

یادداشت پژوهشی

مقایسه تثبیت کننده های آهک، سیمان و CBR PLUS برای تثبیت خاک رس

حسن طاهرخانی (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
حامد سلامی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی زنجان، زنجان، ایران

E-mail: taherkhani.hasan@znu.ac.ir

پذیرش: ۹۲/۰۶/۰۴

دریافت: ۹۱/۱۰/۲۷

چکیده

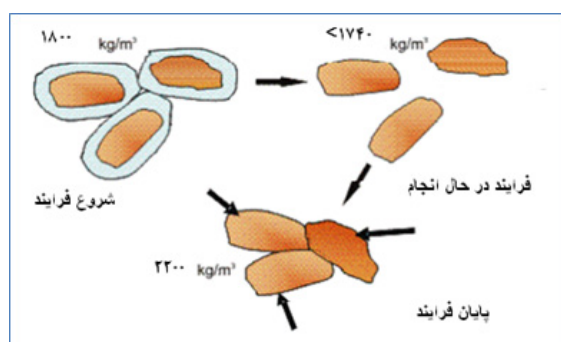
به دلیل کاهش شدید مقاومت و قابلیت تورم در حضور آب، خاک رس یکی از خاکهای مسئله دار در راهسازی است. با این حال، درخیلی از مناطق، خاک رس تشکیل دهنده اصلی خاکهای بسترراه است. یکی از راهکارهای کاهش مشکلات مربوط به خاک رس تثبیت با مواد افزودنی است. از عوامل موثر در انتخاب نوع ماده تثبیت کننده، تاثیر آن بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد نظر در جهت رسیدن به اهداف تثبیت است. این مقاله، نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی، که در آن اثرات دو ماده تثبیت کننده متعارف آهک و سیمان، و یک تثبیت کننده پلیمری به نام CBR PLUS، بر روی یک نوع خاک رس بررسی شده اند را تشریح می کند. درصد های مختلفی از هر یک از مواد تثبیت کننده به خاک مورد نظر اضافه شده و خصوصیات تراکم، حدود اتربرگ، مقاومت فشاری، نسبت باربری کالیفرنیا در حالت خشک و اشباع و نفوذپذیری خاک تثبیت شده مورد ارزیابی قرار گرفته اند. نتایج نشان دهنده این است که CBR PLUS و سیمان دامنه خمیری خاک را از ۱۶ به ۹ کاهش می دهند، ولی آهک آن را تا ۱۳ کاهش می دهد. همچنین، اثر CBR PLUS در کاهش نفوذ پذیری بیش از سیمان و آهک است. بیشترین افزایش مقاومت مربوط به افزودنی سیمان است که مقاومت تک محوری را از ۱/۵۵ به ۵/۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع افزایش می دهد. بالاترین نسبت CBR اشباع به CBR خشک با تثبیت کننده آهک و به مقدار ۰.۴٪ به دست می آید.

واژه های کلیدی: خاک رس، سیمان، آهک، CBR PLUS

۱. مقدمه

خاک رس یکی از خاکهایی است که به وفور در طبیعت یافت می‌شود و در صورت وجود در بستر و لایه های روسازی مشکلاتی را ایجاد می‌کند. وجود رطوبت در کنار خاک رس، مقاومت آن را به شدت کاهش داده و می‌تواند باعث تغییر حجم آن شود که نتیجه تمام اینها ایجاد ناهمواری در سطح روسازی و تحمیل هزینه های نگهداری زیاد است. خاکهای رسی معمولاً ورقه ای و نازک بوده و به همین دلیل دارای مساحت سطح زیادی هستند. به دلیل جایگزینی اتمهای سیلیسیم و آلومینیم به وسیله اتمهایی با ظرفیت کمتر، سطح ذرات کانیهای رسی دارای بار منفی است. وجود این بار منفی باعث جذب یونهای فلزی می‌شود که این یونهای فلزی می‌توانند مقدار زیادی آب را جذب کرده و باعث کاهش مقاومت و افزایش حجم خاک شود [Petry and Little, 2002]. این یونها که جاذبهای آب نیز نامیده می‌شوند قویاً به سطح خاک رس پیوند خورده و به راحتی قابل جدا کردن نیستند. یکی از موادی که برای تثبیت خاکهای رسی استفاده می‌شود، آهک است. اضافه کردن آهک به خاک رس باعث به وجود آمدن واکنشهایی می‌شود که این واکنشها در کوتاه مدت و بلند مدت باعث بهبود ویژگی های خاک می‌شود. برخی از خاکها با آهک واکنش نشان نمی‌دهند که به دلیل فقدان سیلیکاتها و آلومیناتها در خاک است. در این موارد می‌توان از ترکیب آهک با یک ماده پوزولانی مانند خاکستر بادی و یا میکروسیلیس استفاده کرد [Mishra, 2012; Beeghly, 2003;]. اما از مشکلات مربوط به استفاده از آهک، ایمنی، آلودگی و هزینه حمل آن است. ماده دیگری که می‌توان در تثبیت انواع مختلف خاکها از جمله خاک رس استفاده کرد، سیمان است. سیمان دارای مواد پوزولانی بوده و در کنار آب تبدیل به ماده چسباننده ای شده و دانه های خاک را به همدیگر پیوند می‌دهد. با این حال استفاده از سیمان برای تثبیت خاکهای ریزدانه با دامنه خمیری زیاد توصیه نمی‌شود و آهک نتایج بهتری ارائه می‌کند

[Mallick and Alkorchi, 2009]. CBR PLUS محصولی ترکیبی از مشتقات سنتزی بوده که یک لایه حفاظتی روغنی روی سطح دانه های رس تشکیل می‌دهد، جاذبهای آب را از بین برده و خاک رس را آب گریز کرده، حساسیت خاک را به رطوبت کاهش داده و باعث افزایش کارایی و تراکم پذیری می‌شود. نتیجه این تاثیرات افزایش مقاومت و باربری خاک است. این ماده فقط برای تثبیت خاکهایی قابل استفاده است که دارای یک حداقل مقداری از خاک رس باشند. بنابراین تثبیت خاکهای غیرچسبنده زمانی امکان پذیر است که با مقداری خاک رس مخلوط شود [Ziaei Moayed and Allahyari, 2012]. این ماده به همراه مقدار آبی که در حد رطوبت بهینه تراکم خاک باشد مخلوط شده و به خاک اضافه می‌شود. تغییرات ایجاد شده در خاک آبی نبوده و فرآیند رساندن نانوپلیمر CBR PLUS به تمام ذرات خاک رس به زمان معینی نیاز دارد که به آن دوره تکامل می‌گویند و مدت آن از حدود دو تا چهار هفته است. شکل ۱ اثر ماده تثبیت کننده نانوپلیمر CBR PLUS را بر روی خاک نشان می‌دهد که در آن با حذف آبهای جذب شده به دانه های خاک آنها را به هم نزدیک تر کرده و تثبیت می‌کند. واکنش پذیری خاک با این ماده و مقدار ماده مورد نیاز برای تثبیت با ارسال نمونه های خاک به آزمایشگاه پژوهشگاه پلیمر و آنالیز خاک و انجام آزمون واکنش پذیری و آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا تعیین می‌شود. در پروژه های زیادی در سراسر دنیا از این ماده برای ساخت راههای کم هزینه استفاده شده است.



شکل ۱. فرآیند واکنش CBR PLUS بر روی خاک

انتخاب نوع ماده تثبیت کننده متاثر از میزان تاثیر آن بر روی خصوصیات فنی مورد نظر خاک است. با توجه به امکان انتخاب انواع مختلف مواد افزودنی برای تثبیت خاک رس در این تحقیق به بررسی اثر دو نوع ماده تثبیت کننده متعارف شامل سیمان و آهک و یک ماده تثبیت کننده غیرمتعارف به نام نانوپلیمر CBR PLUS بر روی یک نوع خاک رس پرداخته می شود.

۲. پیشینه تحقیقات

عملیات تثبیت خاک عبارتست از: بهبود مشخصات فنی خاک و افزایش مقاومت آن برای قابل استفاده کردن در یک کاربرد معین. این مهم به روشهای گوناگون مانند تثبیت مکانیکی، بیولوژیکی، فیزیکی، شیمیایی و الکتریکی انجام می شود. یکی از اصلی ترین کاربردهای تثبیت خاک در عملیات راهسازی آن است که با اصلاح خاکهای نامرغوب این نوع خاکها را برای استفاده در بستر، اساس و زیراساس مناسب می کنند. یکی از روشهای رایج برای تثبیت خاک استفاده از مواد افزودنی در خاک است. انواع مختلفی از مواد افزودنی برای تثبیت خاک به کار می رود که انتخاب نوع آن به عوامل مختلفی مانند جنس خاک، شرایط جوی، هدف از تثبیت، مسائل زیست محیطی و اقتصادی بستگی دارد. این افزودنیها به دو گروه افزودنیهای متعارف مانند آهک، سیمان و قیر، و گروه غیرمتعارف مانند سیلیکاتها، افزودنیهای معدنی، نمکها، اسیدها، آنزیمها، پلیمرها و صمغها تقسیم بندی می شوند [Tingle, 2004]. از نظر اثرگذاری برخاک تثبیت کننده های متعارف و نامتعارف به دو دسته تقسیم می شوند که یک گروه از آنها با کانیهای خاک واکنش شیمیایی نشان داده و باعث تغییر در ساختار آنها می گردند و گروه دیگر بدون واکنش با ذرات خاک باعث چسبیدن آنها به یکدیگر می شوند. مواد افزودنی مورد استفاده باعث افزایش مقاومت، تغییر در خصوصیات تراکم و حساسیت به رطوبت می شوند. اغلب تحقیقات انجام شده بر روی تثبیت خاکهای

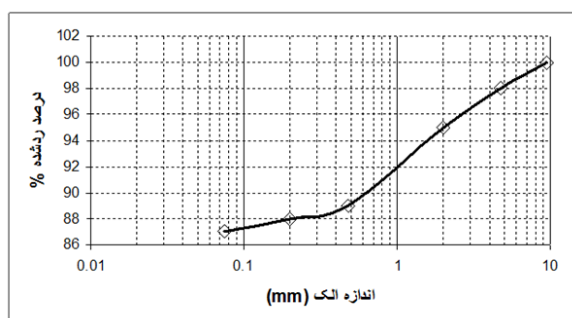
ریزدانه بوده است و خاکهای دانه ای به دلیل مشکلات کمتری که ایجاد می کنند کمتر مورد مطالعه قرار گرفته اند. در ادبیات موضوع، نتایج تحقیقات زیادی را می توان یافت که در آنها اثر تثبیت کننده های متعارف و نامتعارف بر روی انواع مختلف خاکها مورد مطالعه قرار گرفته اند. تحقیقات انجام شده بر روی تثبیت خاک با آهک عموماً نشان می دهند که افزایش ۲ تا ۸٪ آهک باعث کاهش حد روانی، شاخص خمیری، حداکثر وزن مخصوص خشک و تورم شده و رطوبت بهیه تراکم خاک و مقاومت را افزایش می دهد [Croft et al., 1999]. بل [Bell, 1996] اثر آهک را بر روی خصوصیات تراکمی و مقاومتی سه نوع کانی رسی شامل کائولینیت، مونت موریلونیت و کوآرتز بررسی کرد. نتایج او نشان دهنده اثر آهک در کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک خاک و افزایش رطوبت بهینه، نسبت باربری کالیفرنیا و مدول الاستیسیته هر سه نوع خاک رس است. همچنین بهبود مقاومت به مقدار زیاد، متاثر از زمان و دمای عمل آوری است. برای بعضی از خاکها ترکیب آهک و یک یا چند ماده دیگر اثر بهتری می تواند داشته باشد. آمو و همکارانش (۲۰۰۵)، از ترکیب پودر پوست تخم مرغ و آهک برای تثبیت یک نوع خاک رس استفاده کرده و اثر آن را بر روی خصوصیات خاک بررسی کرده و ترکیبی بهینه از پودر پوست تخم مرغ و آهک را به دست آوردند [Amo et al., 2005]. ترکیب خاکستر بادی و آهک نیز برای تثبیت خاکهایی با رس کمتر و بافت درشت تر اثر مناسبی را خواهد داشت [Beeghly, 2003]. سیمان عموماً به عنوان چسباننده برای چسباندن شن و ماسه و ساختن بتن و تثبیت مصالح سنگدانه ای استفاده می شود. در خاکهای ریز دانه رسی یک واکنش پوزولانی بین هیدروکسید کلسیم آزاد شده از سیمان و آلومینات و سیلیکاتهای خاک رس رخ داده که باعث کاهش حد روانی، دامنه خمیری و تورم شده و مقاومت را افزایش می دهد. در تحقیقی دیگر، آمو و همکارانش از سیمان و خاکستر بادی برای تثبیت یک خاک رس متورم شونده استفاده کردند و خصوصیات تراکمی و

پلیمرها از مقاومت نمونه های تثبیت شده با سیمان بیشتر است. همچنین این مطالعات نشان داد که علیرغم تفاوت پلیمرها از نظر ترکیب شیمیایی تفاوت قابل ملاحظه ای در مقاومت ها ملاحظه نشد. همچنین اثر زمان عمل آوری بیشتر از اثر نوع پلیمر بر مقاومت خاک تثبیت شده است.

۳. مواد و مصالح

۳-۱ خاک

خاک رس مورد استفاده در این تحقیق از منطقه ای در اطراف روستای گویچه قلعه در شهر تکاب در استان آذربایجان غربی تهیه شد. ابتدا دانه بندی خاک تهیه شده انجام شده و سپس حد روانی و حد خمیری خاک اندازه گیری شد. شکل ۲ دانه بندی خاک مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد. بیش از ۸۷٪ دانه های خاک ریزتر از ۰/۷۵ میلی متر بوده، حدود ۱۱٪ آن از ماسه و ۲٪ نیز از شن تشکیل یافته است. حد روانی و حد خمیری خاک نیز به ترتیب، ۳۵٪ و ۱۹٪ تعیین شدند که بر این اساس دامنه خمیری خاک ۱۶ محاسبه می شود. در طبقه بندی یونیفاید، خاک از نوع CL تعیین می شود. آزمایش تراکم بر روی خاک مورد استفاده در این تحقیق مطابق استاندارد ASTM D1557 انجام گرفت و بر اساس آن درصد رطوبت بهینه خاک ۱۷/۰۷۹٪ و حداکثر وزن مخصوص خشک آن نیز ۱/۹۵ گرم بر سانتی متر مکعب تعیین شد.



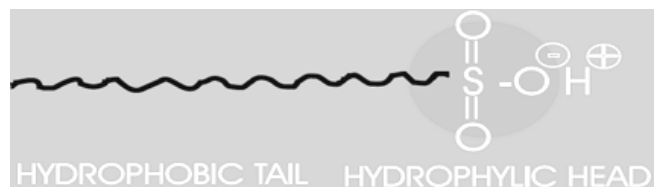
شکل ۲. منحنی دانه بندی خاک مورد استفاده در تحقیق

مقاومتی خاک را بررسی کردند. آنها سه ترکیب مختلف شامل خاک بدون تثبیت کننده، خاک رس با ۱۲٪ سیمان و خاک رس به همراه ۹٪ سیمان و ۳٪ خاکستر بادی را باهم مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد که افزودن ۳٪ خاکستر بادی و ۹٪ سیمان، بالاترین افزایش در مقاومت را خواهد داشت. حاجی علی و همکارانش [Haji Ali et al., 2005] از خاکستر پوسته برنج برای بهبود خصوصیات خاک رس استفاده کردند و نتایج آن با اثرات سیمان و آهک مقایسه شد. نتایج نشان داد که آهک اثر بهتری از خاکستر پوسته برنج دارد، اما استفاده از خاکستر پوسته برنج موثرتر از سیمان است. سنتونی و همکارانش [Santoni et al., 2003, San-] به منظور بررسی تاثیر محدود و وسیعی از تثبیت کننده ها بر روی خصوصیات یک خاک ماسه لای دار از سه تثبیت کننده متعارف شامل آهک، سیمان و قیرامولسیون ۱۳ تثبیت کننده نامتعارف، از قبیل صمغ سولفونیت، آنزیم پلیمر، امولسیونهای نفتی و ترکیبات چسبی درختی استفاده کردند. نتایج نشان داد که همه این مواد دارای اثر مثبت بر روی مقاومت ۲۸ روزه خاک بوده، ولی اثرات آنها متفاوت است. نتایج یک مطالعه دیگر نیز نشان داد که مواد افزودنی مایع با پایه آنزیم باعث بهبود خصوصیات خمیری، مقاومت فشاری، و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک می شوند [Mgangira, 2009]. همچنین پلیمرهای مختلفی مانند پلی وینیل استات، پلی وینیل الکل، پلی وینیل اکریلیک و پلی اکرامیک توسط محققین مختلف برای بهبود خصوصیات خاکهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته اند [Abtahi et al., 2008, Tolleson et al., 2003, Katz et al., 2001]. برای نمونه، تینگل [Tingle, 2004]. آزمایشهای مقاومت فشاری تک محوری را بر روی نمونه های خاک ماسه لای دار تثبیت شده با ۶ نوع پلیمر مختلف که غالباً از نوع اکریلیک و وینیلی بودند و ۳ درصد متفاوت سیمان انجام دادند. نمونه ها در عمرهای مختلف عمل آمده بودند. نتایج آزمایشها نشان دادند که مقاومت نمونه های تثبیت شده با

۲-۳ مواد تثبیت کننده

واحدهای اصلی تشکیل دهنده خاک رس عبارتند از چهار وجهی سیلیکا و هشت وجهی آلومینا که این صفحات می توانند با یکدیگر ترکیب شده و کانی های مختلفی بسازند. نحوه قرارگیری این ورقه ها کانی های رسی مختلفی مانند کائولینیت، مونت موریلونیت و ایلیت را تشکیل می دهند (Cernica, 1995). کانی های رسی دارای بار الکتریکی منفی یا آنیونیک بوده و جاذبه قوی برای کاتیونها دارند. کانی های رسی با بار منفی، در صورت وجود آب، با آن واکنش نشان داده و پیوند قوی بین آنها ایجاد می شود، که دماهای معمولی و فشارهای تراکم نمی توانند آنها را از هم جدا کنند. ذرات رسی مانند مونت موریلونیت شبیه ورقه های کتاب هستند که فضای بین صفحات آنها می تواند آب را جذب کرده و باعث تورم شود. این نوع خاکها موسوم به خاکهای تورم پذیر هستند که مشکلات زیادی در راهسازی و پی سازی ایجاد می کنند. برای از بین بردن این مشکل باید لایه آب جذب شده اطراف ذرات خاک را کاهش داده و دور کرد. با وجود مولکولهای قوی با بار مثبت بارهای منفی کانیهای رسی متعادل می شوند که این همان کاری است که ماده CBR PLUS انجام می دهد. CBR PLUS یک لایه بسیار نازک روغنی را روی سطح ذرات خاک به ویژه رسی ایجاد کرده و باعث تسهیل تراکم شده و امکان خروج آب را که معمولاً پیوند شیمیایی قوی با ذرات خاک دارد از ساختار خاک، فراهم می کند. به این ترتیب می توان خاک را در چگالی بالاتری متراکم کرد که منجر به افزایش اصطکاک داخلی بین ذرات شده و ظرفیت باربری خاک افزایش می یابد. CBR PLUS حرکت و تبادل یونی را کاهش داده و مصالح را آب گریز میکند. نتیجه حذف آب، خاکی است که حساسیت رطوبتی کمتری داشته و کارایی بیشتری دارد.

در این تحقیق از سه تثبیت کننده سیمان، آهک و ماده پلیمری با نام تجاری CBR PLUS استفاده شد. سیمان مورد استفاده از تیپ (I-325) است که از کارخانه سیمان غرب تهیه شد. ترکیب شیمیایی سیمان مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است. آهک مورد استفاده در تحقیق نیز از کارخانه آهک همدان تهیه شد که ترکیبات شیمیایی آن در جدول ۲ نشان داده شده است. تثبیت کننده دیگر محلول پلیمری CBR PLUS بوده است که در پژوهشگاه پلیمر ایران تهیه می شود. این ماده متشکل از ذراتی است که با استفاده از خاصیت نانو اعمال شده به آنها به شدت آب دوست^۲ هستند. شکل ۳ نشان دهنده مولکول CBR PLUS است. این ماده یک اسید سولفونیک ارگانیک است که پایه گیاهی از چغندر قند داشته و به تایید سازمانهای بین المللی فعال در زمینه سلامتی انسان و محیط زیست رسیده است. PH این ماده ۰/۹، نقطه جوش و انجماد آن، به ترتیب، ۱۰۰ و ۱۰- درجه سلسیوس، و چگالی نسبی آن ۰/۹۴ است. این ماده که به صورت مایع غلیظ به رنگ شکلاتی است، دارای مولکولهای پیچیده است که از دو جزء سر و دم تشکیل شده اند که سر آن آب دوست و دم آن آب گریز است. با استفاده از این ماده امکان استفاده از خاکهای نامرغوب محل پروژه فراهم می شود. با توجه به این که این ماده فقط با خاکهای رسی واکنش نشان داده و باعث تغییر در آن می شود برای درک بهتر عملکرد CBR PLUS ضروری است که در ابتدا خصوصیات خاک رس درک شود.

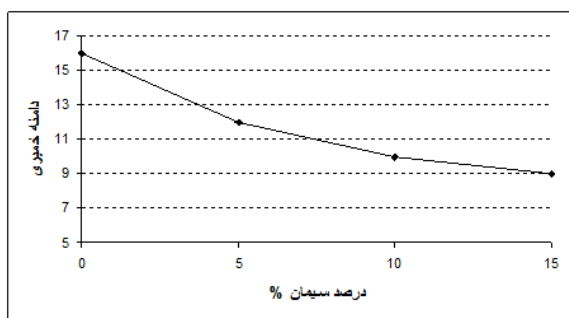


شکل ۳. مولکول نانوپلیمر CBR PLUS

استفاده قرار گرفته است. درصد وزنی آهک و سیمان نسبت به وزن خشک خاک و درصد وزنی CBR PLUS نسبت به وزن آبی است که در آن حل می شود.

۴-۲ آزمایشهای حدوداتربرگ

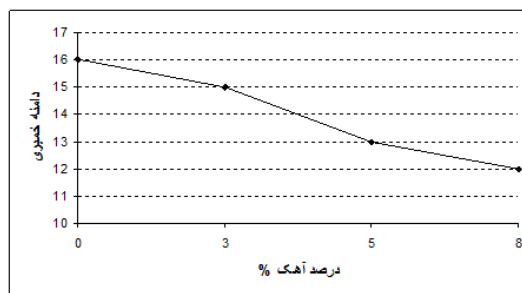
بر روی نمونه های خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف از مواد تثبیت کننده، آزمایشهای تعیین حد روانی و حد خمیری مطابق استاندارد ASTM D4318 انجام شد. با استفاده از نتایج به دست آمده، دامنه خمیری نمونه ها محاسبه شد. شکل های ۵ و ۶ و ۷ به ترتیب تغییرات دامنه خمیری خاک را برحسب مقادیر مختلف مواد افزودنی آهک، سیمان و CBR PLUS نشان می دهند. همان گونه که ملاحظه می شود در محدوده مقادیر استفاده شده اثر ماده CBR PLUS در کاهش دامنه خمیری بیشتر از آهک و تقریباً مشابه سیمان است. همچنین نتایج نشان دهنده این است که نرخ کاهش در مقدار دامنه خمیری برای سیمان بیشتر از آهک است. نتایج نشان داده شده در این شکلها همچنین بیانگر این است که با افزایش بیشتر آهک و سیمان، دامنه خمیری کاهش بیشتری خواهد داشت اما افزایش CBR PLUS بیش از ۰/۵٪، تغییری را در دامنه خمیری ایجاد نخواهد کرد. دلیلی برای این موضوع مشخص نشده و نیاز به بررسی بیشتر دارد.



شکل ۵. تغییرات دامنه خمیری با درصد سیمان

۴-۳ آزمایشها تراکم

بر روی نمونه های خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف



شکل ۴. تغییرات دامنه خمیری با درصد آهک

۴. کارهای آزمایشگاهی

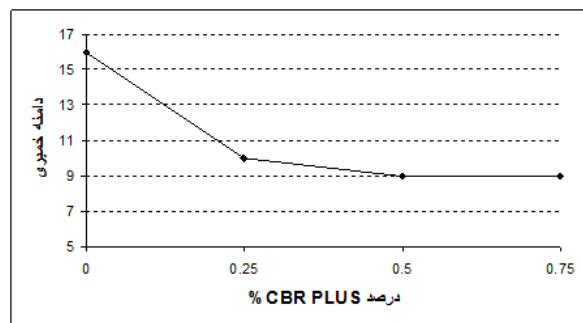
۴-۱ برنامه آزمایشها

همان گونه که در بخش ۳-۱ بیان شد خاک مورد استفاده در این تحقیق از نوع CL در طبقه بندی سیستم یونیفاید است. بر اساس راهنمای مهندسی ارتش آمریکا [US Army, 2003]، از سیمان و آهک می توان در تثبیت این خاک استفاده کرد. همچنین طبق توصیه سازنده محصول CBR PLUS این ماده برای تثبیت خاکهایی که دارای حداقل ۱۵٪ خاک رس باشند قابل استفاده است. بنابراین به منظور بررسی اثر هر کدام از این مواد بر روی خاک مورد نظر از هر کدام از مواد تثبیت کننده در سه درصد وزنی مختلف به خاک اضافه شده و تاثیر آنها بر خصوصیات تراکم، حدود اتبربرگ، مقاومت تک محوری، نسبت باربری کالیفرنیا و نفوذپذیری بررسی شد. بر اساس کردار ارایه شده توسط مهندسی ارتش آمریکا [US Army, 2003] و با استفاده از دامنه خمیری و درصد عبوری از الک شماره ۴۰ خاک مورد آزمایش، درصد آهک مناسب در حدود ۳٪ تعیین شد. بنابراین آهک در سه درصد وزنی ۳، ۵ و ۸٪ برای این تحقیق انتخاب شد. همچنین راهنمای تثبیت خاک در روسازی که توسط مهندسی ارتش آمریکا ارایه شده است درصد سیمان مناسب برای تثبیت خاک CL ۹٪ پیشنهاد شده است. بنابراین سیمان در سه درصد وزنی مختلف ۵ و ۱۰ و ۱۵٪ در این تحقیق استفاده شده است. ماده CBR PLUS نیز بر اساس توصیه کارخانه سازنده نانو پلیمر در سه درصد وزنی مختلف ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ مورد

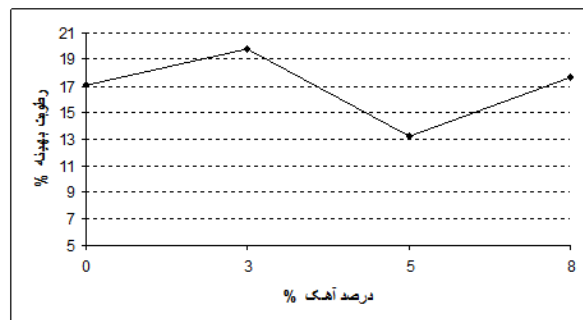
۴-۴ آزمایشهای نسبت باربری کالیفرنیا

آزمایشهای نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، در حالت خشک و اشباع، بر روی نمونه‌های خاک تثبیت شده با مواد افزودنی، مطابق استاندارد AASHTO T193 انجام شدند. آزمایش بر روی نمونه‌هایی انجام گرفت که با درصد رطوبت بهینه در قالب‌های تهیه نمونه آزمایش متراکم شده بودند. شکل‌های ۷، ۸ و ۹ به ترتیب نتایج نسبت باربری کالیفرنیا را برای نمونه‌های تثبیت شده با آهک، سیمان و CBR PLUS، در دو حالت خشک و اشباع، نشان می‌دهند. همان گونه که در شکل ۷ و ۹ ملاحظه می‌شود، CBR خشک و اشباع نمونه‌های تثبیت شده با آهک تا ۰/۵٪ وزنی، و نمونه‌های تثبیت شده با CBR PLUS تا ۰/۰۵٪ وزنی افزایش و بعد از آن تقریباً ثابت می‌ماند. اما در نمونه‌های تثبیت شده با سیمان مقدار CBR با افزایش مقدار سیمان افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج ارایه شده در این شکلها نشان می‌دهد که بیشترین مقاومت خشک و اشباع با استفاده از ماده افزودنی سیمان قابل حصول است و آهک کمترین تاثیر را در افزایش مقاومت داشته است. با توجه به اهمیت کاهش مقاومت خاک تثبیت شده در حالت اشباع نسبت به حالت خشک، نسبت CBR اشباع به خشک برای ترکیبات مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این شکل خاک رس فاقد ماده تثبیت کننده با CL و خاک تثبیت شده با آهک با حرف L، خاک تثبیت شده با سیمان با حرف C، و خاک تثبیت شده با CBR PLUS با حرف P نشان داده شده و درصد هر کدام از این مواد در هر ترکیب قبل از حروف مذکور ارایه شده اند. همان گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود نمونه‌های تثبیت شده با آهک کمترین کاهش را در مقاومت در حالت اشباع نسبت به حالت خشک دارند و کمترین مقدار مربوط به نمونه‌های تثبیت شده با CBR PLUS است.

آهک، سیمان و CBR PLUS، آزمایشهای تراکم مطابق استاندارد ASTM D1557 انجام شده و مقادیر رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک آزمایشگاهی در هر حالت تعیین شد تا برای ساختن نمونه‌ها برای ادامه آزمایشها مورد استفاده قرار گیرند. نتایج این آزمایشها در جدول ۳ نشان داده شده است که در آن درصد رطوبت بهینه تراکم و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک ارایه شده اند. همان گونه که در این جدول ملاحظه می‌شود مطابق یافته‌های سایر محققان نتایج این تحقیق نیز نشان می‌دهد که با افزایش مقدار آهک و سیمان، مقدار رطوبت بهینه افزایش و حداکثر وزن مخصوص خشک کاهش می‌یابد. در حالت تثبیت با CBR PLUS اگرچه مقدار رطوبت بهینه تراکم با افزایش مقدار ماده افزودنی افزایش می‌یابد اما حداکثر وزن مخصوص خشک، تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند.

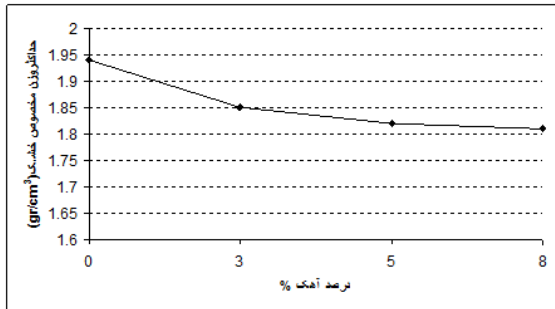


شکل ۶. تغییرات دامنه خمیری خاک با درصد ماده CBR PLUS

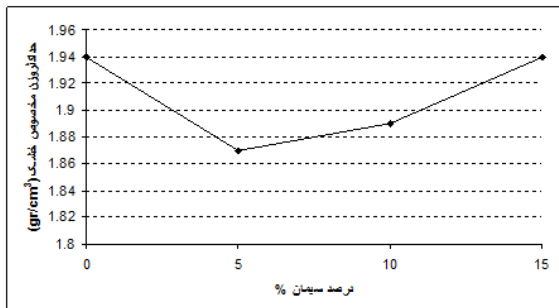


شکل ۷. تغییرات درصد رطوبت بهینه با درصد وزنی آهک

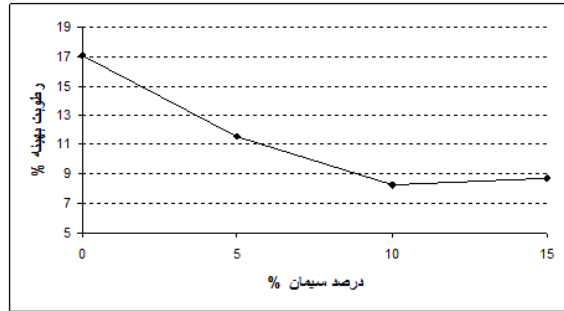
همان گونه که ملاحظه می شود همه افزودنیها باعث افزایش مقاومت تک محوری می شوند، اما تاثیر سیمان در افزودن مقاومت بیش از سایر افزودنیهاست و آهک کمترین تاثیر را در افزایش مقاومت نشان می دهد. تاثیر کمتر آهک بر روی افزایش مقاومت این خاک به ترکیبات شیمیایی خاک مورد استفاده ارتباط داده می شود. اگرچه ترکیبات شیمیایی خاک در این تحقیق مورد بررسی قرار نگرفته اند اما آهک با خاکهایی که به اندازه کافی دارای کانیهای سیلیکات و آلومینات نباشد، به خوبی واکنش نشان نداده و مواد چسباننده به خوبی تشکیل نمی شوند. از طرفی نتایج نشان داده شده در این شکلها بیانگر این است که در محدوده مقادیر ماده افزودنی استفاده شده در این تحقیق، افزودن آهک تا حد معینی در افزایش مقاومت موثر است و بعد از آن مقدار، مقاومت خاک تثبیت شده کاهش می یابد.



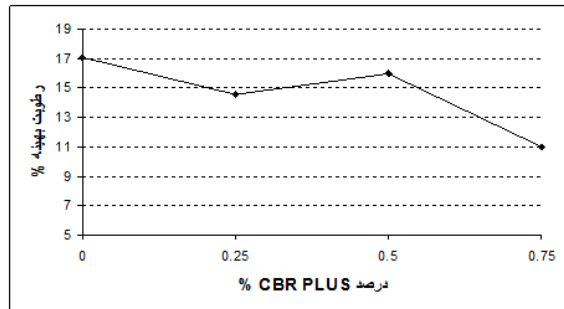
شکل ۱۰. تغییرات حداکثر وزن مخصوص خشک خاک تثبیت شده با درصد وزنی آهک



شکل ۱۱. تغییرات حداکثر وزن مخصوص خشک خاک تثبیت شده با درصد وزنی سیمان



شکل ۸. تغییرات رطوبت بهینه با درصد وزنی سیمان

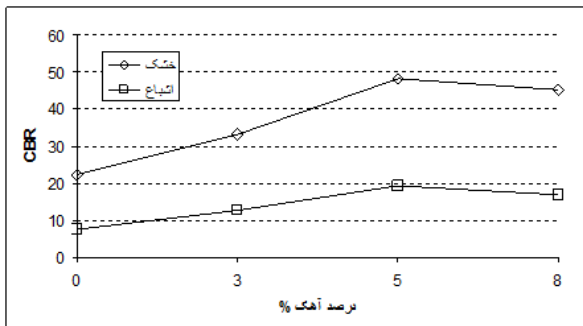


شکل ۹. تغییرات درصد رطوبت بهینه تراکم با درصد وزنی CBR PLUS

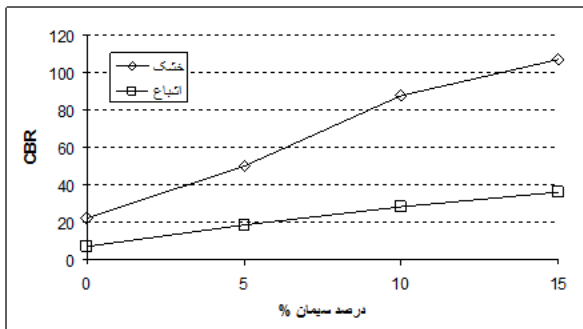
۴-۵ آزمایشهای مقاومت تک محوری

آزمایش مقاومت تک محوری یکی از آزمایشهایی است که به طور گسترده در عملیات تثبیت به عنوان شاخصی برای ارزیابی میزان بهبود خاکهای تثبیت شده بکار می رود. به همین منظور آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه های خاک تثبیت شده با درصدهای وزنی مختلف آهک، سیمان و CBR PLUS انجام گرفت. نمونه های استوانه ای به قطر ۵۰ میلی متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی متر تهیه و به مدت زمان لازم عمل آوری شده و سپس تحت بار با سرعت بارگذاری ۱ mm/min قرار گرفته و تغییرات مقدار بار با کرنش عمودی ثبت شد. با ترسیم تغییرات تنش بر حسب کرنش مقدار حداکثر تنش به عنوان مقاومت تک محوری هر ترکیب در نظر گرفته شده است. شکل های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ به ترتیب تغییرات مقاومت تک محوری خاکهای تثبیت شده را با درصدهای مختلف آهک، سیمان و CBR PLUS نشان می دهند.

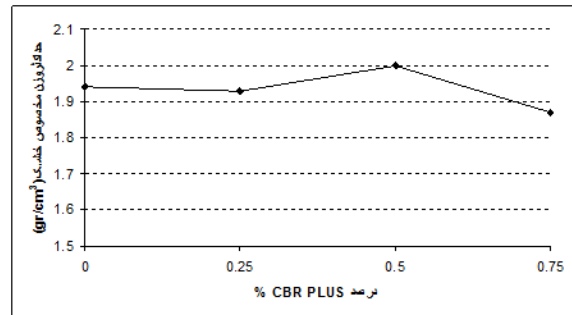
افزایش مقادیر آنها باعث پرشدن فضای خالی توسط آهک یا سیمان اضافی است که منجر به کاهش نفوذپذیری می شود. با این حال، همان گونه که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، مقدار نفوذپذیری خاک تثبیت شده با ماده CBR PLUS، با افزایش ماده افزودنی کاهش می یابد و نفوذ پذیری خاک در مقدار ۰/۷۵٪ از ماده افزودنی تقریباً به صفر رسیده است. دلیل این کاهش مستمر، به نحوه تاثیر این ماده بر روی خاک ارتباط داده می شود که ورقه های رسی را بر روی هم گذاشته و فضای خالی بین آنها را کاهش می دهد. تحقیقات متعددی بر روی نفوذپذیری خاکهای تثبیت شده انجام گرفته است. این تحقیقات نشان دهنده این است که میزان تغییر در نفوذپذیری به نوع خاک، نوع ماده تثبیت کننده و مقدار آن، و زمان عمل آوری خاک تثبیت شده دارد. یافته های قبلی نیز نشان دادند که افزودن آهک و سیمان و خاکستر بادی باعث افزایش نفوذپذیری خاکهای ریزدانه می شود. همچنین مقدار نفوذپذیری با افزایش زمان عمل آوری کاهش می یابد [El-Rawi and Awa, 1981].



شکل ۱۳: تغییرات CBR خشک و اشباع با درصدوزنی آهک



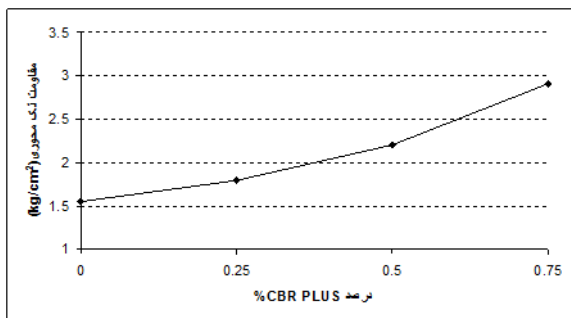
شکل ۱۴: تغییرات CBR خشک و اشباع با درصدوزنی سیمان



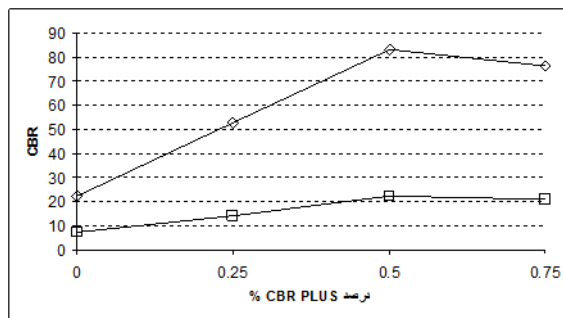
شکل ۱۲. تغییرات حداکثر وزن مخصوص خشک خاک تثبیت شده با درصد وزنی CBR PLUS

۵-۵ آزمایشهای نفوذپذیری

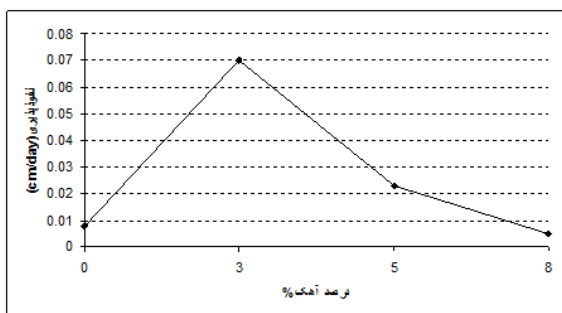
نفوذپذیری خاک تثبیت شده ای که به عنوان بستر، اساس یا زیراساس استفاده می شود، جهت تخلیه آبهای سطحی که از طریق ترکهای رویه وارد ساختار روسازی شده یا به بستر می رسند، اهمیت زیادی دارد. ورود این آبها به بستر و لایه های تثبیت نشده و ماندن در آنها باعث کاهش مقاومت و افزایش خرابیها می شود. نفوذ ناپذیر کردن اساس یا زیراساس مانع از نفوذ آبهای سطحی به بستر و کاهش مقاومت آن می شود که در کاهش خرابیهای ترک خوردگی و شیارشدگی روسازی بسیار موثر است. با این وجود در صورت استفاده از لایه تثبیت شده در روسازی، جهت خارج کردن آبهای نفوذی به روسازی باید از لایه زهکش استفاده کرد. نفوذپذیری نمونه های تثبیت شده با آهک، سیمان و ماده نانو پلیمر مطابق با استاندارد ASTM D2434-87 انجام گرفت. شکل های ۱۴ ، ۱۵ و ۱۶ ، به ترتیب، تغییرات نفوذپذیری خاکهای تثبیت شده با آهک، سیمان و CBR PLUS را با مقدار ماده افزودنی نشان می دهند. خلاصه نتایج نفوذپذیری نیز جهت مقایسه در شکل ۱۷ نشان داده شده اند. همان گونه که در شکل های ۱۴ و ۱۵ ملاحظه می شود، با افزایش مقدار آهک و سیمان، نفوذپذیری خاک تثبیت شده ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. دلیل افزایش اولیه نفوذپذیری تاثیر سیمان و آهک در ایجاد تجمع در ذرات و افزایش فضای خالی است، اما



شکل ۱۹. تغییرات مقاومت تک محوری بادرصدوزنی CBR PLUS



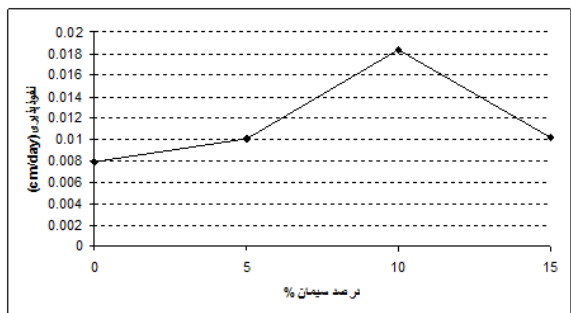
شکل ۱۵. تغییرات CBR خشک و اشباع بادرصدوزنی CBR PLUS



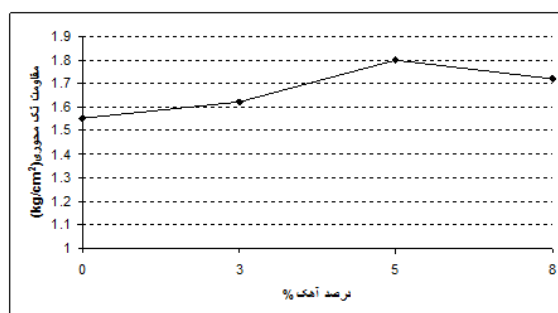
شکل ۲۰. تغییرات نفوذپذیری بادرصدوزنی آهک



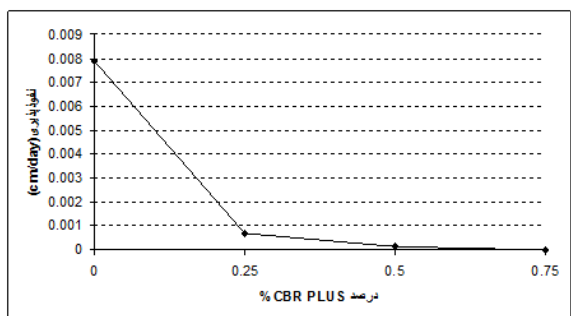
شکل ۱۶. نسبت CBR اشباع به CBR خشک برای ترکیبات مختلف



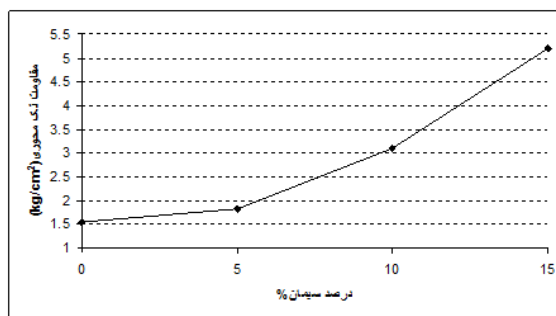
شکل ۲۱. تغییرات نفوذپذیری بادرصدوزنی سیمان



شکل ۱۷. تغییرات مقاومت تک محوری بادرصدوزنی آهک



شکل ۲۲. تغییرات نفوذپذیری بادرصدوزنی CBR PLUS



شکل ۱۸. تغییرات مقاومت تک محوری بادرصدوزنی سیمان

نفوذپذیری و سپس باعث کاهش آن می شود.

۷. مراجع

- Abtahi, M., Ebadi Ahsan, F., Hejazi, S. M. And Sheikhzadeh, M., (2008), "On the use of textile fibers to achieve mechanical soil stabilization" 4th International Textile, Clothing & Design Conference – Magic World of Textiles, 5-8th October, Dubrovnik, Croatia.

- Amo, O. O., Fajobi, A. B., and Oke, B. O. (2005) "Effect of Eggshell Powder on the Stabilizing Potential of Lime on an Expansive Clay Soil" Journal of Applied Sciences, 5 (8), pp. 1474-1478.

- Amo, O. O., Fajobi, A. A., and Fekhuai, A. (2005) "Stabilizing Potential of Cement and Fly Ash Mixture on Expansive Clay Soil" Journal of Applied Science, 5 (9), pp. 1669-1673.

- Beeghly, J. H. (2003) "Recent experiences with lime-fly ash stabilization of pavement subgrade soils, base and recycled asphalt" Proceedings of the International Ash Utilization Symposium, University of Kentucky, Lexington, USA, Oct. 20-22.

- Beeghly, J. H. (2003) "Recent Experiences with Lime-Fly Ash Stabilization of Pavement Subgrade Soils, Base, and Recycled Asphalt" Proceedings of the International Ash Utilization Symposium, University of Kentucky, Lexington, US.

- Bell, F. G. (1996) "Lime Stabilization of Clay Minerals" Engineering Geology, 42 (4), pp. 223-237.

-Cernica, J. N. (1995) "Geotechnical Engineering Soil Mechanics" John Wiley Inc., New York, U.S.

-Croft, C. P., Mcgeory, C. P. D. and Carlson, D. H.



شکل ۲۳. مقدار نفوذپذیری برای ترکیبات مختلف خاک تثبیت شده

۶. نتیجه گیری

آزمایشهای تعیین حدود اتربرگ، تراکم، نسبت باربری کالیفرنیا، مقاومت تک محوری و نفوذپذیری بر روی یک نوع خاک رس تثبیت شده با مقادیر مختلف آهک، سیمان و ماده نانوپلیمر CBR PLUS انجام گرفته است. در محدوده مقادیر بکار رفته از مواد افزودنی و نوع خاک مورد استفاده در این تحقیق، خلاصه نتایج این تحقیق به شرح زیر است:

- سیمان و ماده CBR PLUS کاهش بیشتری را در دامنه خمیری خاک نسبت به آهک، باعث می شود.
- درصد رطوبت بهینه خاک با افزایش آهک، سیمان و CBR PLUS با درجات مختلف افزایش می یابد.
- حداکثر وزن مخصوص خشک خاک تثبیت شده با افزایش آهک و سیمان کاهش و با افزایش ماده افزودنی CBR PLUS ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد.
- هر سه ماده تثبیت کننده باعث افزایش نسبت باربری کالیفرنیا، خاک می شوند. بیشترین تاثیر در افزایش این نسبت مربوط به سیمان و کمترین مربوط به آهک است.
- بیشترین کاهش در CBR اشباع نسبت به خشک مربوط به CBR PLUS و کمترین مربوط به آهک است.
- تمام مواد افزودنی باعث افزایش مقاومت تک محوری خاک می گردند، اما بیشترین تاثیر مربوط به سیمان است.
- ماده افزودنی CBR PLUS باعث کاهش نفوذپذیری می شود، اما افزایش سیمان و آهک ابتدا باعث افزایش

14(6), pp. 447–460.

- Santoni, R. L., Tingle, J. S. and Webster, S. L.

(2003) "Stabilization of silty sand with non-traditional additives" Transportation Research Record, 1787, TRB, National Research Council, Washington D. C., pp. 61-70.

- Santoni, R. L., Tingle J. S. and Nieves, M. (2006) "Accelerated strength improvement of silty sand with non-traditional additives" Transportation Research Board, 1936, pp. 34-42.

- Sharma, N. K., Swain, S. K. and Sahoo, U. C.

(2012) "Stabilization of a clayey soil with fly-ash and lime: a micro level investigation" Journal of Geotechnical and Geological Engineering, June 2012, pp. 1197-1205.

- Tingle, J. S. (2004) "Emulsion polymers for soil stabilization" in Proceedings of the FAA Worldwide Airport Technology Transfer conference, Atlantic city, New jersey, USA.

- Tolleson, R., Shatnswi, M., Harman, E. and Mahdavian, E., (2003) "An Evaluation of Strength Change on Subgrade Soils Stabilized with an Enzyme Catalyst Solution Using CBR and SSG comparisons" Final Report to University Transportation Center Grant R-02-UTC-ULTERPAVB – GEO-01.

- Ziaie Moayed, R. and Allahyari, F. (2012) "Determination of required ion exchange solution for stabilizing clayey soil with various PI" World Academy of Science, Engineering and Technology, 61, pp.1098-1102.

(1999) "Physical Geology" 8th Edn, Mc Graw Hill Companies Inc., New York, pp.48-56.

-El-Rawi, M. N. and Awad, A. A. A. (1981) "Permeability of lime stabilized soils" Transportation Engineering Journal, Vol. 107, No. 1, January/February, pp. 25-35.

-Haji Ali, F., Adnan, A. and Choy, C. K. (1992) "Geotechnical Properties of a Chemically Stabilized Soil from Malaysia with Rice Husk Ash as an Additive" Geotechnical and Geological Engineering, 10, pp. 117-134.

-Katz, L. E., Rauch, A. F., Liljestrang, H. M., Harmon, J. S., Shaw, K. S. and Alberes, H. (2001) "Mechanisms of soil stabilization with a liquid Ionic stabilizer" Transportation Research Record, 1757, TRB, National Research Council, Washington D.C., pp. 50-57.

- Liongso, P. E. (2012) "Field evaluation of stabilization in swelling clay for concrete pavement" International conference on sustainable design and construction, ASCE Texas section, Fall 2012.

- Mgangira, M. B. (2009) "Evaluation of the effect of enzyme base liquid chemical stabilizer on subgrade soils" in the proceedings of the 28th southern African Transport Conference.

- Mishra, E. N. K. (2012) "Strength characteristics of clays subgrade soil stabilization with fly-ash and lime for roadworks" Indian Geotechnical Journal, Sep. 2012, Vol. (4), Issue 7, pp. 206-211.

Petry, T. and Little, D. (2002) "Review of stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavements and Lightly Loaded Structures—History, Practice, and Future." Journal of Materials in Civil Engineering,