نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۷، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۲، ص. ۹۴۸-۹۴۰

Journal of Water and Soil
Vol. 27, No.5, Nov.-Dec. 2013, p. 940-948

تاثیر دوره‌های تر - خشک بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس تثبیت شده با سیمان و آهک

زهرا مهرموسوی[۱]- جواد بهمنش[۲*]- بایرامعلی محمدنژاد[۳]

تاریخ دریافت:۱۳۹۱/۱۰/۲۶
تاریخ پذیرش:۱۳۹۲/۷/۲۱

چکیده

در اکثر پروژه‌های عمرانی از جمله احداث شبکه‌های آبیاری و زهکشی تثبیت خاک نقش مهمی را دارد. دستیابی به حداکثر دوام یا پایایی در برابر دوره‌های تر – خشک یکی از اهداف تثبیت خاک می‌باشد. لذا لیانت‌های هیدرولیکی مختلفی با مقادیر متفاوت وابسته به نوع و اهمیت پروژه مورد آزمایش قرار می‌گیرد تا نتیجه مطلوب از نقطه نظر اقتصادی و فنی حاصل شود. در این تحقیق تاثیر دوره‌های تر – خشک بر روی خواص مهندسی خاک رس (با خمیرایی کم) تثبیت شده مطالعه و لیانت‌های آهک، سیمان، آهک-سیمان با مقادیر (۶-۲) درصد وزنی خاک، استفاده گردید. نتایج نشان داد که با تغییر نوع و درصد لیانت، دوام نمونه های مختلف در برابر دوره های تر –خشک مختلف می باشد بطوریکه نمونه های بدون لیانت دوام نداشته و نمونه های با ترکیب آهک۴٪- سیمان۴٪ ، ۱۲ سیکل تر-خشک را تحمل نمودند. همچنین نتایج نشان داد که پس از سیکل های تر-خشک، حجم و جرم نمونه ها تغییر و مقاومت فشاری آنها کاهش می یابد بطوریکه مقاومت فشاری نمونه ها از ۴۰ درصد تا ۶۰ درصد کاهش یافت. این مطالعه نشان می‌دهد که دوره‌های تر – خشک باعث تغییرات مشخص در خصوصیات ژئوتکنیکی خاک می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تر - خشک، سیمان، آهک، مقاومت فشاری محدود نشده، دوام

مقدمه

در احداث شبکه‌های آبیاری و زهکشی استفاده از خاک ریز دانه اجتناب ناپذیر است و با توجه به اینکه خاک رس در اکثر مناطق ایران در دسترس می‌باشد، از طرفی چون منابع قرضه در اکثر موارد غیر اقتصادی است، لذا استفاده از خاک رس در پروژه‌های آبیاری و زهکشی متداول است. خاک رس به دلیل نامطلوب بودن ویژگی‌های مهندسی با روش‌های مختلفی، از جمله تثبیت اصلاح می‌گردد (۱۴). خاک تثبیت یافته ممکن است با پدیده هایی روبرو شود که اثر نامطلوب بر خواص مهندسی بهبود یافته آن داشته باشند از آن جمله می‌توان به دوره‌های تر – خشک متوالی اشاره کرد که این پدیده ها به خصوص در مناطقی که مستعد بارندگی هستند به طور طبیعی اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند و با تغییر و تخریب ساختار خاک اثر منفی بر دوام و تحمل پذیری خاک طبیعی و همچنین خاک تثبیت شده می‌گذارند (۲۸). به عبارت دیگر ساختار تثبیت شده خاک در اثر تهاجم محیط مانند پدیده‌های تر – خشک تخریب می‌شود. چرخه تر – خشک به عنوان یکی از مهمترین دلایل تخریب ساختار سازه به شمار می‌رود (۲۵). از سوی دیگر مهندسین پی، شرایط متفاوت آب و هوایی را به عنوان فاکتور مهم تاثیر گذار بر عملکرد پی معرفی کرده اند (۲۷). پدیده‌های تر – خشک به عنوان مهم ترین عوامل مخرب شناخته می‌شوند که به تخریب ساختار خاک تثبیت به مانند زلزله عمل می‌کنند (۱۹ و ۲۴). لذا برای مقابله با این نیروهای مخرب واژه دوام (پایایی) معرفی می‌شود که عبارت است از توانایی مواد برای پایداری در مقابل نیروهای مخرب آب و هوایی برای مدت زمان طولانی (۹). به عبارت دیگر دوام می‌تواند به عنوان توانایی مخلوط برای حفظ یکپارچگی مخلوط در طول خطرات آب و هوایی مانند دوره‌های تر – خشک باشد. مهم ترین فاکتورهای اساسی برای دوام خاک در برابر دوره‌های تر – خشک ساختار اصلی و مقاومت کششی اجزا می‌باشد. عوامل موثر دیگر شامل فاکتورهایی همچون خمیرایی خاک، نوع خاک و مقدار تثبیت کننده ها و روش‌های تراکم و اختلاط، عمل آوری و شرایط عمل آوری می‌باشند (۶ و ۲۸). به جهت اهمیت

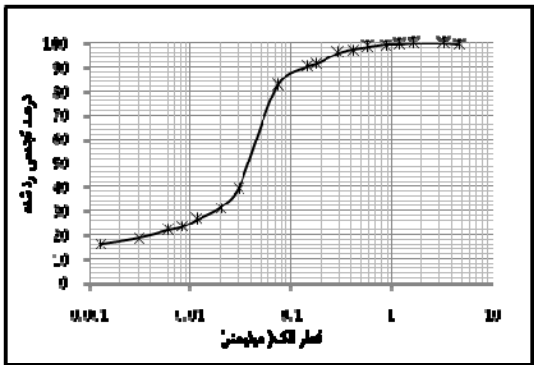
۱، ۲ و ۳ – به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد سازه های آبی و استادیاران گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه
(*- نویسنده مسئول: Email: j.behmanesh@urmia.ac.ir)

موضوع در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده ای در این خصوص صورت پذیرفته است. خاک تثبیت شده دوام بهتری در برابر دوره‌های تر – خشک دارد (۱۵، ۱۸، ۱۹ و ۲۴). خاک تثبیت شده با سیمان در مقایسه با خاک تثبیت شده با آهک عملکرد بهتری در برابر دوره تر– خشک دارد (۶ و ۱۸). هریچانه و همکاران (۱۳) در یافتند که پس از پایان دوره‌های تر – خشک ضمن کاهش جرم خاک، مقاومت فشاری خاک نیز به دلیل تخریب واکنش‌های پوزولانی در طول دوره‌های تر – خشک کاهش می‌یابد. افزایش درصد تثبیت کننده در مقایسه با کاهش درصد ذرات ریز دانه فاقد چسبندگی خصوصیات مقاومتی خاک را بهتر بهبود می‌بخشد (۱۷). ترکیبات مختلف لیانت ها با خاک (از لحاظ مقدار و نوع لیانت) نتایج کاملاً مختلفی را در خصوص دوام در برابر دوره‌های تر – خشک از خود نشان می‌دهند (۱۸ و ۲۸). دوره‌های تر و خشک باعث کاهش نسبت تورم خاک می‌شود (۲، ۷، ۱۰، ۲۰ و ۲۲). تاثیر منفی و مخرب دوره‌های تر – خشک بر خصوصیات اصلی مهندسی خاک و هم چنین تخریب ساختار سیمانی حاصل از تثبیت خاک، باعث می‌شود خصوصیات مهندسی خاک تضعیف شده و به خصوص مقاومت فشاری خاک در پایان دوره کاهش یابد، لازم به ذکر است در برخی تحقیقات افزایش مقاومت فشاری در طول دوره‌های تر – خشک گزارش شده است که دلیل آن را تکمیل واکنش‌های پوزولانی در طول سیکل تر – خشک ذکر کرده اند (۳، ۵، ۷، ۱۲، ۱۶، ۲۱، ۲۶ و ۲۷). لزوم انجام این تحقیق ناشی از آن بود که به دلایل طبیعی ناشی از بارندگی در اکثر مناطق ایران و یا به دلایل غیر طبیعی دوره‌های تر – خشک اتفاق می‌افتد. هم چنین از آنجائیکه در شهر ارومیه پروژه‌های عمرانی متعددی از جمله احداث کانال‌های آبیاری صورت می‌گیرد و لذا بررسی مقاومت خاک‌های تثبیت شده در آن مناطق بعد از سیکل‌های تر و خشک شدن متوالی جهت پایداری پروژه ها مهم جلوه می‌نمود. در این تحقیق ابتدا به شناسایی خاک مورد مطالعه پرداخته شده سپس خصوصیت مقاومتی خاک تثبیت شده با آزمایش مقاومت فشاری بررسی گردید در نهایت در این تحقیق تحمل پذیری و دوام خاک تثبیت شده با آهک، سیمان، سیمان – آهک در برابر دوره‌های تر و خشک مورد بررسی قرار گرفته است که برای بررسی این موضوع آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده بر روی نمونه‌های پس از طی دوره تر – خشک، انجام گرفت. هم چنین اندازه گیری جرم و حجم نمونه ها پس از دوره‌های تر – خشک صورت گرفت. به دلیل اینکه منطقه مورد مطالعه شهرک صنعتی ارومیه بوده و تثبیت خاک این منطقه مورد نیاز است، لذا استفاده از لیانت‌های هیدرولیکی سیمان و آهک با درصدهایی با توجیه اقتصادی و بررسی حداکثر دوام این تثبیت در برابر سیکل تر –خشک می‌تواند نوآوری تحقیق محسوب شود.

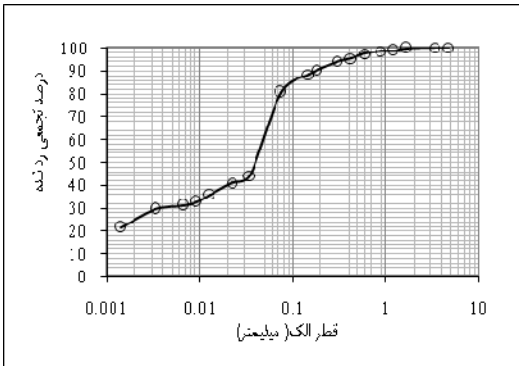
مواد و روش ها

جمع آوری مواد و خصوصیات پایه نمونه خاک ها به جهت اینکه اهداف این مقاله برای استفاده پروژه‌های عمرانی است لذا مناطق انتخابی برای برداشت نمونه شهرک صنعتی ارومیه انتخاب شده اند هم چنین از عمق ۱۰ سانتی متری سطح خاک به بعد نمونه برداشت شده تا خاک زراعی مورد استفاده واقع نشود. هم چنین با توجه به مطالعات شناسایی که از قبل صورت پذیرفته، خاک رس شهرک صنعتی دارای ساختاری مشابه بوده و کانی غالب کائولینیت بوده (۷۵ درصد) و لذا تنها دو منطقه که با توجه به مطالعات به نظر می‌رسد بیشترین اختلاف ساختاری را داشته باشند مورد مطالعه قرار گرفته اند. خاک‌های مورد مطالعه از دو منطقه اردوشاهی (خاک شماره ۱، کانی غالب کائولینیت ۷۴ درصد) از عمق ۷۰–۳۰ سانتی متر زمین و جبل کندی (خاک شماره ۲، کانی غالب کائولینیت ۶۰ درصد، ایلیت ۱۹درصد) از عمق ۶۰–۳۰ سانتی متری زمین واقع در جنوب شهر ارومیه برداشت شده‌اند. برای طبقه بندی خاک‌های مورد مطالعه آزمایش دانه بندی (الک برای بخش درشت دانه و هیدرومتری برای بخش ریز دانه) بر طبق استاندارد ASTM D 422-87 صورت گرفت. منحنی دانه بندی خاک‌های مورد مطالعه در اشکال ۱ و ۲ آورده شده اند. بر طبق طبقه بندی یونیفاید نمونه خاک‌های مورد آزمایش در گروه CL (خاک رس با خاصیت خمیری کم) قرار می‌گیرند.

برای شناسایی خاک‌های مورد مطالعه آزمایشات حدود اتربرگ بر طبق استاندارد ASTM D 4318، آزمایش تراکم بر طبق استاندارد ASTM D 698، آزمایش چگالی ویژه بر طبق استاندارد ASTM D 854-87، و آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده بر طبق استاندارد ASTM D 2166 انجام شده است. نتایج آزمایشات شناسایی خاک‌ها در جدول ۱ آورده شده است.



شکل۱- نمودار دانه بندی خاک شماره ۱



شکل۲- نمودار دانه بندی خاک شماره ۲

جدول ۱- خصوصیات پایه خاک‌های مورد مطالعه

خصوصیات	مشخصات خاک ۱	مشخصات خاک ۲
حد روانیLL (%)	۲۶/۵	۳۳/۴
حد خمیریPL (%)	۱۳/۳۹	۱۹/۴
شاخص خمیریPI (%)	۱۲/۹۱	۱۴
مشخصات تراکم		
وزن مخصوص خشک (gr/cm^3)	۱/۸۲	۱/۶۵
رطوبت بهینه (%)	۱۴/۵	۲۱
وزن مخصوص مرطوب	۲/۳۷	۱/۹۸
چگالی ویژه	۲/۷	۲/۶۶
مقدار رطوبت (%)	۸/۶	۱۲/۹
مقاومت فشاری محدود نشده (Kpa)	۴۵۲	۷۳۵

برای شناسایی خصوصیات سیمان و آهک آزمایش چگالی ویژه به ترتیب بر طبق استاندارد ASTM C 127-01 و ASTM D 854-87 انجام گردید. خصوصیات آهک و سیمان مورد استفاده در ساخت نمونه ها در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- خصوصیات آهک و سیمان مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها

خصوصیات	آهک	سیمان
چگالی ویژه	۲/۳۱	۳/۱۷
نوع لیانت	شکفته	نوع ۱

آماده سازی نمونه ها

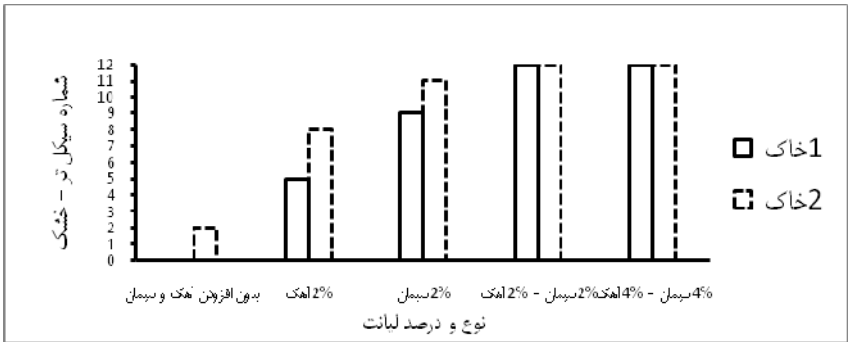
تمامی آزمایشات بر طبق استاندارد ASTM انجام گرفته است. آزمایشات صورت گرفته عبارتند از آزمایش مقاومت فشاری تک محوره بر طبق استاندارد ASTM D 2166 و آزمایش تر – خشک که بر طبق استاندارد ASTM D 559 انجام شدند. لیانتهای آهک و سیمان هرکدام به طور جداگانه در درصدهای وزنی ۲٪ ، ۴٪، ۶٪ و همچنین لیانت آهک – سیمان به طور همزمان به صورت آهک۲٪- سیمان۲٪، آهک ۴٪- سیمان۴٪ وزنی مخلوط مورد نظر به خاک اضافه شدند. اضافه می‌شود درصدهای انتخابی در این تحقیق زیر ۱۰٪ انتخاب شده اند تا طرح توجیه اقتصادی داشته باشد. برای تهیه مخلوط خاک رس و لیانت‌های هیدرولیکی، مقادیر لازم خاک رس و لیانت‌های آهک، سیمان از مجموع وزن خشک مخلوط اندازه گیری شده و سپس خاک و مقدار آب لازم (در حد رطوبت بهینه) به مدت دو دقیقه باهم مخلوط شده اند در ادامه برای تهیه نمونه حاوی آهک و آهک – سیمان، ابتدا آهک به مخلوط آب و خاک اضافه شده برای مدت پنج دقیقه با مخلوط هم زده شدند سپس برای تهیه نمونه‌های حاوی آهک – سیمان، سیمان بعد از یک ساعت به مخلوط اضافه شده و به مدت پنج دقیقه هم زده شده است. برای تهیه نمونه‌های فقط حاوی سیمان پس از مخلوط کردن خاک و آب بعد از مدت یک ساعت سیمان به مخلوط اضافه شده و برای مدت پنج دقیقه هم زده شده است. نمونه ها به شکل استوانه و با ابعاد قطر ۳۵ میلیمتر و ارتفاع ۷۵ میلیمتردر سه لایه به طور مساوی متراکم شده اند (انرژی تراکمkj/m^3 ۲۱۲/۵۳). نمونه ها جهت آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش تر و خشک متوالی در دوره ۹۰ روزه در دمای اتاق (^oC ۲۰±۲) و هوای آزاد عمل آوری شده اند. لازم به ذکر است برای حصول نتایج بهتر و دقیق تر در هر دو آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش تر – خشک برای هر یک از مقادیر هر کدام از لیانت‌های اضافه شده تعداد ۳ نمونه ساخته شده که متوسط سه مقاومت فشاری حاصله به عنوان نتیجه استفاده گردید. برای انجام آزمایش تر – خشک نمونه ها در ظرف حاوی آب قرار داده شدند به طوری که نمونه ها کاملاً داخل آب قرار بگیرند این آزمایش در ۱۲ سیکل متوالی انجام شده و در هر سیکل نمونه ها به مدت ۵ ساعت در آب قرار داده شده و سپس ۴۲ ساعت در آون با دمای ^oC ۷۱ (طبق استاندارد ASTM D 559) قرار داده شده اند و در پایان هر سیکل جرم نمونه برای تعیین جرم از دست داده اندازه گیری شده، سپس در پایان ۱۲ سیکل مقاومت فشاری نمونه هایی که دوام آورده اند، اندازه گیری شده است.

نتایج و بحث

آزمایش تر – خشک

دوام نمونه ها در برابر سیکل‌های تر – خشک

این آزمایش برای بررسی دوام نمونه ها در برابر دوره‌های تر – خشک بر روی نمونه‌های تثبیت شده با لیانت‌های آهک، سیمان و آهک – سیمان انجام گرفته است. نتایج آزمایش در رابطه با دوام نمونه ها در برابر سیکل‌های تر – خشک در شکل ۳ نشان داده شده است.

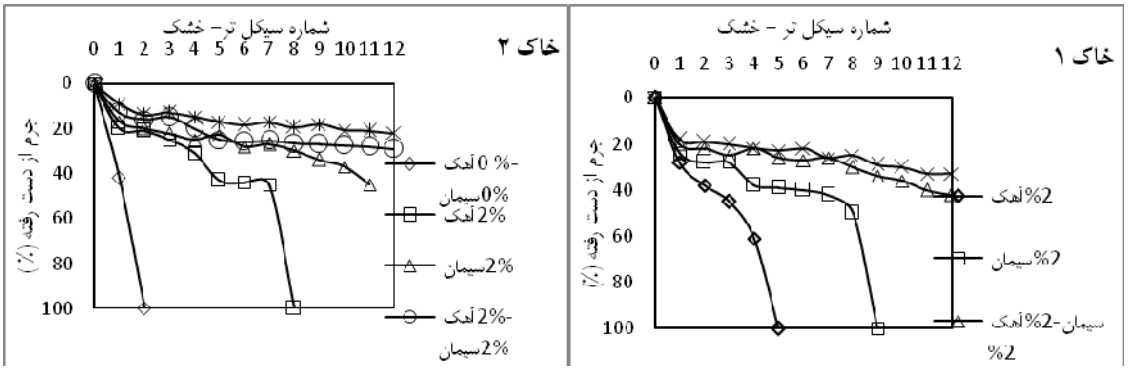


شکل ۳- دوام نمونه‌های تثبیت نشده و تثبیت شده با آهک، سیمان، آهک-سیمان خاک ۱ و خاک ۲ در برابر سیکل تر – خشک

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود از نمونه‌های تثبیت نشده تنها نمونه خاک ۲ دو سیکل تر – خشک را تحمل کرده است و نمونه خاک ۱ در برابر هیچ یک از سیکل‌های تر – خشک دوام نیاورده است که علت این تفاوت ساختار اصلی خاک ها می‌باشد که با هم متفاوت است. نمونه‌های تثبیت شده با آهک٪۲ دو نوع خاک نیز هیچکدام ۱۲ سیکل کامل تر – خشک را تحمل نکرده و با توجه به شاخص خمیری و نوع خاک، نمونه خاک ۱ با تحمل ۵ دوره سیکل تر – خشک و نمونه خاک ۲ با تحمل ۸ دوره سیکل تر – خشک از دوره کامل تر و خشک شدن، فروریزش کرده اند، که این نتایج با نتایج هریچانه (۱۳) که خاک بدون افزودن لیانت، ۱۲ سیکل تر – خشک را به طور کامل تحمل نمی کند و تنها ۳ سیکل تر –خشک راتحمل کرده، مطابقت دارد. تر – خشک شدن با تاثیر از ساختار اصلی نمونه و تغییر ساختار نمونه ها سبب کاهش تحمل نمونه ها در برابر سیکل تر – خشک شدن می‌گردد. در مورد نمونه‌های تثبیت شده با سیمان٪۲ نیز نتایج شبیه نمونه‌های تثبیت شده با آهک٪۲ بدست آمد نمونه‌های تثبیت شده با سیمان٪۲ هر دو نوع خاک نیز ۱۲ سیکل کامل تر – خشک را طی نکردند و در خاک ۱ با تحمل ۹ دوره و در خاک ۲ با تحمل ۱۱ دوره از ۱۲ سیکل فروریزش کردند. نمونه‌های با ترکیب آهک ٪۲-سیمان ٪۲ و ترکیب آهک۴٪-سیمان ۴٪ هر دو نوع خاک در برابر تمامی سیکل‌های تر – خشک به طور کامل دوام آورده و عملکرد خوبی داشتند. می‌توان گفت از دلایل پایداری در برابر سیکل تر – خشک در نمونه‌های تثبیت شده با آهک-سیمان، ساختار اصلی این نمونه ها است که با ورود آب به شبکه اصلی و تجربه فشار موئینگی در برابر این فشار مقاومت کرده و مانع ریزش دیواره شبکه اصلی شده اند. از سوی دیگر با افزایش درصد آهک عملکرد نمونه ها در برابر سیکل تر – خشک بهتر می‌گردد که با نتایج باهاتاچارجا و همکاران (۶) و پارسونز و میلبورن (۱۸) که آنها نیز با افزایش درصد آهک از ۱ درصد به ۳ و ۴ درصد عملکرد بهتری در برابر دوره‌های تر و خشک را مشاهده کردند، مطابقت دارد. هم چنین هرچه مقدار سیمان افزایش می‌یابد به دلیل ایجاد یکپارچگی و اتصال بزرگتر تحمل پذیری دوره تر – خشک را بیشتر می‌کند. همچنین به دلیل تشکیل پیوندهای شیمیایی ناشی از اضافه کردن سیمان باعث کاهش میل ترکیبی آب با خاک رس شده و مقاومت خاک را در برابر دوره تر – خشک افزایش می‌دهد، که با نتایج حاصل از نور (۱۷) که نشان داد برای لیانت با درصدهای زیر ۶ درصد نمونه ها ۱۲ سیکل تر-خشک را تحمل نمی کنند و رحیمی (۱) که نتیجه گرفت با افزایش سیمان دوام نمونه برای تحمل تعداد بیشتر سیکل تر-خشک افزایش می‌یابد، مطابقت دارد.

جرم از دست رفته در آزمایش تر وخشک

شکل ۴ جرم از دست رفته نمونه‌های تثبیت شده خاک‌های شماره ۱ و ۲ را در هر شماره سیکل تر – خشک نشان می‌دهد. عملکرد نامطلوب در هر دو نمونه خاک دیده می‌شود. همانطور که در شکل دیده می‌شود نمونه‌های تثبیت شده با ترکیب آهک – سیمان در هر دو خاک جرم کمتری از دست داده اند که به جهت مقاومت بیشتری است که این نمونه ها در برابر سیکل تر - خشک از خود نشان داده اند. به عبارت دیگر دلیل رفتار نمونه ها برای از دست دادن جرم واکنش‌های فیزیکی – شیمیایی است که در نمونه‌های تثبیت شده رخ می‌دهد. نتایج بدست آمده در این قسمت با نتایج الکیکی (۴) که با افزایش درصد آهک به ۴٪ و ۶٪ و هریچانه (۱۳) با ترکیب خاک با دو لیانت آهک- پوزالان دریافتند نمونه ها علاوه بر تحمل ۱۲ سیکل تر- خشک جرم کمتری از دست می‌دهند، هم خوانی دارند. در بین نمونه‌های تثبیت شده ، بیشترین میزان از دست دادن جرم در بین نمونه‌های تثبیت شده، در نمونه تثبیت شده با آهک ٪۲ از خاک شماره ۱ اتفاق افتاده و کمترین میزان از دست دادن جرم در نمونه تثبیت شده با آهک ٪۴-سیمان ٪۴ از خاک شماره ۲ اتفاق افتاده است.



شکل ٤- جرم از دست رفته نمونه‌های تثبیت شده خاک ۱ و ۲ پس از انجام آزمایش تر – خشک

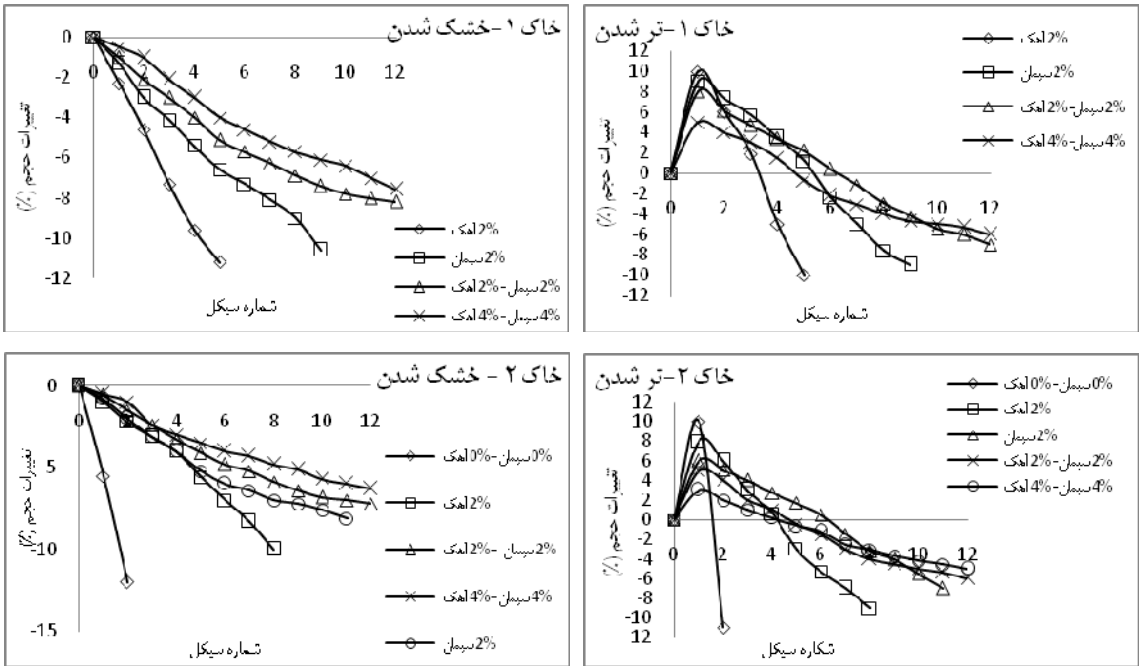
تغییرات حجم نمونه ها

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود نمونه ها در اثر سیکل‌های تر – خشک دچار تغییر حجم شده اند. تغییرات حجم نمونه ها نسبت به نمونه شاهد (حجم نمونه قبل از سیکل تر – خشک) اندازه گیری شده است که در اثر فرایند تر شدن، نمونه ها تا سیکل معینی با توجه به نوع نمونه افزایش حجم داشته و سپس دچار کاهش حجم تقریبا خطی شده اند. در فرایند خشک شدن نیز کاهش حجم تقریبا خطی رخ داده است، که نتایج حاصله با نتایج الکیکی (۴) مطابقت کامل دارد. کاهش حجم صورت گرفته می‌تواند ناشی از سازند نمونه و ایجاد شکاف در نمونه در طول سیکل‌های تر – خشک باشد که به علت تضعیف و سست شدن لایه سطحی خاک رخ می‌دهد.

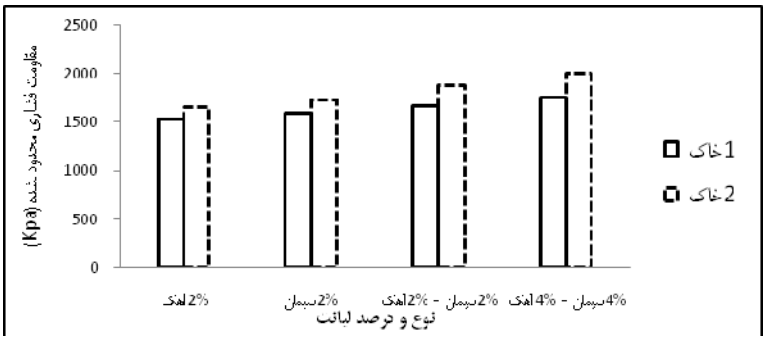
نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

قبل از سیکل تر - خشک

این آزمایش برای نشان دادن میزان واکنش انجام گرفته بین خاک و لیانت‌های هیدرولیکی به عبارت دیگر برای نشان دادن تاثیر لیانت‌های هیدرولیکی بر روی مقاومت فشاری، صورت گرفته است. نتایج این آزمایش برای خاک‌های شماره ۱و ۲ در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل۵- تغییرات حجم نمونه‌های خاک شماره ۱ و ۲ در اثر فرایند تر - خشک شدن



شکل٦- تاثیر لیانت‌های هیدرولیکی بر روی مقاومت فشاری محدود نشده خاک‌های ۱و ۲

در این شکل مشاهده می‌شود که با افزودن لیانت ها مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با لیانتها نسبت به خاک بدون مواد افزودنی اضافه شده است. هم چنین در این شکل مشهود است که کمترین مقاومت فشاری در خاک‌های شماره ۱ و ۲ به ترتیب به مقدار ۱۵۳۰/۶۴ کیلوپاسکال ۱۶۶۰/۰۹ کیلوپاسکال است که مربوط به نمونه‌های تثبیت شده با آهک ٪۲ است و بیشترین مقدار مقاومت فشاری در خاک‌های ۱و ۲ به ترتیب ۱۷۵۵/۳۷ کیلوپاسکال و ۲۰۰۰/۲۶۱ کیلوپاسکال است که مربوط به نمونه‌های تثبیت شده با آهک ٪۴–سیمان ٪۴ است. در واقع تشکیل آلومینات کلسیم هیدراته (CAH) و سیلیکات کلسیم هیدراته (CSH) و هیدروکسید کلسیم ($Ca(OH)_2$) در ضمن واکنش پوزولانی باعث افزایش مقاومت می‌شود. از سوی دیگر در واکنش هیدراتاسیون، اتصال اجزا از طریق واکنش سیلیکات و آلومینات خاک رس با آهک و سیمان باعث افزایش مقاومت می‌شود. هم چنین در نتایج بدست آمده از تحقیقات چاو و همکاران (۸) با افزایش زمان عمل آوری به ۲۸ روز افزودن سیمان ٪۵ مقاومت خاک را از ۸۰ کیلوپاسکال به ۲۸۳کیلوپاسکال افزایش داده است که افزایش ۳/۵ برابری را نشان می‌دهد. افزودن و یومشا و همکاران (۲۳) نیز با افزودن آهک٪۲ بدون عمل آوری نمونه‌ها مشاهده کردند که مقاومت به مقدار ۱/۳ برابر افزایش یافته و به طور مشابه با افزودن سیمان٪۲ بدون عمل آوری نمونه ها نیز مقاومت ۱/۴۶ برابر افزایش داشته است، اما در این تحقیق نمونه ها به مدت ۹۰ روز عمل آوری شده اند که این موضوع باعث افزایش بلند مدت و بیشتر مقاومت نمونه ها شده که دلیل این امر واکنش پوزولانی است. فاروق و همکاران (۱۱) نیز با افزودن آهک ۲٪ و ۴٪ به ترتیب افزایش ۶ و ۷/۳ برابر مقاومت فشاری را مشاهده کردند که این میزان افزایش می‌تواند ناشی از ساختار خاک و واکنش خوب آن با آهک باشد.

بعد از سیکل تر – خشک

این آزمایش برای نشان دادن تاثیر دوره تر – خشک بر مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با لیانت ها صورت گرفته است. جدول ۳ نشان دهنده مقایسه نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده قبل و بعد از ۱۲ سیکل تر – خشک برای این تحقیق می‌باشد.

در جدول ۳ مقایسه بین مقاومت نمونه‌های تثبیت شده قبل و بعد از دوره‌های تر – خشک صورت گرفته است همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود در هر دو نوع خاک نمونه هایی که تنها با لیانت آهک و یا فقط با لیانت سیمان تثبیت شده اند به دلیل شکست این نمونه ها در برابر سیکل تر – خشک مقاومت آن ها به صفر رسیده و به عبارت دیگر ٪۱۰۰ مقاومت خود را به علت تخریب ساختار سیمانی که از تثبیت بدست آورده اند، از دست داده اند. مقاومت نمونه‌های ساخته شده با ترکیب دو لیانت سیمان – آهک در هر دو نمونه خاک به صفر نرسیده بلکه با نسبت‌های مختلف (دامنه تغییرات از ۴۰ درصد تا ۶۰درصد) کاهش یافته است که مقادیر مربوط در جدول بالا آورده شده اند.

جدول ۳- مقادیر مقاومت فشاری محدود نشده قبل و بعد از دوره‌های تر – خشک

نوع لیانت مورد استفاده	مقاومت فشاری محدود نشده (Kpa)			
	خاک ۱ قبل از سیکل تر و خشک	خاک ۱ بعد از سیکل تر و خشک	خاک ۲ قبل از سیکل تر و خشک	خاک ۲ بعد از سیکل تر و خشک
آهک ٪۲	۱۵۳۰/۶۴	۰	۱۶۶۰/۰۹	۰
سیمان ٪۲	۱۵۹۵/۹۷	۰	۱۷۳۴/۰۳	۰
آهک ٪۲– سیمان ٪۲	۱۶۶۵/۱۹	۶۶۶/۰۷	۱۸۸۳/۵۱	۹۶۰/۵۹
آهک ٪۴–سیمان ٪۴	۱۷۵۵/۳۷	۸۶۰/۱۳	۲۰۰۰/۲۶۱	۱۲۰۰/۱۵

از دلایل کاهش مقاومت نمونه ها آن است که پس از تثبیت خاک و عمل آوری واکنش‌های بین خاک و لیانت ها کامل شده و در سیکل‌های تر - خشک این واکنش ها از جمله واکنش پوزولانی صورت گرفته بین اجزا نمونه ها، تخریب می‌گردد و هم چنین از سوی دیگر تخریب ساختار سیمانی تشکیل شده پس از اضافه کردن لیانت ها نیز باعث کاهش مقاومت نمونه ها می‌شود، این نتایج با نتایج الکیکی (۴) که پس از دوره تر – خشک نمونه ساخته شده با مقدار بهینه آهک ۴٪ پس از اتمام ۱۲ سیکل تر –خشک ۴۲٪ از مقاومت خود را از دست داده و نتایج برخی از نمونه‌های هریچانه و همکاران (۱۳) که با آهک ۴٪ یا ترکیب آهک۴٪-پوزولان۱۰٪ ساخته شده اند با عمل آوری ۲۸ روزه، پس از به ترتیب پس از ۱۱ و ۱۲ سیکل تر-خشک کاهش ۱۰۰٪ و ۵۰٪ مقاومت را داشته اند، مطابقت دارد.

نتیجه گیری

در این تحقیق مطالعه خصوصیات ژئوتکنیکی خاک تثبیت شده با سیمان و آهک با درصدهای (۶-۲) درصد وزنی خاک، از جمله مقاومت فشاری (قبل و بعد سیکل تر –خشک) و دوام، جرم، حجم خاک (پس از سیکل تر – خشک) با انجام آزمایشات مربوطه طبق استاندارد ASTM صورت گرفته است.

در آزمایش صورت گرفته نمونه‌های خاک ۱ در مقایسه با خاک ۲ در برابر تر - خشک شدن‌های متوالی عملکرد ضعیف تری داشتند، که این موضوع می‌تواند ناشی از آن باشد که خاک ۲ شاخص خمیری(PI) بیشتری در مقایسه با خاک ۱ دارد.

در هر دو نوع نمونه خاک مورد آزمایش، در میان لیانت‌های استفاده شده به لحاظ مقاومت، میزان مقاومت فشاری با اضافه کردن سیمان نسبت به اضافه کردن آهک دارای اختلاف قابل توجهی نیست، لذا در ایران از لحاظ اقتصادی استفاده از آهک مقرون به صرفه تر است. اما اضافه کردن سیمان به دلیل چسبندگی، یکپارچگی و کاهش میل ترکیبی با آب نسبت به آهک، برای مقابله با سیکل تر – خشک نتایج تقریبا بهتری دارد. از سوی دیگر نمونه تثبیت شده با ترکیب دو لیانت آهک–سیمان در مقایسه با نمونه‌های تثبیت شده با آهک و نمونه‌های تثبیت شده با سیمان عملکرد بهتر و مقاومت بیشتری در برابر تر - خشک شدن متوالی دارند که دلیل این امر می‌تواند ناشی از ادامه یافتن واکنش‌های پوزولانی باشد.

بیشترین مقدار مقاومت در بین نمونه‌های تثبیت شده و عمل آوری ۹۰ روزه در نمونه‌های تثبیت شده با ترکیب آهک ۴٪- سیمان ۴٪ مشاهده می‌شود و هم چنین بیشترین مقدار باقی مانده مقاومت پس از سیکل کامل تر و خشک در همین نمونه‌های تثبیت شده با ترکیب آهک – سیمان مشاهده می‌شود.

در خاک شماره ۱ نمونه تثبیت شده با آهک۲٪ –سیمان ۲٪ تنها مقدار ۴۰٪ از مقاومت آن باقی مانده، درحالیکه در خاک شماره ۲ نمونه تثبیت شده با آهک ۲٪- سیمان ۲٪ مقدار ٪ ۵۱ از مقاومت آن باقی مانده و در نمونه تثبیت شده با آهک ۴٪-سیمان ۴٪ از خاک۱ ، ۴۹٪ از مقاومت نمونه باقی مانده، درحالیکه در خاک شماره ۲ ، نمونه تثبیت شده با آهک ۴٪- سیمان ۴٪ مقدار ۶۰٪ از مقاومت آن باقی مانده است.

خاک ۲ نسبت به خاک ۱، به دلیل داشتن مقاومت فشاری بالاتر جرم کمتری را در سیکل‌های تر - خشک از دست داده است. پس از کاهش نسبتا بالای اولیه جرم در سیکل اول تر - خشک، در سیکل‌های بعدی کاهش جرم کمتر شده و تقریبا روند ثابتی دارد.

نمونه‌های تثبیت شده از خاک ۱ نسبت به نمونه‌های تثبیت شده از خاک ۲ تغییرات حجم بیشتری داشته اند، که این مسئله ناشی از ضعیف تر و سست تر بودن لایه سطحی نمونه‌های تثبیت شده از خاک ۱ می‌باشد. با توجه به اینکه درصدهای انتخابی در این تحقیق به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشند و از طرفی به لحاظ نتایج فنی که حاصل گردیده، پیشنهاد می‌شود به دلیل اینکه در اکثریت پروژه‌های عمرانی خاک ماده اصلی ساخت و ساز است و همچنین در ایران سیکل تر - خشک را در اکثر مناطق اتفاق می‌افتد، جهت جلوگیری از تخریب استفاده از ترکیب لیانت‌های سیمان- آهک حتی با درصد پایین (۴٪) می‌تواند نقش بسزایی داشته باشد.

منابع

۱- رحیمی ح. ۱۳۸۵. مصالح ساختمانی. انتشارات دانشگاه تهران. تهران.

2- Ahmed A. 2009. Evaluation of dring and wetting cycles with soil cushion to mitigate the potential of expansive soil in upper Egypt, 14:2-11.

3- Al-Hamoud A.S., Basma A.A., Hussien M.A.I. and Al- Bashabsheh M.A. 1995. Cycling Swelling Behaviour of Clays. Geotechnical Engineering, 7:562-565.

4- Al-kiki I., Al-talla M. and Al-zubaydi A. 2011. Long term strength and durability of soil stabilized with lime.Eng & Tech, 49:725-735.

5- Alshihabi O., Shahrour I. and Mieussens C. 2002. Experimental Study of the Influence of Drying-Wetting Cycles

on the Resistance of Compacted Soil.Proceedings of the 3th International Conference ,2-6 April .2002. Unsaturated Soils. soc., Arizona, USA.
6- Bhattacharja S. and Bhatty J.I. 2003. Comparative performance of Portland cement and lime stabilization of moderate to high plasticity clay soils. Research report. Portland cement association,RD125.
7- Bin-Shafiqu S., Rahman K., Yaykiran M. and Azfar, I. 2010. The long-term performance of two fly ash stabilized fine-grained soil subbases. Conservation and recycling, 54:666-672.
8- Chew S.H., Kamruzzaman A.H.M. and Lee F.H. 2004. Physicochemical and engineering behavior of cement treated clayey. Geotechnical and Geoenviromental Engineering, 130:696-706.
9- Dempsey B.J., and Thompson M.R .1972. Effects of Freeze-Thaw Parameters on the Durability Of Stabilized Materials. Research report. Highway Research Board. 379, Washington, D.C.
10- Dif A.E. and Bluemel W.F. 1991. Expansive Soils under Cyclic Drying and Wetting. Geotechnical,14:96-102.
11- Farooq S.M., Rouf M.A., Hoque S.M.A. and Ashsd S.M.A. 2011. Effect of lime and curing period on unconfined compressive strength of Gazipur , Bangladesh. Proceeding of 4th Annual Paper Meet and 1st Civil Engineering Congress, 22-24 December.2011. Daka,Bagladesh.
12- Guney Y., Sari D., Cetin M. and Tuncan M. 2007.Impact of cyclic wetting-drying on swelling behaviour of lime-stabilized soil. Building and Environment, 42:681-688.
13- Harichane K., Ghrici M., Khebizi W., Missoum H. 2010. Effect of the combination of lime and natural pozzolana on the durability of clayey soils. Ejge, 15:1194-1209.
14- Kavanaugh P. 1984. Soil stabilization for pavment mobilization construction. Department of the army corps of engineers office of the chife the engineers.New York.
15- Khoury N.N. and Zaman M.M. 2002. Enviromental effects on durability of aggregates stabilized with cementitious materials. Research report. Transportation, 1787:13-21.
16- Mollamahmutoglu M., Yilmaz Y. and Gungor A.G. 2009. Effect of a class C fly ash on the geotechnical properties of an expansive soil. Engineering Research and Development, 1:1-6.
17- Noor J.M.M. 1994. Drability and strength characteristics of cement stabilized modified Melaka series. Islamic academy of scienes, 2:137-141.
18- Parsons R.L., and Milburn J.P. 2003. Engineering behavior of stabilized soils. Transportation reaserch board, vol 1837.
19- PCA. 1992. Soil cement labrotoary handbook. Research report. portland cement association. Skokie, il.
20- Rao S.M., Reddy B.V.V. and Muttharam M. 2001. The impact of cyclic wetting and drying on the swelling behavior of stabilized expansive soils. Engineering geology, 60:223-233.
21- Romero E., Alonso E.E., and Hoffmann C. 2006. Behavior of Bentonite-Sand Mixtures Subjected to Cyclic Drying and Wetting Paths. Proceedings of the 4th International Conference, 2-6 April.2006. Unsaturated Soils. Soc., Arizona, USA.
22- Shihata S.A. and Baghdadi Z.A. 2001. Long-term strength and durability of soil cement. Materials in Civil Engineering, 13:161-165.
23- Umesha T.S., Dinesh S.V. and Sivapulaiah P.V. 2009. Controls of dispersivity of soil using lime and cement. Geology, Issue 1.Vol 3.
24- Wen H. and Ramme B. 2008. A Performance Evaluation of Asphalt Pavement with Recycled Pavement Materials Treated by Self Cementing Fly Ash and Field Verification Using M-E Design Guide: A Case Study.proceeding of ASCE Pavement Conference, Bellevue, WA.
25- Wen H., Martono W ., Edil T.B. and Clyne T.R. 2010. Field evaluation of recycled pavment materials at MnROAD. Reaserch report. Paving materials and pavement analysis. Geoshanghai,264-269.
26- Zhang R., Yang H. and Zheng J. 2006. The Effect of Vertical Pressure on the Deformation and Strength of Expensive Soils during Cyclic Wetting and Drying. Proceedings of the 4th International Conference , 2-6 April .2006. Unsaturated Soils. Soc., Arizona,USA.
27- Zhang Z. and Tao M. 2008.Durability of cement stabilized low plasticity soils.Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 134:203-213.
28- Zhipeng SU. 2012. Durability performance of cementitiously stabilized layers. M.sc thesis. University of wisconson-madison.

Journal of Water and Soil
Vol. 27, No.5, Nov.-Dec. 2013, p. 940-948

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۷، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۲، ص. ۹۴۸-۹۴۰

Effect of Wet-Dry Cycles on the Geotechnical Properties of Stabilized Clayey Soil by Lime and Cement

Z. Mehrmousavi[1] – J. Behmanesh[2*] - B. Mohammadnejad[3]

Received: 15-01-2013
Accepted: 13-10-2013

Abstract

In most civil projects, such as irrigation and drainage networks constructions, soil stabilization has an important role. Achieving maximum durability against wet-dry cycles is one of the soil stabilization objects. Therefore, depend upon project type and its importance; various hydraulic binders with different amounts are tested to obtain desirable results from technical and economical view. In this research, the effect of dry-wet cycles on engineering properties of clayey soils (low plasticity) was studied and lime, cement and lime-cement binders, with (2-6) percent of soil weight, were used. The results showed that with changing type and percent of binders, various sample durability against dry-wet cycles is different so that without binder samples did not have durability and the samples stabilized by 4% cement and 4% lime tolerance 12 wet-dry cycles. The results also showed that after dry-wet cycles, the mass and volume of sample were changed and its unconfined compressive strength was decreased so that the decrease of the unconfined compressive strength was between 40% and 60%. The present study showed that dry-wet cycles significantly cause to change the soil geotechnical properties.

Keywords: Wetting-Dring, Cement, Lime, Unconfined compressive strength, Durability

,2,3- Former MSc Student of Water Structures and Assistant Professors of Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Urmia University, Iran, Respectively
(*-Corresponding Auther Email: j.behmanesh@urmia.ac.ir)