل آوری شده به مدت ۸۹ روز در دما و رطوبت ثابت و یک روز زیر آب
۱/۷۷	۱/۶۹	۱/۵۸	۱/۵۲	وزن فضایی kg/cm ³	نتایج آزمایش‌ها بر روی خشت‌های تثبیت شده با خاک معدن کارخانه آجر ماشینی ۱۱۳ جان‌جان آسمان آباد با آهک عمل آوری شده به مدت ۹۰ روز در دما و رطوبت ثابت
۳۰/۳	۳۲	۳۳/۴	۳۱/۳	مقاومت فشاری kg/cm ³	
وارفت	۱۸/۹	۲۱/۲	۱۸	مقاومت فشاری kg/cm ³	نتیجه همان نمونه عمل آوری شده به مدت ۸۹ روز در دما و رطوبت ثابت و یک روز زیر آب

جدول ۲-۱ نتایج آزمایش‌های فیزیکی مصالح ساختمانی در چند استان کشور [۱۸]

نشانه حالت خمیری خاک (PI%)	حد حالت خمیری خاک (PL%)	حد حالت روانی خاک (LL%)	نتایج آزمایش‌ها
۱۳/۵	۲۱	۳۴/۵	نتایج آزمایش‌های فیزیکی بر روی نمونه خاک معدن کوره سنتی آجرپزی ترابی
۱۰	۲۵	۲۵	نتایج آزمایش‌های فیزیکی بر روی نمونه خاک معدن چوار ایلام
۱۲	۲۰	۳۲	نتایج آزمایش‌های فیزیکی بر روی نمونه خاک معدن کارخانه آجر ماشینی ۱۱۳ جان‌جان آسمان آباد

۱-۱۶ تأثیر آهک بر روی حساسیت خاک‌های رسی

خاک‌های رسی از نوع مونت موریلونیت، خاک‌های حساس به شمار می‌آیند و هر چه در خاک‌های رسی میزان کانی مونت موریلونیت بیشتر باشد، حساسیت خاک بیشتر بوده و متناسب با افزایش میزان کانی کائولینیت،

حساسیت خاک رس کاهش می‌یابد. افزایش آهک بر خاک‌های رسی حساس باعث کاهش حساسیت خاک رس شده و میزان حساسیت خاک‌های رسی پایدار شده با آهک معمولاً بین ۱ تا ۳ می‌باشد [۴].

۱-۱۷ تأثیر آهک بر مقاومت در برابر چرخه‌های یخ‌زدگی و آب شدن

منظور اصلی از دوام خاک‌های تثبیت شده با آهک، افزایش مقاومت آنها در برابر چرخه‌های یخ‌زدگی و آب شدن است. تأثیر دراز مدت رطوبت بر این مصالح معمولاً شدید نیست. خاک‌های تثبیت شده با آهک بر اثر یخ‌زدگی و آب شدن، بخشی از مقاومت خود را از دست می‌دهند. مقاومت فشاری اولیه خاک‌های تثبیت شده با آهک بر روی مقاومت مصالح در برابر یخ‌زدگی و آب شدن تأثیر بسیاری دارد. هر اندازه مقاومت فشاری اولیه این مصالح بیشتر باشد، مقاومت آنها نیز در برابر چرخه‌های یخ‌زدگی و آب شدن بیشتر خواهد شد. اما باید خاطر نشان ساخت که رس پایدار شده با آهک ممکن است به یخ‌زدگی حساس شود [۱۴]. در خاک کائولینیت با افزایش چرخه‌های یخبندان، ذوب یخ و همچنین افزایش درصد آهک، خاک غیر پلاستیک می‌شود و همچنین میزان کاهش مقاومت تک محوری آن با افزایش درصد آهک کاهش می‌یابد [۱۹].

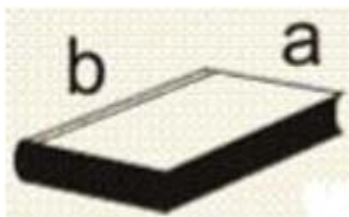
۱-۱۸ چگونگی عملکرد نانو ذرات پلیمری در خاکهای رس

این ذرات با استفاده از خاصیت نانوی اعمال شده بر روی آنها به شدت آب دوست می‌گردند. نانو پلیمر پلی وینیل استات، بر روی ذرات رس موجود در خاک تأثیر می‌گذارد و این تأثیر به دلیل کوچک بودن و سطح زیاد ذرات رس است [۲۰].

خاک رس بعد از مخلوط شدن با این پلیمر، لایه‌هایی تشکیل می‌دهد که این لایه‌ها را می‌توان مانند برگه‌های کتاب دانست (اشکال ۱-۵ و ۱-۶).



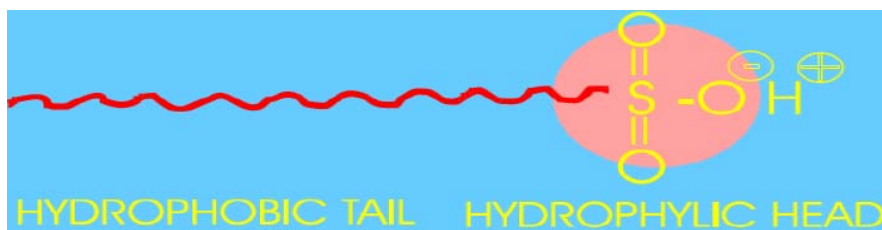
شکل ۱-۵ ذرات رس بعد از جذب پلیمر [۲۰]



شکل ۱-۶ رس معدنی به مانند یک کتاب ۱۰۰ برگ است که هر صفحه از آن سطح مختص خود را دارد $200 \times a \times b =$ مساحت رس [۲۰]

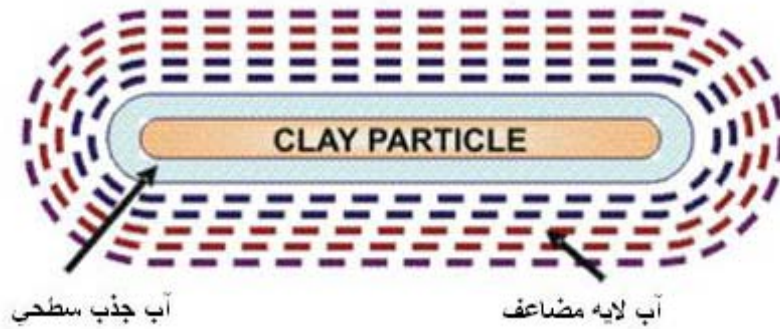
ذرات خاک رس معدنی، بسیار کوچک بوده و مانند صفحات کتاب می‌باشند. این ماهیت کتابی خاک رس، دارای سطح بسیار زیاد بوده که باعث جذب یونهای فلزی می‌گردد. به طوری که این یونها مقدار فراوانی آب را جذب می‌نمایند. این جاذب‌های آب، باز هم آب جذب نموده و باعث انبساط خاک رس گردیده و مقاومت خود را از دست می‌دهند. آب جذبی، قویاً به سطح خاک رس پیوند خورده و به وسیله خورشید یا حرارت جدا نمی‌شوند و تنها مواد شیمیایی می‌توانند این کار را انجام دهند. این همان فرآیندی است که نانو پلیمر پلی وینیل استات انجام می‌دهد.

پلی وینیل استات، مولکول‌های پیچیده بوده و از دو جزء سر و دم تشکیل گردیده که سر آن آب دوست و دم آن آب‌گریز می‌باشد (شکل ۱-۷).



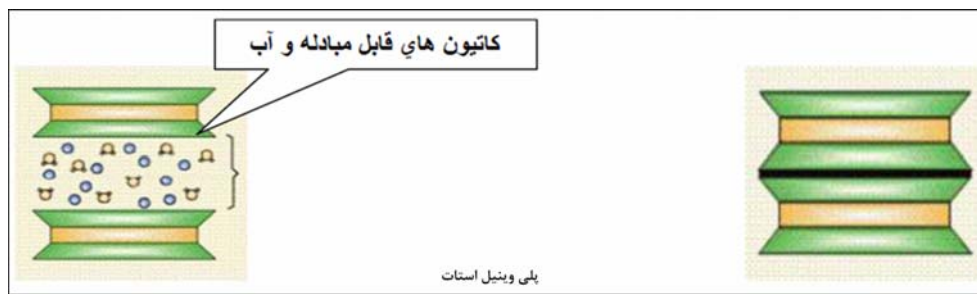
شکل ۱-۷ مولکول نانو پلیمر پلی وینیل استات [۲۰]

جذب سطحی آب موجب تورم خاک رس می‌شود. همچنین موجب کاهش اصطکاک بین ذرات خاک، چسبندگی، پیوستگی و مقاومت توده خاک رس می‌شود. این یونها خود را به سطح خاک رس چسبانده که یا آنها را جابجا و یا درون یونهای فلزی قفل می‌کند و جاذب‌های آن را از بین برده و خاک رس را آب‌گریز می‌نماید و اثر روغنی به آن می‌دهد (شکل ۱-۸).



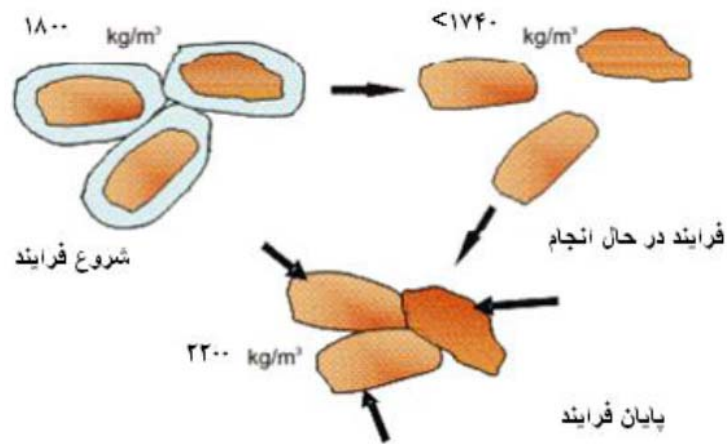
شکل ۸-۱ جذب آب توسط رس [۲۰]

فرایند رسانیدن نانو پلیمر پلی وینیل استات به تمام رس‌های موجود در خاک، احتیاج به زمان معین به عنوان دوران سبزی یا دوره تکامل دارد. تاثیرات پلی وینیل استات آبی نبوده و مقدار کمی تغییرات در خاک دیده می‌شود. ولی در انتهای دوره تکامل ۲ تا ۴ هفته، خاک محکم و سخت می‌گردد (شکل ۹-۱).



شکل ۹-۱ افزایش حجم ذرات رس [۲۰]

باید توجه داشت که وجود آب به حد رطوبت بهینه برای رسانیدن پلی وینیل استات، برای مهاجرت به تمام خاک رس‌ها مورد نیاز می‌باشد. کمبود آب باعث عقب افتادن فرآیند گردیده و در نتیجه عمل تکامل را عقب می‌اندازد (شکل ۱۰-۱).

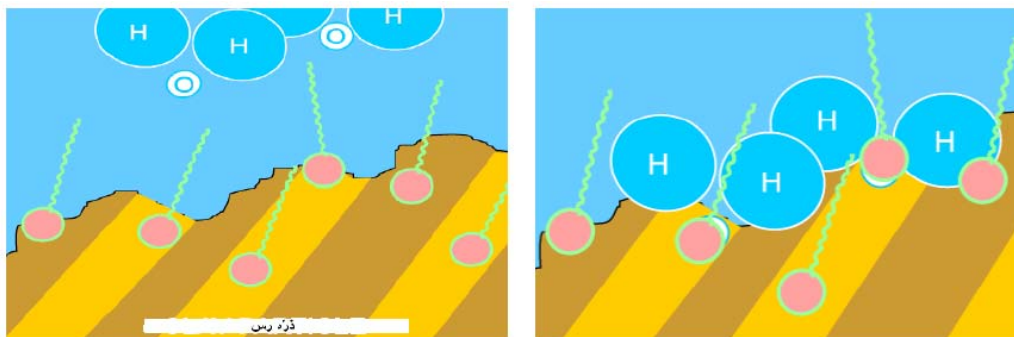


شکل ۱-۱-۱ چسبیدن ذرات رس به هم [۲۰]

۱-۱۸-۱ ذرات پلیمری در خاک‌های رس

این محصول برای تثبیت و تحکیم خاک رس مورد استفاده قرار می‌گیرد. محصول پلی وینیل استات، با توجه به خاک مناطق ایران، در آزمایشگاه مجهز مکانیک خاک، در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران تهیه گردیده و پس از انجام آزمایشات CBR که نشان دهنده تثبیت خاک و مقاومت آن می‌باشد میزان مصرف آب تعیین می‌گردد.

پلی وینیل استات، محصول عمل آوری از مشتقات سنتزی (thio) بوده و یک لایه حفاظتی روغنی روی سطح خاک و ذرات خاک رس را می‌پوشاند. این محصول حرکت‌پذیر بودن و مبادله آن را کاهش داده و همزمان با جذب نمودن آب این مواد را آب‌گریز می‌نماید (شکل ۱-۱۱). در نتیجه ماده خاکی کمتر به رطوبت حساس بوده و باعث کارایی بیشتر و توان فشردگی و به هم پیوستن بهتر ذرات توسط تجهیزات و ماشین آلات عبوری می‌گردد. به هم پیوستن ذرات به معنی سایش بیشتر داخلی و بهبود ظرفیت باربری است.



شکل ۱-۱۱-۱ پلی وینیل استات، در ساختار رس جایگزین مولکول‌های آب می‌شود [۲۰]

پلی وینیل استات، موادی در محدوده‌ای از خاک رس تا ماسه بادی و مقداری شن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. مواد غیر چسبنده از قبیل ماسه، تنها زمانی می‌توانند تحت تاثیر قرار گیرند که آنها را با مواد مناسب با خاک رس مخلوط نمایند.

در هم رفتن بهتر ذرات به معنی اصطکاک داخلی بیشتر، افزایش مقاومت خاک و موفقیت فرآیندی است که قرار است در آن، خاک با ماده پلی وینیل استات، تثبیت شود. این موضوع، بستگی به وجود مواد ذیل دارد:

۱- نوع خاک رس

۲- درصد ذرات ریز

۳- یونهای قابل تعویض

۴- مقدار خاک رس

۱-۱۹ جمع‌بندی

امروزه در کنار استفاده از روش‌های تثبیت خاک با مواد سنتی، مواد شیمیایی نوین، نیز جهت تثبیت خاک معرفی شده است. هدف از این تحقیق، انجام عملیات تثبیت با استفاده از مواد سنتی (آهک) و نانو پلیمر به منظور تعیین میزان کارایی و میزان تاثیر گذاری هر یک و در نهایت معرفی مناسب ترین ماده در عملیات تثبیت می‌باشد.

۱-۲۰ روش تحقیق

در این تحقیق مصالح مورد نیاز تهیه و نمونه‌های اصلاح شده با آهک (درصد اختلاط ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد) و ماده نانوی پلی وینیل استات، (درصد اختلاط ۲، ۴ و ۶ درصد) در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه، مورد بررسی قرار می‌گیرد. جهت تعیین خصوصیات شاخص، مکانیکی و شیمیایی، آزمایش‌های آزمایشگاهی مختلفی شامل تعیین درصد رطوبت خاک، حدود اتر برگ با روش کاساگرانده، تراکم، مقاومت فشاری تک محوری و برش مستقیم و آزمایش‌های شیمیایی بر روی نمونه‌های خاک طبیعی و همچنین بر روی نمونه‌های حاوی مخلوط آهک و نانو انجام و در نهایت نتایج با یکدیگر مقایسه می‌گردد.

فصل دوم

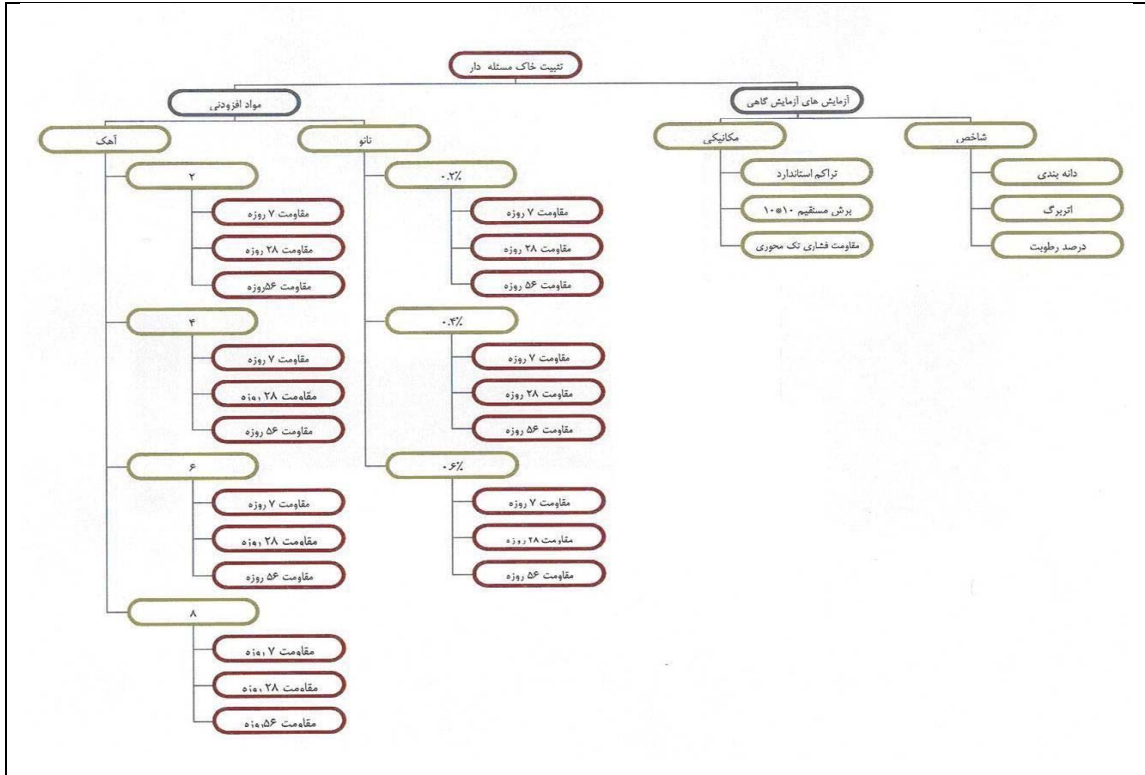
خاک تثبیت شده با آهک

۲ مقدمه

در این مطالعات، به منظور بررسی تاثیر آهک بر روی خاک مسئله دار رسی، ابتدا مقدار مشخصی از خاک نمونه برداری و به آزمایشگاه بخش ژئوتکنیک مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهر سازی منتقل گردید (شکل ۱-۲) جهت شناسایی دقیق خاک مورد نظر، ابتدا آزمایش‌های آزمایشگاهی متناسب با اهداف تحقیق شامل آزمایش‌های شاخص، مکانیکی و شیمیایی انجام گردید (شکل ۲-۲). در این فصل به روش انجام، بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی خاک با درصدهای اختلاط ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد آهک پرداخته می‌شود.



شکل ۱-۲ محل ساختگاه مورد مطالعه

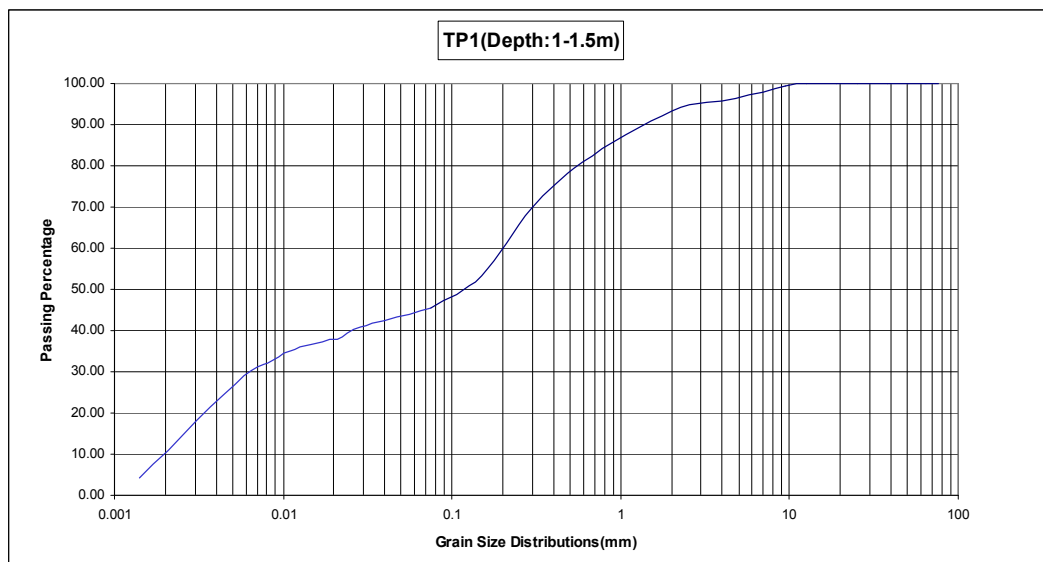


شکل ۲-۲ نمودار روند انجام مطالعات تثبیت خاک با مواد افزودنی آهک و نانو

۲-۱ آزمایش‌های شاخص

۲-۱-۱ آزمایش دانه‌بندی و هیدرومتری

اندازه دانه‌های تشکیل دهنده خاک در دامنه وسیعی متغیر است. هدف از آزمایش دانه‌بندی خاک، تعیین توزیع دانه‌های خاک در اندازه‌های مختلف می‌باشد، تا بر اساس اندازه دانه‌ها، خاک طبقه‌بندی و تشریح گردد. بر این اساس از نمونه‌های به دست آمده از خاک محل ساختگاه، جهت تعیین نوع خاک و پارامترهای مرتبط به دانه بندی اقدام به انجام آزمایش الک به روش ASTM D422 و در ادامه جهت تکمیل دانه بندی، آزمایش هیدرومتری به روش ASTM D422 به عمل آمد (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳ نمودار دانه‌بندی خاک

بر اساس نتایج حاصله خاک مورد بررسی، بر اساس طبقه بندی متحده، از نوع ماسه رسی (SC) می‌باشد. نتایج آزمایش در پیوست ارائه گردیده است.

۲-۱-۲ آزمایش تعیین حدود اتربرگ

هدف از این آزمایش، تعیین حد روانی، حد خمیری و دامنه خمیری خاک است. حدود اتربرگ از شاخص‌های مهم شناسایی و توصیف خاک می‌باشد. بر اساس نتایج این آزمایش و آزمایش دانه‌بندی، طبقه‌بندی خاک (روش متحده) صورت می‌گیرد. به منظور تعیین مقادیر حدود اتربرگ بر روی خاک طبیعی و خاک با مخلوط ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد آهک، تعداد ۱۳ آزمایش، مطابق استاندارد ASTM D4318. بر روی نمونه خاک اصلی و نمونه‌های با درصد‌های متفاوت آهک انجام گردید (جدول ۲-۱). نتایج آزمایش در پیوست ارائه گردیده است.

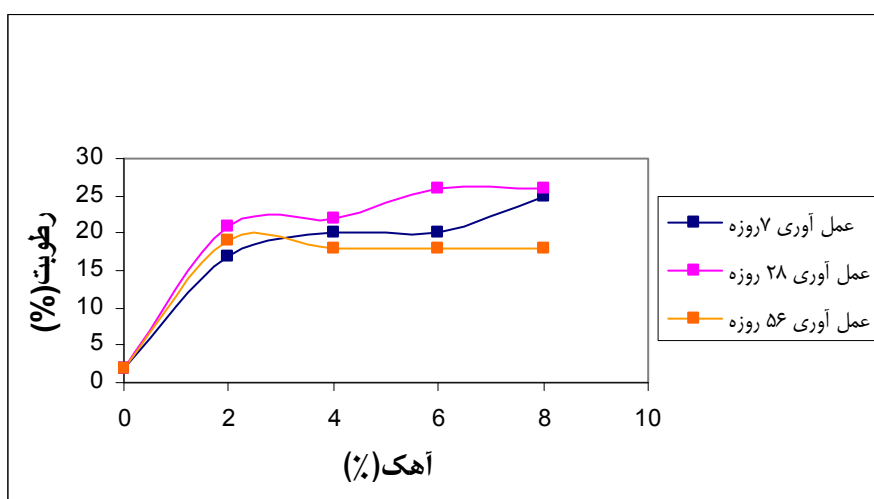
جدول ۱-۲ مقادیر حدود اتریبگ خاک طبیعی و خاک با درصدهای مختلف آهک و عمل آوری ۲۸،۷ و ۵۶ روزه

زمان‌های عمل آوری (روز)									درصد آهک	خاک طبیعی		
۵۶			۲۸			۷				دامنه خمیری	حد خمیری	حد روانی
دامنه خمیری	حد خمیری	حد روانی	دامنه خمیری	حد خمیری	حد روانی	دامنه خمیری	حد خمیری	حد روانی				
۱۵	۲۲	۳۷	۹	۲۵	۳۴	NP			۲	۲۰	۱۶	۳۶
NP				NP		NP			۴			
NP				NP		NP			۶			
NP				NP		NP			۸			

مطابق جدول ۱-۲، تنها خاک‌های با مخلوط ۲ درصد آهک و با عمل آوری ۲۸ و ۵۶ روزه دارای دامنه خمیری می‌باشند. بر اساس نتایج به دست آمده، با افزودن آهک به میزان ۲ درصد به خاک طبیعی، باعث کاهش دامنه خمیری در عمل آوری‌های ۲۸ و ۵۶ روزه می‌گردد. در دیگر مقادیر اختلاط، و با زمان‌های عمل آوری مورد نظر، باعث از بین رفتن دامنه خمیری خاک می‌گردد. بیشترین میزان دامنه خمیری مربوط به خاک با مخلوط ۲ درصد آهک و عمل آوری ۵۶ روزه، با مقدار ۱۵ و کمترین میزان دامنه خمیری، خاک با مخلوط ۲ درصد آهک و عمل آوری ۲۸ روزه با مقدار ۹ می‌باشد.

۳-۱-۲ آزمایش تعیین درصد رطوبت خاک

در بسیاری از خاکها، درصد رطوبت طبیعی یکی از خواص فیزیکی مهم خاک می‌باشد. به طوری که در خاکهای ریزدانه، میزان رطوبت خاک یکی از عوامل موثر بر مقاومت و رفتار خاک است. به منظور تعیین درصد رطوبت خاک منطقه و نمونه‌های خاک باقیمانده از آزمایش مقاومت فشاری با مخلوط ۲ الی ۸ درصد آهک برای عمل آوری‌های ۲۸،۷ و ۵۶ روزه، تعداد ۱۳ آزمایش با روش ASTM D2216 انجام گردید. لازم به ذکر است درصد رطوبت خاک طبیعی، ۲ درصد می‌باشد. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل ۲-۴ و جدول ۲-۲ ارائه شده است.



شکل ۴-۲ نمودار تغییرات میزان رطوبت بر اساس درصد رطوبت و مدت زمان عمل آوری

جدول ۲-۲ تغییرات میزان رطوبت بر اساس درصد رطوبت و مدت زمان عمل آوری برای نمونه‌های حاصل از آزمایش مقاومت فشاری

عمل آوری ۵۶ روزه		عمل آوری ۲۸ روزه		عمل آوری ۷ روزه	
رطوبت (%)	میزان آهک (%)	رطوبت (%)	میزان آهک (%)	رطوبت (%)	میزان آهک (%)
۱۹	۲	۲۱	۲	۱۷	۲
۱۸	۴	۲۲	۴	۲۰	۴
۱۸	۶	۲۶	۶	۲۰	۶
۱۸	۸	۲۶	۸	۲۵	۸

بر اساس نتایج به دست آمده با افزودن آهک به خاک، در زمان‌های عمل آوری مورد نظر، باعث افزایش درصد رطوبت نسبت به رطوبت خاک طبیعی می‌شود. بیشترین میزان جذب آب در عمل آوری ۲۸ روزه و با مخلوط ۶ و ۸ درصد آهک و به مقدار ۲۶ درصد، و حداقل میزان رطوبت در زمان عمل آوری ۷ روزه، با مخلوط ۲ درصد آهک، به مقدار ۱۷ درصد می‌باشد.

۲-۲ آزمایش‌های مکانیکی

۲-۲-۱ آزمایش تراکم

جهت تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر خاک و رطوبت بهینه بر روی نمونه‌های خاک طبیعی و مخلوط شده با ۲، ۴، ۶ و ۸ آهک درصد در عمل آوری‌های ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه، تعداد ۵ آزمایش تراکم استاندارد مطابق با

استاندارد ASTM D698 بر روی نمونه خاک اصلی و نمونه‌های با درصد‌های متفاوت آهک انجام گردید (جدول ۲-۳). نمودار نتایج آزمایش‌ها در پیوست ارائه گردیده است.

جدول ۲-۳ مقادیر رطوبت بهینه و حداکثر دانسیته خشک خاک اصلی و خاک با درصد‌های معین آهک

درصد آهک	میزان رطوبت بهینه	دانسیته خشک حداکثر (gr/cm^3)
۰	۱۹	۱,۷۶
۲	۲۳	۱,۶۳
۴	۲۲	۱,۶۱
۶	۲۳	۱,۶
۸	۲۴	۱,۵۸

بر اساس نتایج به دست آمده از جدول ۲-۳ با مخلوط خاک با آهک، میزان دانسیته خشک حداکثر نسبت به خاک طبیعی، کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. روند کاهش با افزایش درصد مخلوط با آهک از 1.63 gr/cm^3 تا 1.58 gr/cm^3 می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده میزان رطوبت بهینه، ابتدا با افزایش درصد آهک تا میزان ۲ درصد افزایش و سپس با افزودن ۴ درصد آهک، کاهش می‌یابد. نتایج حاکی از آن است که با افزودن آهک به میزان ۶ درصد به بالا قدرت جذب آب مخلوط خاک مورد آزمایش و درصد رطوبت افزایش می‌یابد.

۲-۲-۲ آزمایش مقاومت فشاری

جهت تخمین مقاومت برشی خاک‌های چسبنده بر روی نمونه‌های خاک طبیعی و مخلوط شده با مقادیر ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد آهک و عمل آوری ۲۸،۷ و ۵۶ روزه، آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM D2166 انجام شد. لازم به ذکر است جهت حصول نتایج دقیق‌تر برای هر درصد مشخص آهک دو سری آزمایش انجام گردید. میزان مقاومت فشاری برای خاک طبیعی 5 kg/cm^2 می‌باشد. نمودار نتایج آزمایش‌ها در پیوست ارائه گردیده است.

در این آزمایش، ابتدا نمونه خاک طبیعی و نمونه‌های با مخلوط ۲ الی ۸ درصد آهک، با ابعاد 10×15 سانتیمتر تهیه و در اتاق مرطوب جهت عمل آوری، جای داده شدند. نمونه‌ها پس از طی روزهای ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه، بیرون آورده شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. شکل‌های ۲-۵ و ۲-۶ به ترتیب دستگاه آزمایش مقاومت فشاری و نحوه شکست نمونه پس از انجام آزمایش را نشان می‌دهد.

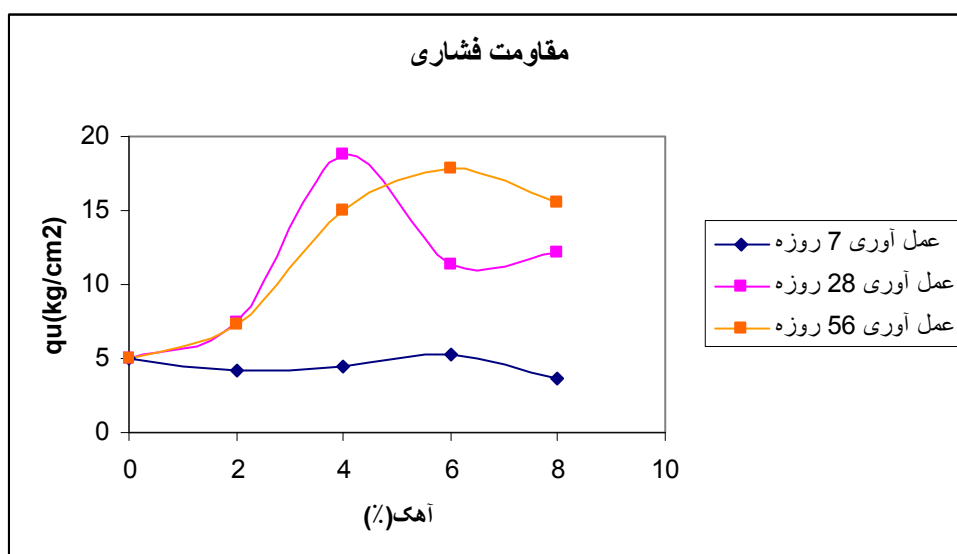


شکل ۲-۵ دستگاه آزمایش مقاومت فشاری



شکل ۲-۶ نحوه شکست نمونه پس از انجام آزمایش مقاومت فشاری

بر اساس شکل ۲-۷ و جدول ۲-۴ با اختلاط خاک و آهک، میزان مقاومت فشاری خاک با افزایش زمان افزایش می‌یابد. به طوری که در عمل آوری ۵۶ روزه، مقاومت فشاری بیشترین روند افزایشی را دارد. لازم به ذکر است مقاومت برشی خاک در این زمان عمل آوری، با مخلوط بیش از ۶ درصد آهک، کاهش می‌یابد. بیشترین مقاومت فشاری بامخلوط ۴ درصد آهک، با زمان عمل آوری ۲۸ روز به مقدار 18.8 Kg/cm^2 و کمترین مقاومت فشاری مربوط به خاک با مخلوط ۸ درصد آهک در عمل آوری ۷ روزه به مقدار 3.7 Kg/cm^2 می‌باشد.



شکل ۲-۷ نمودار تغییرات مقاومت فشاری درصدهای مختلف آهک در زمانهای مختلف عمل آوری

جدول ۲-۴ نتایج تغییرات حداکثر مقاومت فشاری با درصدهای مختلف آهک و زمانهای مختلف عمل آوری

$q_u(kg/cm^2)$				مدت عمل آوری (روز)
میزان آهک ۸٪	میزان آهک ۶٪	میزان آهک ۴٪	میزان آهک ۲٪	
۳,۷	۵,۳	۴,۵	۴,۲	۷
۱۲,۲	۱۱,۳	۱۸,۸	۷,۴	۲۸
۱۵,۶	۱۷,۸	۱۵	۷,۳	۵۶

۲-۳-۳ آزمایش برش مستقیم $10 \times 10 \text{ cm}$

جهت تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک منطقه مورد مطالعه، آزمایش برش مستقیم مطابق استاندارد ASTM D3080 بر روی نمونه‌های دست خورده با قالب $10 \times 10 \text{ cm}$ انجام پذیرفت. از آنجا که مقادیر تنش قائم برای هر آزمایش باید متناسب با فشار سربار باشد این آزمایش بر روی نمونه‌های خاک طبیعی و مخلوط شده با درصدهای ۲، ۴، ۶، ۸ و درصد آهک و برای روزهای عمل آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه، با سه تنش قائم متفاوت (۰،۵، ۱ و ۲ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع) انجام گردید (اشکال ۲-۸ و ۲-۹). بر اساس نتایج به دست آمده میزان چسبندگی برای خاک طبیعی $0,36 \text{ kg/cm}^2$ و زاویه اصطکاک داخلی ۲۸ درجه می‌باشد. نمودار نتایج آزمایش‌ها در پیوست ارائه گردیده است.



ب

الف

شکل ۲-۸- الف نمونه آماده شده در قالب برش، ب دستگاه برش مستقیم



شکل ۲-۹ نمونه‌هایی از نحوه شکست نمونه پس از انجام آزمایش مقاومت برش مستقیم

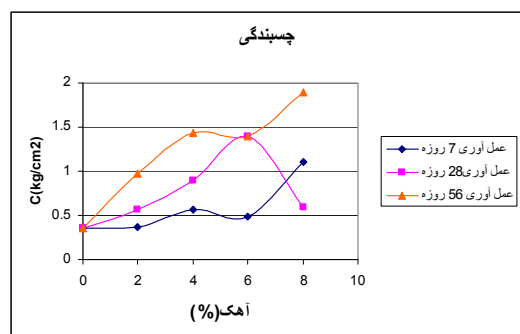
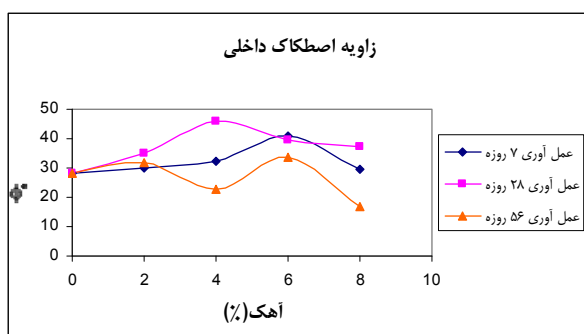
ϕ° : زاویه اصطکاک داخلی

C: چسبندگی ظاهری

بر اساس نتایج به دست آمده افزودن ماده آهک به جز عمل آوری ۲۸ روزه و با ترکیب ۸٪ آهک، باعث افزایش پارامترهای مقاومتی خاک می‌گردد. نتایج تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک با درصدهای مختلف آهک در جدول ۲-۵ و اشکال ۲-۱۰ و ۲-۱۱ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، میزان چسبندگی با افزایش مدت زمان عمل آوری افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار چسبندگی در عمل آوری ۵۶ روزه مربوط به خاک با مخلوط ۸ درصد آهک به مقدار $1,89 \text{ Kg/cm}^2$ و کمترین مقدار، مربوط به خاک با مخلوط ۲ درصد آهک، با عمل آوری ۷ روزه و به مقدار $0,37 \text{ Kg/cm}^2$ می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده، زاویه اصطکاک داخلی با افزایش مدت زمان عمل آوری کاهش می‌یابد. بیشترین میزان زاویه اصطکاک داخلی ۴۶ درجه، و مربوط به خاک با عمل آوری ۲۸ روزه و با مخلوط ۴ درصد آهک می‌باشد.

جدول ۲-۵ پارامترهای حاصله از آزمایش برش مستقیم ۱۰*۱۰*۱۰ بر روی نمونه‌های خاک طبیعی و مخلوط با آهک

عمل آوری ۵۶ روزه			عمل آوری ۲۸ روزه			عمل آوری ۷ روزه		
(ϕ)	C (kg/cm ²)	میزان اختلاط با آهک (%)	(ϕ)	C (kg/cm ²)	میزان اختلاط با آهک (%)	(ϕ)	C (kg/cm ²)	میزان اختلاط با آهک (%)
۳۱,۷	۰,۹۷	۲	۳۵	۰,۵۷	۲	۳۰	۰,۳۷	۲
۲۲,۷	۱,۴۳	۴	۴۶	۰,۸۹	۴	۳۲,۵	۰,۵۷	۴
۳۳,۵	۱,۴	۶	۳۹,۵	۱,۴	۶	۴۱	۰,۴۹	۶
۱۶,۷	۱,۸۹	۸	۳۷,۵	۰,۵۹	۸	۲۹,۵	۱,۱	۸



شکل ۲-۱۱ تغییرات زاویه اصطکاک داخلی با درصدهای متفاوت آهک زمان‌های عمل آوری ۲۸،۷ و ۵۶ روزه در آزمایش برش مستقیم ۱۰*۱۰*۱۰

شکل ۲-۱۰ تغییرات چسبندگی با درصدهای متفاوت آهک و در زمان‌های عمل آوری ۲۸،۷ و ۵۶ روزه در آزمایش برش مستقیم ۱۰*۱۰*۱۰

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی، افزودن آهک به مقدار ۶ درصد، بهترین مقدار جهت تثبیت خاک می‌باشد.

فصل سوم

خاک تثبیت شده با مواد نانو

۳ مقدمه

در ادامه این تحقیق، به منظور بررسی تاثیر نانو بر روی خاک ساختگاه مورد مطالعه، ابتدا محلول نانو تهیه و به خاک مورد آزمایش اضافه گردید. در تهیه محلول نانو، ابتدا مقدار ۲ cc ماده نانو پلیمر پلی وینیل استات را در ۱۰۰۰ cc آب مخلوط کرده و محلول ۰,۲٪ نانو تهیه گردید. سپس این محلول با مقادیر ۲، ۴ و ۶ درصد نانو، متناسب با رطوبت بهینه حاصل از آزمایش تراکم خاک طبیعی، به نمونه مورد آزمایش اضافه گردید. در ادامه خاک مخلوط شده با نانو را به مدت ۲۴ ساعت در کیسه پلاستیکی جهت عمل آوری قرار داده، سپس نمونه‌ها را از کیسه خارج کرده و متناسب با زمان‌های عمل آوری ۲۸،۷ و ۵۶ روز در مخزن رطوبت قرار داده شدند. جهت شناسایی دقیق خاک با مخلوط نانو، آزمایش‌های آزمایشگاهی متناسب با اهداف تحقیق شامل آزمایش‌های شاخص و مکانیکی انجام گردید (نمودار ۱-۲). در این فصل به روش انجام، بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی خاک با درصدهای مخلوط ۲، ۴ و ۶ درصد نانو، پرداخته می‌شود.

۳-۱ آزمایش‌های شاخص

۳-۱-۱ آزمایش تعیین حدود اتربرگ

به منظور تعیین مقادیر حدود اتربرگ بر روی خاک طبیعی و خاک با مخلوط ۲، ۴ و ۶ درصد نانو، تعداد ۹ آزمایش، مطابق استاندارد ASTM D4318 انجام گردید (جدول ۳-۱). مقادیر حدود اتربرگ خاک با درصدهای ۲ الی ۶ درصد، نانو با زمان‌های عمل آوری ۲۸، ۷ و ۵۶ روزه را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌ها در پیوست ارائه گردیده است.

۳-۱-۲-۱ بررسی نتایج آزمایش اتربرگ

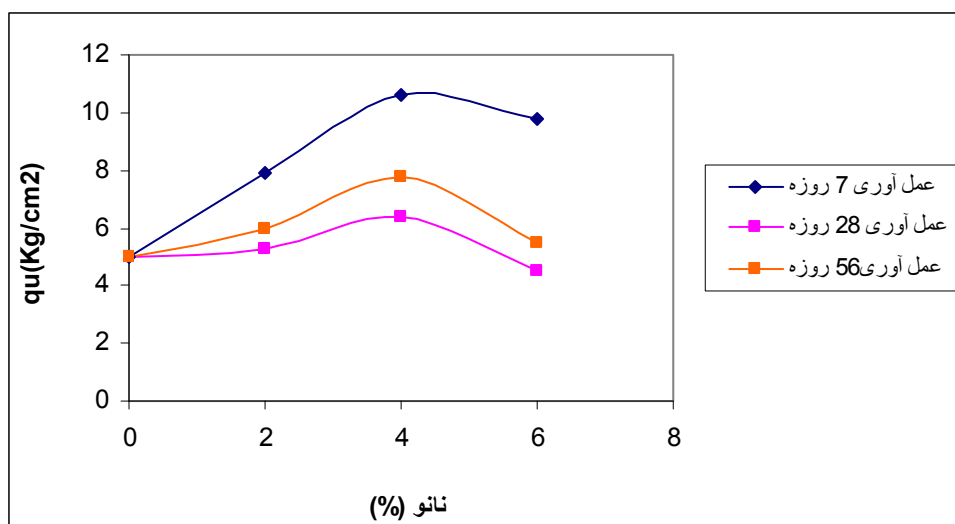
مطابق جدول ۳-۱، افزودن ماده نانو به خاک، باعث افزایش دامنه خمیری می‌گردد. بر اساس نتایج به دست آمده در زمان عمل آوری ۷ روزه، دامنه خمیری خاک بیشترین افزایش را دارد. بیشترین دامنه خمیری مربوط به خاک با مخلوط ۲ درصد نانو و عمل آوری ۲۸ روزه و به مقدار ۳۰ می‌باشد. کمترین میزان دامنه خمیری، خاک با مخلوط ۶ درصد نانو و عمل آوری ۲۸ روزه و به مقدار ۲۱ می‌باشد.

جدول ۳-۱ مقادیر حدود اتربرگ خاک با درصد‌های مختلف نانو و عمل آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه

زمان‌های عمل آوری (روز)									درصد نانو	خاک طبیعی		
۵۶			۲۸			۷				دامنه	حد	حد
دامنه	حد	حد	دامنه	حد	حد	دامنه	حد	حد		خمیری	خمیری	روانی
۲۸	۲۰	۴۸	۳۰	۲۰	۵۰	۲۹	۱۸	۴۷	۲			
۲۸	۲۰	۴۸	۲۴	۱۹	۴۳	۳۰	۱۶	۴۶	۴	۲۰	۱۶	۳۶
۲۷	۱۹	۴۶	۲۱	۱۹	۴۰	۲۸	۱۷	۴۵	۶			

۳-۱-۳ آزمایش تعیین درصد رطوبت خاک

به منظور تعیین درصد رطوبت خاک‌های منطقه مورد مطالعه، تعداد ۹ آزمایش با روش ASTM D2216 انجام گردید. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل ۳-۱ و جدول ۳-۲ ارائه شده است.



شکل ۳-۱ نمودار تغییرات میزان رطوبت بر اساس درصد نانو و مدت زمان عمل آوری

جدول ۳-۲ تغییرات درصد رطوبت در زمان‌های مختلف عمل آوری برای نمونه‌های حاصل از آزمایش مقاومت فشاری

عمل آوری ۵۶ روزه		عمل آوری ۲۸ روزه		عمل آوری ۷ روزه	
رطوبت (%)	میزان نانو (%)	رطوبت (%)	میزان نانو (%)	رطوبت (%)	میزان نانو (%)
۱۶	۲	۱۵	۲	۱۳	۲
۱۵	۴	۱۳	۴	۹	۴
۱۴	۶	۱۵	۶	۱۰	۶

بر اساس نتایج به دست آمده، با افزودن نانو به خاک، در زمان‌های عمل آوری مورد نظر، باعث افزایش درصد رطوبت نسبت به رطوبت خاک طبیعی می‌شود. بیشترین میزان جذب آب در عمل آوری ۵۶ روزه و با مخلوط ۲ درصد نانو و حداقل میزان رطوبت در زمان عمل آوری ۷ روزه، با مخلوط ۴ درصد نانو، به مقدار ۹ درصد می‌باشد.

۳-۲ آزمایش‌های مکانیکی

۳-۲-۱ آزمایش تراکم

جهت تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر خاک و رطوبت بهینه، بر روی نمونه‌های خاک طبیعی با مخلوط با ۲، ۴ و ۶ درصد نانو و در عمل آوری‌های ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه، تعداد ۳ آزمایش تراکم استاندارد مطابق با استاندارد ASTM D698، بر روی نمونه‌های خاک با درصدهای مشخص نانو انجام گردید (جدول ۳-۳). مقادیر حداکثر دانسیته خشک خاک با مخلوط ۲ الی ۶ درصد نانو و عمل آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌ها در پیوست ارائه گردیده است.

جدول ۳-۳ مقادیر رطوبت بهینه و حداکثر دانسیته خشک خاک اصلی و خاک با درصدهای با درصدهای معین نانو

درصد نانو	میزان رطوبت بهینه	دانسیته خشک حداکثر (gr/cm^3)
۰	۱۹	۱,۷۶
۲	۲۰	۱,۷۷
۴	۱۸	۱,۷۸
۶	۱۶	۱,۷۹

بر اساس نتایج به دست آمده از جدول ۳-۳ با مخلوط خاک با نانو، دانسیته خشک حداکثر نسبت با افزایش ماده نانو، به خاک طبیعی، دارای روند افزایشی می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده، میزان دانسیته خشک حداکثر، با افزایش نانو افزایش می‌یابد. بیشترین میزان دانسیته خشک حداکثر، مربوط به خاک با مخلوط ۶ درصد نانو و کمترین میزان آن مربوط به خاک با مخلوط ۲ درصد نانو می‌باشد. میزان رطوبت بهینه، با افزایش ماده نانو نسبت به خاک اصلی روند کاهشی دارد.

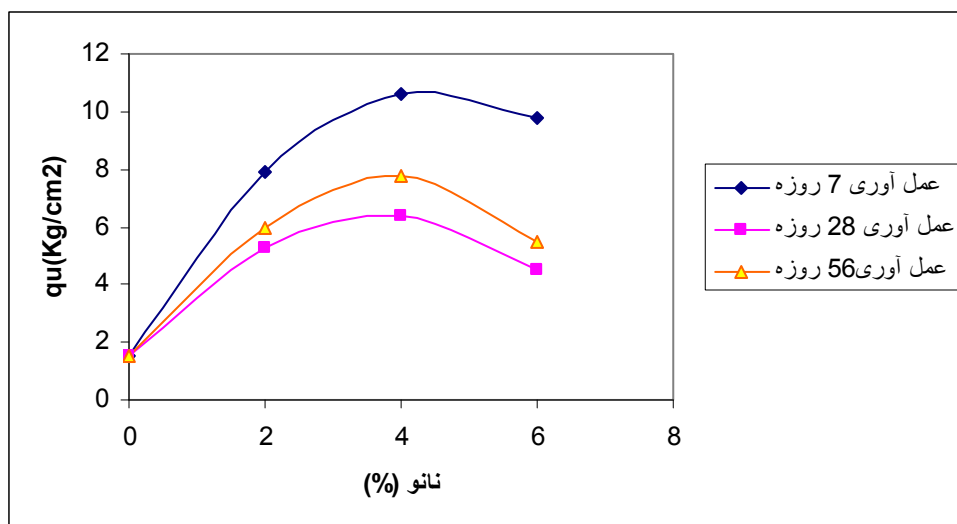
۳-۲-۲ آزمایش مقاومت فشاری

جهت تخمین مقاومت برشی خاک‌های چسبنده بر روی نمونه‌های خاک طبیعی و مخلوط شده با مقادیر ۲، ۴ و ۶ درصد نانو و عمل آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه، آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM D2166 انجام

شد. لازم به ذکر است، جهت حصول نتایج دقیق تر برای هر درصد مشخص نانو، دو سری آزمایش انجام گردید. نتایج آزمایش ها در پیوست ارئه گردیده است.

بر اساس نمودار شکل ۳-۲ و جدول ۳-۴ با مخلوط خاک با ماده نانو، مقاومت فشاری در عمل آوری ۷ روزه، بیشترین روند افزایشی را دارد. لازم به ذکر است مقاومت برشی در این زمان عمل آوری با مخلوط بیش از ۴ درصد نانو، کاهش می یابد.

بر اساس نتایج، خاک با مخلوط ۴ درصد نانو در زمان عمل آوری ۷ روز به مقدار 10.6 kg/cm^2 ، بیشترین مقاومت و کمترین مقاومت مربوط به مخلوط ۶ درصد نانو با زمان عمل آوری ۲۸ روزه به مقدار 4.5 kg/cm^2 را دارد



شکل ۳-۲ نمودار تغییرات مقاومت فشاری با درصدهای مختلف نانودر زمانهای مختلف عمل آوری

جدول ۳-۴ نتایج تغییرات حداکثر مقاومت فشاری با درصدهای مختلف نانو و زمانهای مختلف عمل آوری

$q_c (\text{kg/cm}^2)$			مدت عمل آوری (روز)
میزان نانو ۶%	میزان نانو ۴%	میزان نانو ۲%	
۹,۸	۱۰,۶	۷,۹	۷
۴,۵	۶,۴	۵,۳	۲۸
۵,۵	۷,۸	۶	۵۶

۳-۲-۳ آزمایش برش مستقیم ۱۰*۱۰ cm

جهت تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک منطقه مورد مطالعه، آزمایش برش مستقیم مطابق استاندارد ASTM D3080 بر روی نمونه‌های دست خورده با قالب ۱۰×۱۰cm انجام پذیرفت. از آنجا که مقادیر تنش قائم برای هر آزمایش باید متناسب با فشار سربار باشد، این آزمایش بر روی نمونه‌های خاک طبیعی و مخلوط شده با ۲، ۴ و ۶ درصد نانو برای روزهای عمل آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ با سه تنش قائم متفاوت (۰،۵، ۱ و ۲ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع) انجام گردید.

نتایج آزمایش شامل حداکثر تنش برشی، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)، چسبندگی ظاهری (C) در جدول ۳-۵ ارائه شده است.

جدول ۳-۵ پارامترهای حاصله از آزمایش برش مستقیم ۱۰*۱۰cm بر روی نمونه‌های خاک طبیعی و مخلوط با نانو

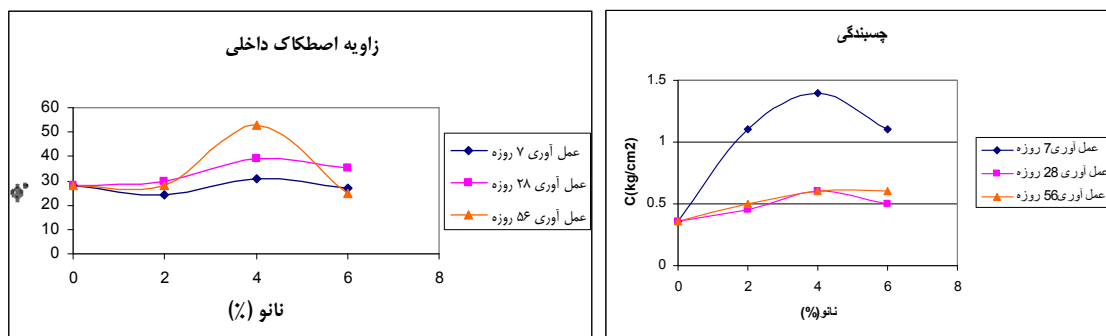
عمل آوری ۵۶ روزه			عمل آوری ۲۸ روزه			عمل آوری ۷ روزه		
(ϕ)	C (Kg/cm ²)	میزان اختلاط با نانو (%)	(ϕ)	C (Kg/cm ²)	میزان اختلاط با نانو (%)	(ϕ)	C (Kg/cm ²)	میزان اختلاط با نانو (%)
۲۸	۰،۵	۲	۲۹،۵	۰،۴۵	۲	۲۴	۱،۱	۲
۵۳	۰،۶	۴	۳۹	۰،۶	۴	۳۱	۱،۴	۴
۲۵	۰،۶	۶	۳۵	۰،۵	۶	۲۷	۱،۱	۶

ϕ° : زاویه اصطکاک داخلی

C: چسبندگی ظاهری

بر اساس نتایج به دست آمده افزودن ماده نانو باعث افزایش پارامترهای مقاومتی خاک می‌گردد. تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک، با درصد‌های مختلف نانو در جدول ۳-۵ و اشکال ۳-۶ و ۳-۷ نشان داده شده است. میزان چسبندگی با مدت زمان عمل آوری ۷ روزه افزایش می‌یابد. میزان چسبندگی در عمل آوری‌های ۲۸ و ۵۶ روزه تقریباً یکنواخت می‌باشد.

مطابق شکل ۳-۷، میزان زاویه اصطکاک داخلی در زمان عمل آوری ۵۶ روزه افزایش می‌یابد. حداکثر میزان زاویه اصطکاک داخلی خاک، برای عمل آوری ۵۶ روزه با مخلوط ۴ درصد نانو به مقدار ۵۳ درجه می‌باشد. کمترین میزان زاویه اصطکاک داخلی، مربوط به عمل آوری ۷ روزه با مخلوط ۲ درصد نانو به میزان ۲۴ درجه می‌باشد. لازم به ذکر است، مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک ابتدا تا مخلوط ۴ درصد، روند صعودی و سپس با افزایش نانو روند نزولی به خود می‌گیرد.



شکل ۳-۶ تغییرات چسبندگی با درصدهای متفاوت نانو و در زمان‌های عمل آوری ۲۸، ۷ و ۵۶ روزه در آزمایش برش مستقیم ۱۰*۱۰ cm

شکل ۳-۷ تغییرات زاویه اصطکاک داخلی با درصدهای متفاوت نانو و در زمان‌های عمل آوری ۲۸، ۷ و ۵۶ روزه در آزمایش برش مستقیم ۱۰*۱۰ cm

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی، افزودن نانو به مقدار ۴ درصد، بهترین مقدار جهت تثبیت خاک می‌باشد.

فصل چهارم

جمع بندی و نتیجه گیری

۴ مقدمه

در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر آهک و نانو بر روی خاک مسئله دار رسی، ابتدا مقدار مشخصی از خاک واقع در محل ساختگاه مورد مطالعه نمونه برداری و آزمایش گردید. جهت شناسایی دقیق اثر مواد افزودنی بر روی خاک مورد نظر، آزمایش‌های آزمایشگاهی متناسب با اهداف تحقیق شامل آزمایش‌های شاخص و مکانیکی بر روی خاک با درصدهای مخلوط ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد آهک و ۲، ۴ و ۶ درصد نانو انجام گردید. در این فصل ضمن ارائه نتایج به دست آمده، به مقایسه آن‌ها پرداخته و در نهایت بهترین روش عمل آوری با مخلوط مشخص ماده افزودنی تعیین می‌گردد.

۴-۱ جمع‌بندی

بر اساس نتایج دانه بندی، خاک مورد بررسی از نوع ماسه رسی (SC) می‌باشد. به منظور تعیین مقادیر حدود اتربرگ بر روی خاک طبیعی و خاک با مخلوط ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد آهک، تعداد ۱۳ آزمایش، انجام گردید. بر اساس نتایج به دست آمده با افزودن آهک به خاک طبیعی، باعث کاهش دامنه خمیری در عمل آوری‌های ۲۸ و ۵۶ روزه با مخلوط ۲ درصد آهک می‌گردد. کاهش دامنه خمیری، در دیگر مقادیر اختلاط، و با زمان‌های عمل آوری مورد نظر باعث از بین رفتن دامنه خمیری خاک می‌گردد.

جهت تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر خاک و رطوبت بهینه، تعداد ۵ آزمایش تراکم استاندارد بر روی نمونه خاک اصلی و نمونه‌های با درصدهای متفاوت آهک انجام گردید. بر اساس نتایج به دست آمده از مخلوط خاک با آهک، میزان دانسیته خشک حداکثر نسبت به خاک طبیعی، کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. روند کاهش با افزایش درصد مخلوط با آهک از 1.63 gr/cm^3 تا 1.58 gr/cm^3 می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده میزان رطوبت بهینه، ابتدا با افزودن ۲ درصد آهک، افزایش و سپس با افزودن ۴ درصد آهک، کاهش می‌یابد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش آهک به میزان ۶ درصد و به بالا، قدرت جذب آب و درصد رطوبت در خاک مورد آزمایش افزایش می‌یابد.

جهت تخمین مقاومت فشاری بر روی خاک طبیعی و نمونه‌های مخلوط شده برای هر درصد مشخص آهک، دو سری آزمایش انجام گردید. بر اساس نتایج به دست آمده، میزان مقاومت فشاری در طول زمان، افزایش می‌یابد. به طوری که در عمل آوری ۵۶ روزه، مقاومت فشاری بیشترین روند افزایشی را دارد. لازم به ذکر است مقاومت فشاری، در این زمان عمل آوری خاک با مخلوط بیش از ۶ درصد آهک کاهش می‌یابد. بیشترین مقاومت فشاری

در خاک با مخلوط ۴ درصد آهک، با زمان عمل آوری ۲۸ روزه و کمترین مقاومت فشاری مربوط به خاک با مخلوط ۸ درصد آهک در عمل آوری ۷ روزه می‌باشد.

جهت تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک منطقه مورد مطالعه، آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های دست خورده با قالب $10 \times 10 \text{ cm}$ انجام پذیرفت. این آزمایش بر روی نمونه‌های خاک طبیعی و مخلوط شده با ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد آهک، برای عمل آوری‌های ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه، با سه تنش قائم متفاوت (۰، ۱ و ۲ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع) انجام گردید.

نتایج نشان می‌دهد، میزان چسبندگی با افزایش مدت زمان عمل آوری افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار چسبندگی در عمل آوری ۵۶ روزه مربوط به خاک با مخلوط ۸ درصد آهک، و کمترین مقدار، مربوط به خاک با مخلوط ۲ درصد آهک با عمل آوری ۷ روزه می‌باشد. لازم به ذکر است روند تغییرات چسبندگی در عمل آوری‌های ۷ و ۲۸ روزه تقریباً یکنواخت است. بر اساس نتایج به دست آمده زاویه اصطکاک داخلی با افزایش مدت زمان عمل آوری کاهش می‌یابد. بیشترین میزان زاویه اصطکاک داخلی مربوط به خاک با عمل آوری ۷ روزه و مخلوط با ۶ درصد آهک می‌باشد.

بررسی‌ها نشان می‌دهد با افزودن نانو به خاک، دامنه خمیری نسبت به خاک طبیعی افزایش می‌یابد. خاک با مخلوط ۲ درصد نانو و با عمل آوری ۲۸ روزه، دارای بیشترین دامنه خمیری می‌باشد. کمترین میزان دامنه خمیری مربوط به خاک با مخلوط ۶ درصد نانو و عمل آوری ۲۸ روزه می‌باشد.

بر اساس نتایج به دست آمده، با افزودن نانو به خاک در زمان‌های عمل آوری مورد نظر، باعث افزایش درصد رطوبت نسبت به رطوبت خاک طبیعی می‌شود. بیشترین میزان جذب آب در خاک با عمل آوری ۵۶ روزه و مخلوط ۲ درصد نانو و حداقل میزان رطوبت در زمان عمل آوری ۷ روزه، با مخلوط ۴ درصد آهک، می‌باشد.

دانسیتته خشک حداکثر با افزایش ماده نانو به خاک طبیعی روند افزایشی نشان می‌دهد. بیشترین میزان دانسیته خشک حداکثر مربوط به خاک با مخلوط ۶ درصد نانو و کمترین میزان آن مربوط به خاک با مخلوط ۲ درصد نانو می‌باشد. میزان رطوبت بهینه با افزایش ماده نانو نسبت به خاک اصلی روند کاهشی دارد.

بر اساس نتایج، با مخلوط خاک با ماده نانو، میزان مقاومت فشاری در عمل آوری ۷ روزه، بیشترین روند افزایشی را دارد. لازم به ذکر است مقاومت فشاری، در این زمان عمل آوری با مخلوط بیش از ۴ درصد نانو، کاهش می‌یابد. خاک با مخلوط ۴ درصد نانو در زمان عمل آوری ۷ روزه بیشترین مقاومت و کمترین مقاومت مربوط به مخلوط ۶ درصد نانو با زمان عمل آوری ۲۸ روزه می‌باشد.

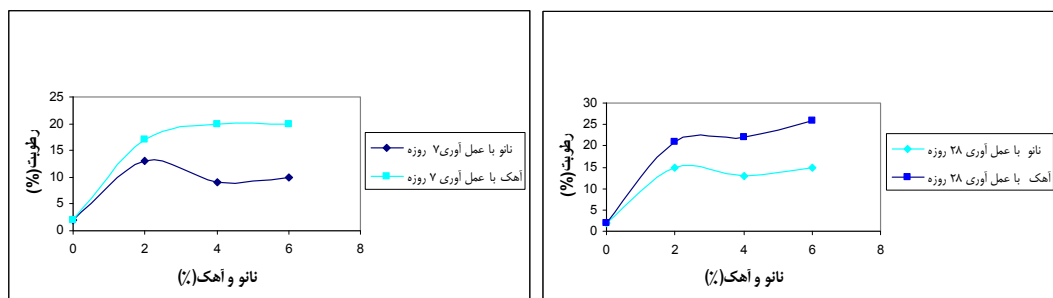
بر اساس نتایج مخلوط خاک با ماده نانو، میزان چسبندگی در زمان عمل آوری ۷ روزه افزایش می‌یابد. میزان چسبندگی در عمل آوری‌های ۲۸ و ۵۶ روزه تقریباً یکنواخت می‌باشد. زاویه اصطکاک داخلی در زمان عمل آوری ۵۶ روزه افزایش می‌یابد. حداکثر میزان زاویه اصطکاک داخلی، برای خاک با عمل آوری ۵۶ روزه و مخلوط ۴ درصد نانو می‌باشد. کمترین میزان زاویه اصطکاک داخلی، مربوط به عمل آوری ۷ روزه با مخلوط ۲ درصد نانو می‌باشد.

بر اساس جدول ۴-۱، مخلوط مواد افزودنی با خاک، باعث تغییر دامنه خمیری می‌گردد. میزان تغییر بستگی به نوع افزودنی دارد. به طوریکه ماده آهک به جز مقادیر ۲ درصد با عمل آوری ۲۸ و ۵۶ روزه، باعث تغییر رفتار کامل رس، به حالت غیر خمیری می‌گردد. همچنین افزودن نانو به خاک، به جز در زمان عمل آوری ۷ روزه باعث تغییر رفتار رس به سمت جذب آب بیشتر و در نتیجه افزایش دامنه خمیری می‌گردد. با توجه به نتایج آهک تاثیر پذیری بیشتری نسبت به نانو در کاهش جذب آب و افزایش رفتار غیر خمیری رس دارد.

جدول ۴-۱ مقادیر حدود اتربرگ خاک با درصدهای مختلف آهک و نانو و عمل آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه

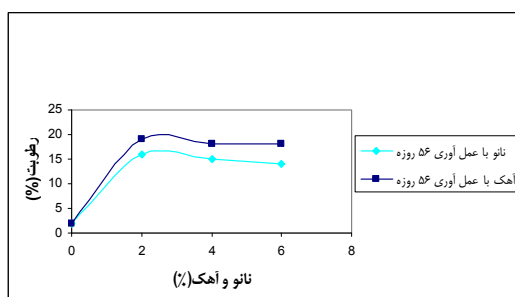
زمان عمل آوری (روز)									افزودنی %
۵۶			۲۸			۷			
دامنه خمیری	حد خمیری	حد روانی	دامنه خمیری	حد خمیری	حد روانی	دامنه خمیری	حد خمیری	حد روانی	
۱۵	۲۲	۳۷	۹	۲۵	۳۴	NP			۲
NP				NP		NP			۴
NP				NP		NP			۶
NP				NP		NP			۸
۲۸	۲۰	۴۸	۳۰	۲۰	۵۰	۲۹	۱۸	۴۶	۲
۲۹	۲۰	۴۸	۲۴	۱۹	۴۳	۲۹	۱۶	۴۶	۴
۲۷	۱۹	۴۷	۲۱	۱۹	۴۰	۲۸	۱۷	۴۴	۶

بر اساس اشکال ۴-۱ مخلوط مواد افزودنی به خاک، باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در میزان جذب رطوبت می‌گردد. این میزان افزایش آهک، در طول زمان تاثیر بیشتری در افزایش رطوبت خاک دارد. لازم به ذکر است، بر اساس شکل ۴-۱-ج روند تغییرات در بلند مدت برای هر دو ماده یکسان است.



الف

ب



ج

شکل ۴-۱ نمودار تغییرات میزان رطوبت بر اساس درصد نانو و آهک و مدت زمان عمل آوری

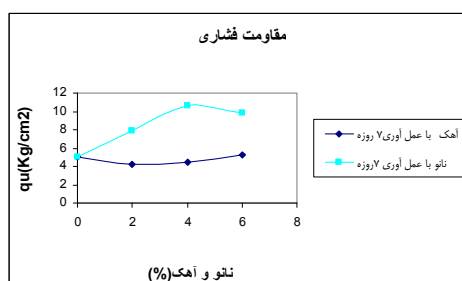
بر اساس جدول ۴-۲ با مخلوط خاک با آهک، میزان دانسیته خشک حداکثر نسبت به خاک طبیعی، کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. روند کاهش با افزایش درصد مخلوط با آهک از 1.63 gr/cm^3 تا 1.58 gr/cm^3 می‌باشد. میزان رطوبت بهینه، ابتدا با افزایش درصد آهک تا میزان ۲ درصد، افزایش و سپس با افزودن ۴ درصد آهک، کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج به دست آمده با مخلوط خاک با نانو، دانسیته خشک حداکثر نسبت با افزایش ماده نانو، به خاک طبیعی، دارای روند افزایشی می‌باشد. میزان دانسیته خشک حداکثر، با افزایش نانو افزایش می‌یابد. بیشترین میزان دانسیته خشک حداکثر مربوط به خاک با مخلوط ۶ درصد نانو و کمترین میزان آن مربوط به خاک با مخلوط ۲ درصد نانو می‌باشد. میزان رطوبت بهینه با افزایش ماده نانو نسبت به خاک اصلی روند کاهشی دارد.

مقایسه نتایج نشان دهنده تاثیر معکوس مواد افزودنی آهک و نانو می‌باشد. بیشترین درصد رطوبت بهینه و کمترین دانسیته خشک مربوط به خاک با مخلوط ۸ درصد آهک و کمترین درصد رطوبت و بیشترین دانسیته خشک متعلق به خاک با مخلوط ۶ درصد مواد نانو می‌باشد.

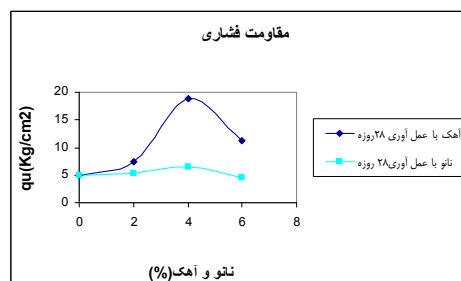
جدول ۴-۲ مقادیر رطوبت بهینه و حداکثر دانسیته خشک خاک اصلی و خاک با درصدهای معین نانو

درصد آهک	میزان رطوبت بهینه	دانسیته خشک حداکثر (gr/cm^3)
۰	۱۹	۱,۷۶
۲	۲۳	۱,۶۳
۴	۲۲	۱,۶۱
۶	۲۲	۱,۶
۸	۲۳	۱,۵۸
درصد نانو	میزان رطوبت بهینه	دانسیته خشک حداکثر (gr/cm^3)
۰	۱۹	۱,۷۶
۲	۲۰	۱,۷۷
۴	۱۸	۱,۷۸
۶	۱۶	۱,۷۹

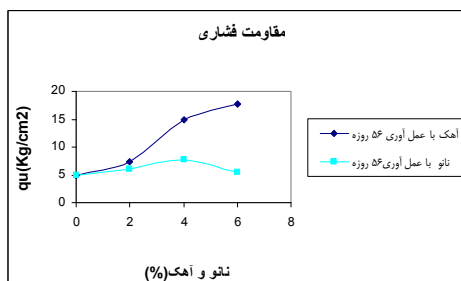
بررسی نتایج نشان می‌دهد با مخلوط هر دو ماده افزودنی، مقاومت فشاری خاک افزایش می‌یابد (شکل ۴-۲). با افزودنی آهک در بلند مدت تاثیر بیشتری در افزایش مقاومت فشاری خاک دارد. بهترین میزان افزودنی، خاک با مخلوط ۶ درصد آهک و عمل آوری ۵۶ روز می‌باشد.



الف



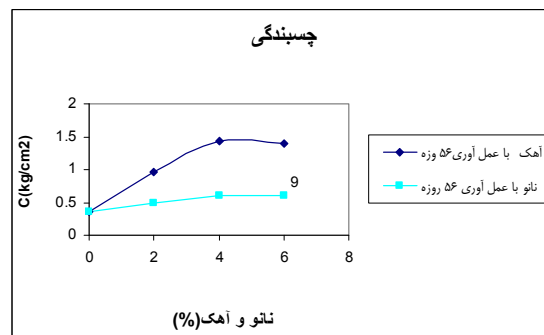
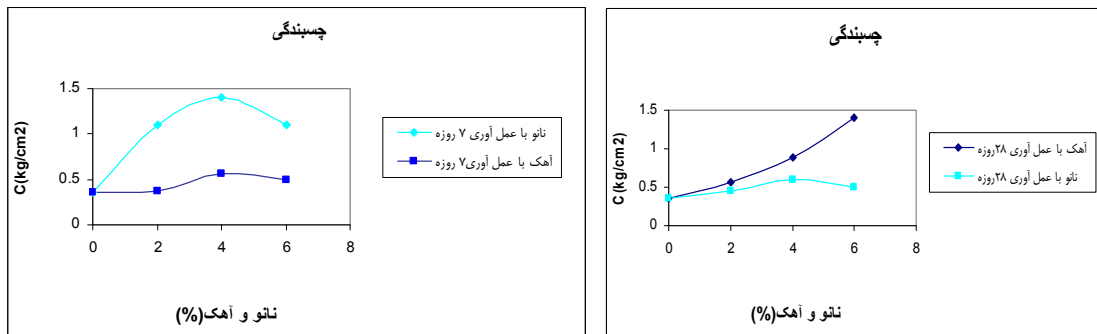
ب



ج

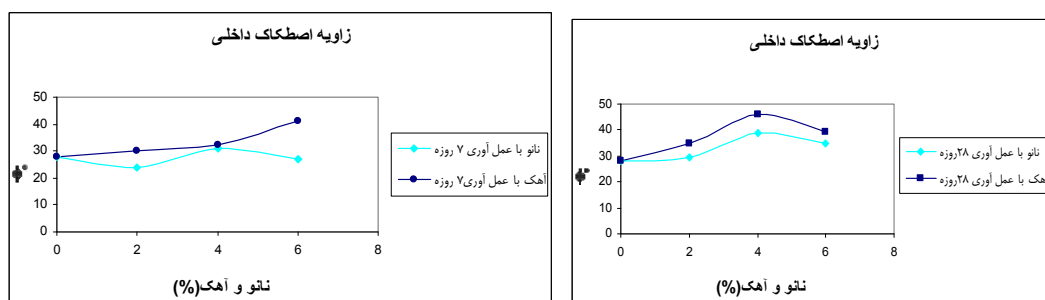
شکل ۴-۲ نمودار تغییرات مقاومت فشاری با ۲، ۴ و ۶ درصد آهک و نانودر زمانهای مختلف عمل آوری

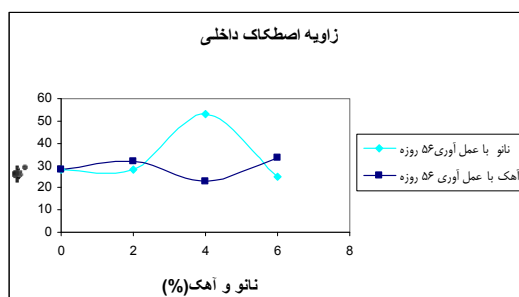
بررسی نتایج آزمایش برش مستقیم نشان می‌دهد با مخلوط هر دو ماده افزودنی، چسبندگی خاک افزایش می‌یابد (شکل ۳-۴). مقایسه نتایج نشان دهنده ماده افزودنی آهک تاثیر بیشتری در افزایش چسبندگی خاک، نسبت به نانو در طول زمان دارا می‌باشد. به طوری‌که بیشترین تاثیر آهک مربوط به عمل آوری ۵۶ روزه با مخلوط ۶ درصد می‌باشد.



شکل ۳-۴ نمودار تغییرات چسبندگی با مقادیر ۲، ۴ و ۶ درصد آهک و نانو در زمانهای مختلف عمل آوری

بر اساس نتایج به دست آمده، مخلوط خاک با ماده نانو با گذشت زمان تاثیر بیشتری بر میزان زاویه اصطکاک داخلی خاک نسبت به آهک دارد. بیشترین مقدار اصطکاک داخلی مربوط به خاک با مخلوط ۴ درصد آهک عمل آوری ۵۶ روزه می‌باشد (شکل ۴-۴).





ج

شکل ۴-۴ نمودار تغییرات زاویه اصطکاک داخلی با مقادیر ۲، ۴ و ۶ درصد آهک و نانودر زمانهای مختلف عمل آوری

۴-۲ نتیجه گیری

بر اساس تلفیق اطلاعات نتایج ذیل حاصل گردید:

۱. جنس خاک، ماسه رسی می باشد.
۲. ماده آهک به جز مقادیر ۲ درصد در عمل آوری ۲۸ و ۵۶ روزه، باعث تغییر رفتار کامل رس به حالت غیر خمیری می گردد.
۳. افزودن نانو به خاک باعث تغییر رفتار رس به سمت جذب آب کمتر و افزایش دامنه خمیری می گردد.
۴. مخلوط مواد افزودنی به خاک، موجب تغییر قابل ملاحظه‌ای در میزان جذب رطوبت می گردد.
۵. مخلوط خاک با آهک، میزان دانسیته خشک حداکثر نسبت به خاک طبیعی کاهش قابل ملاحظه‌ای می یابد.
۶. مخلوط خاک با نانو موجب افزایش دانسیته خشک حداکثر خاک طبیعی و با افزایش در صد، روند افزایشی دارد.
۷. مقایسه نتایج نشان دهنده تاثیر معکوس مواد افزودنی آهک و نانو در روند دانسیته خشک حداکثر و رطوبت بهینه می باشد.
۸. افزودن هر دو ماده، موجب افزایش مقاومت فشاری خاک می شود.
۹. افزودن آهک به خاک در بلند مدت تاثیر بیشتری در افزایش مقاومت فشاری نسبت به نانو دارد. بهترین میزان افزودنی، آهک به میزان ۶ درصد و عمل آوری ۵۶ روز می باشد.
۱۰. آزمایش برش مستقیم نشان می دهد با افزودن هر دو ماده، چسبندگی خاک افزایش می یابد.

۱۱. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که ماده افزودنی آهک دارای تاثیر بیشتری در افزایش چسبندگی خاک، نسبت به نانو در طول زمان می‌باشد. بیشترین تاثیر آهک مربوط به عمل آوری ۵۶ روزه به میزان ۶ درصد می‌باشد.

۱۲. بر اساس نتایج به دست آمده، مخلوط خاک با نانو با گذشت زمان تاثیر بیشتری بر میزان زاویه اصطکاک داخلی خاک نسبت به مخلوط خاک با آهک دارد. مقدار اصطکاک داخلی مربوط به خاک با مخلوط ۴ درصد آهک می‌باشد.

۱۳. جهت تثبیت خاک ساختگاه مورد نظر بهترین ماده افزودنی آهک به میزان ۶ درصد و ماده نانو به میزان ۴ درصد می‌باشد. بر اساس نتایج این تحقیق، آهک عملکرد بهتری نسبت به ماده نانو پلیمر در این ساختگاه، دارد.

فهرست منابع

- 1- Hadi J. Yap, PhD, PE, GE An Introduction to building foundations and soil improvement methods, - SEAONC 2008 Spring Seminar San Francisco, 16 April 2008
- ۲- حامی، الف- مصالح ساختمانی - انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۷۱.
- 3- Das, B.M. Principles of foundation engineering- PWS publishing Company- Boston, 1995.
- 4- Bengt, B. Broms- Ground Improvement- John Wiley & Sons publishing company, 1993.
- 5- Oates, J.A.H.- Lime and Limestone- John Wiley & Sons publishing company, 1998.
- ۶- طباطبائی، الف. م.- مکانیک خاک- انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۷۳.
- ۷- احمدنیا، ف- تثبیت خاک کائولینیت با آهک و تاثیر سولفات کلسیم بر مقاومت آنها- پایان نامه کارشناسی ارشد- دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۷۷.
- 8- Roberts, J.D., "Performance of Cement Modified Soils: A Follow-Up Report," Transportation Research Record 1089, Transportation Research Board, 1986.
- 9- Bell, F.G. and Tyrer, M.J.- The enhancement of the properties of clay soils by the addition of cement or lime- Proc. 12th International conference of soil mechanics and foundation engineering- Rio de Janiro, 1989.
- 10- Mc Nally, G.H.- Soil & Rock Construction materials- E & FN Spon publishing company, 1990.
- ۱۱- جهانشاهی، منوچهر- تثبیت شیمیایی خاکهای گچ‌دار با استفاده از آهک و مقایسه نتایج اختلاط معمولی با دو مرحله‌ای- پایان نامه کارشناسی ارشد- دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۹.
- 12- Shrewood, P. Soil Stabilization with cement and lime, Second Edition, 1995.
- 13- Mitchel. J.K. "Practical problems from surprising soil behavior". J. Geotech. And Geoenvir. Engrg., ASCE, 112 (3), 1986.
- 14- Hunter.D., "Lime- induced heave in sulfate- bearing clay soils". J. Geotech and Geoenvir. Engrg., ASCE. 114 (2), 1988.
- 15- Ferris, G.A., Eades. J.L., Graves. R.E. and Melellan, G.H. "Imprived characteristics in sulfate soils treated with barium compounds before lime stabilization". Transportation Research Record, 1295- 1991, 1991.
- 16- Huntington. G., Ksaibati. K., and Oyler, W.A., "Sulfate expansion of cement-treated bases". Transportation Research Record. 1486, 1995.
- 17- Ahnberg, H. and Holm, G.- The lime column method- Swedish Geotechnical Institute- Linköping, Sweden, 1986.

- ۱۸- خدابنده، ناهید، ماجدی اردکانی، محمدحسین، ویسه، سهراب- مصالح بنایی با استفاده از خاک، گچ، آهک و مخلوطهای آنها در شش استان ایران- گزارش تحقیقاتی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تابستان ۱۳۷۸.
- ۱۹- عبدی، محمودرضا- طبرسا، علیرضا، "تاثیر آهک بر مقاومت خاک کائولینیت در برابر یخبندان- ذوب یخ"، پایان نامه کارشناسی ارشد- دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۷۷.
- ۲۰- شریفی، وحید- مطالعه تثبیت مصالح اساس و زیر اساس و رویه سنگدانه‌ای با استفاده از نانو پلیمر CBR PLUS-پایان نامه کارشناسی ارشد.دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، ۱۳۹۱