

بررسی و مقایسه مقاومت فشاری خاکهای رسی تثبیت شده با سیمان،

آهک و نانوپلیمر CBR PLUS

حسن طاهرخانی^{*۱}

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

taherkhani.hasan@znu.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۸/۱۲]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۱۰/۲۷]

چکیده - یکی از مشکلات راهسازی در بسترهای رسی، مقاومت کم خاکهای رسی است، که منجر به بروز خرابی‌های زودرس می‌شود. مشکل کمبود مقاومت خاک رس را می‌توان با تثبیت برطرف نمود. انتخاب نوع مناسب تثبیت کننده به نوع خاک، هزینه، عوامل محیطی و مقدار مقاومت مورد نیاز بستگی دارد. در این پژوهش، اثر سه نوع تثبیت کننده مختلف بر مقاومت فشاری دو نوع خاک رس بررسی شده است. تثبیت کننده سیمان، آهک و نانو پلیمر CBR PLUS در مقادیر مختلف به دو نوع خاک رس، یکی با دامنه خمیری پایین، و دیگری با دامنه خمیری بالا، افزوده شده و دامنه خمیری، ۲ ساعت بعد از اختلاط، و مقاومت فشاری نمونه‌های عمل آوری شده در شرایط مرطوب و تر، در زمان‌های عمل آوری ۱ و ۷ و ۲۸ روز اندازه‌گیری شده است. نشان داده می‌شود که، در خاک رس با دامنه خمیری پایین، سیمان بیشترین کاهش در دامنه خمیری را داشته و برای خاک رس با دامنه خمیری بالا بیشترین کاهش مربوط به CBR PLUS است. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که برای خاک رس با دامنه خمیری پایین، در شرایط عمل آوری مرطوب و تر، سیمان بهترین نوع تثبیت کننده برای رسیدن به مقاومت های بالا است. همچنین برای خاک رس با دامنه خمیری بالا، نشان داده می‌شود که اثر CBR PLUS، در شرایط عمل آوری مرطوب بیش از سیمان و آهک بوده، و در شرایط عمل آوری تر، اثر سیمان در افزایش مقاومت بیش از دو نوع دیگر است. نتایج همچنین نشان می‌دهند که نسبت مقاومت فشاری مرطوب به تر خاکهای تثبیت شده به نوع خاک، مقدار و نوع ماده افزودنی بستگی دارد، و شرایط عمل آوری تر در خاک با دامنه خمیری بالا کمترین تاثیر را بر مقاومت خاک تثبیت شده با آهک داشته، و در خاک با دامنه خمیری پایین کمترین تاثیر را بر مقاومت خاک تثبیت شده با سیمان دارد. آنالیز اقتصادی نشان می‌دهد که اقتصادی‌ترین ماده برای تثبیت خاک رس با دامنه خمیری پایین سیمان، و برای خاک رس با دامنه خمیری بالا آهک است، و استفاده از CBR PLUS اقتصادی نیست.

کلمات کلیدی: خاک رس، آهک، سیمان، CBR PLUS، مقاومت فشاری

۱- مقدمه

به دو گروه افزودنی‌های متعارف مثل آهک سیمان و قیر و گروه غیرمتعارف مثل سیلیکات‌ها افزودنی‌های معدنی نمک‌ها اسیدها آنزیم‌ها پلیمرها و صمغ‌ها تقسیم‌بندی می‌شوند [۲]. از نظر اثرگذاری بر خاک تثبیت کننده‌های متعارف و نامتعارف به دو دسته تقسیم می‌شوند که یک گروه از آنها با کانی‌های خاک واکنش شیمیایی نشان داده و باعث تغییر در ساختار، و گروه دیگر بدون واکنش با ذرات خاک باعث چسبیدن آنها به همدیگر می‌شوند. مواد افزودنی استفاده شده باعث افزایش مقاومت تغییر در ویژگی‌های تراکم و حساسیت به رطوبت می‌شود. در ادبیات موضوع نتایج پژوهشهای زیادی را می‌توان

یکی از خاک‌های مشکل ساز در راهسازی خاک رس [۱]، و یکی از راه‌های برطرف نمودن مشکلات این نوع خاک تثبیت آنها است. به بهبود مشخصات فنی خاک و افزایش مقاومت آن برای قابل استفاده نمودن در یک کاربرد معین عملیات تثبیت خاک گفته می‌شود. یکی از روش‌های رایج برای تثبیت خاک استفاده از مواد افزودنی در خاک می‌باشد. انواع مختلفی از مواد افزودنی برای تثبیت خاک به کار می‌رود که انتخاب نوع آن به عوامل مختلفی مثل جنس خاک شرایط جوی هدف از تثبیت مسائل زیست محیطی و اقتصادی بستگی دارد. این افزودنی‌ها

یافت که در آنها اثر تثبیت کننده‌های متعارف و نامتعارف روی انواع مختلف خاک‌ها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. پژوهش‌های انجام شده روی تثبیت خاک با آهک عموماً نشان می‌دهند که افزایش ۲ تا ۸٪ آهک باعث کاهش حد روانی شاخص خمیری حداکثر وزن مخصوص خشک و تورم شده و رطوبت بهینه تراکم خاک و مقاومت را افزایش می‌دهد [۳]. بل در^۱ اثر آهک را روی خصوصیات تراکمی و مقاومتی سه نوع کانی رسی شامل کائولینیت مونت موریلونیت و کوارتز بررسی نمود [۴]. نتایج او نشان دهنده اثر آهک در کاهش بیشینه 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 متأثر از زمان و دمای عمل‌آوری است. 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 یا چند ماده پوزولانی مثل خاکستر بادی و یا میکروسیلیس استفاده نمود [۵، ۶، ۷، ۸]. آمو^۲ و همکارانش از ترکیب پودر پوست تخم مرغ و آهک برای تثبیت یک نوع خاک رس استفاده نموده و اثر آن را روی ویژگی‌های خاک بررسی کرده و ترکیبی بهینه از پودر پوسته تخم مرغ و آهک را به دست آوردند [۹]. ترکیب خاکستر بادی و آهک نیز برای تثبیت خاک‌هایی با رس کمتر و بافت درشت‌تر اثر مناسبی را خواهد داشت [۶]. سیمان عموماً به عنوان چسباننده برای چسباندن شن و ماسه و ساختن بتن و تثبیت مصالح سنگدانه‌ای استفاده می‌شود. 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 می‌دهد [۹]. اما از مشکلات مربوط به استفاده از آهک ایمنی آلودگی و هزینه حمل آن است. ماده دیگری که در تثبیت انواع مختلف خاک‌ها، از جمله خاک رس، می‌توان استفاده نمود سیمان است. سیمان دارای مواد پوزولانی بوده و در کنار آب تبدیل به ماده چسباننده‌ای شده و دانه‌های خاک را به همدیگر پیوند می‌دهد. در پژوهشی دیگر آمو^۲ و همکارانش از سیمان و

خاکستر بادی برای تثبیت یک خاک رس متورم شونده استفاده نمودند و ویژگی‌های تراکمی و مقاومتی خاک را بررسی کردند [۱۰]. 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 با هم مقایسه نمودند. نتایج آنها نشان داد که افزودن ۳٪ خاکستر بادی و ۹٪ سیمان بالاترین افزایش در مقاومت را خواهد داشت. با این حال استفاده از سیمان برای تثبیت خاک‌های ریزدانه با دامنه خمیری زیاد توصیه نمی‌شود و آهک نتایج بهتری را ارائه می‌دهد [۱۱]. حاجی علی و همکارانش از خاکستر پوسته برنج برای بهبود ویژگی‌های خاک رس استفاده کردند و نتایج آن با آثار سیمان و آهک مقایسه شد. [۱۲]. نتایج نشان داد که آهک اثر بهتری از خاکستر پوسته برنج داشته اما استفاده از خاکستر پوسته برنج موثرتر از سیمان است. ستونی و همکارانش به منظور بررسی تاثیر محدوده وسیعی از تثبیت کننده‌ها روی ویژگی‌های یک خاک ماسه لای‌دار از ۳ تثبیت کننده متعارف شامل آهک سیمان و قیر امولسیون و ۱۳ تثبیت کننده نامتعارف از قبیل صمغ سولفونیت آنزیم پلیمر امولسیون‌های نفتی و ترکیبات چسبی درختی استفاده نمودند [۱۳ و ۱۴]. نتایج نشان دادند که همه این مواد دارای اثر مثبت روی مقاومت ۲۸ روزه خاک بوده ولی آثار آنها متفاوت است. نتایج یک مطالعه دیگر نیز نشان دادند که مواد افزودنی مایع با پایه آنزیم باعث بهبود ویژگی‌های خمیری مقاومت فشاری و بیشینه وزن مخصوص خشک خاک می‌شوند [۱۵]. همچنین پلیمرهای مختلفی مانند پلی وینیل استات پلی وینیل الکل پلی وینیل اکریلیک و پلی اکرامیک به وسیله پژوهشگران مختلف برای بهبود ویژگی‌های خاک و ویژگی‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۶ و ۱۷]. برای نمونه تینگل^۳ آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری را روی نمونه‌های خاک ماسه لای‌دار تثبیت شده با ۶ نوع پلیمر مختلف که غالباً از نوع اکریلیک و وینیلی بودند و ۳ درصد متفاوت سیمان انجام دادند [۲]. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با پلیمرها از مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با سیمان بیشتر است. همچنین این مطالعات نشان داد که با وجود تفاوت

۲- مصالح

مصالح به کار رفته در این پژوهش شامل دو نوع خاک رس، آهک، سیمان و نانو پلیمر CBR PLUS است. خاک‌های مورد استفاده در این پژوهش از دو منطقه مختلف از استان آذربایجان شرقی تهیه شدند. خاک با دامنه خمیری پایین از منطقه ورزقان و خاک با دامنه خمیری بالا از محل قرصه سد در حال ساخت سهند تهیه شدند. هر دو خاک پس از خشک شدن دانه‌بندی شده و مشخصات حدود اتربرگ و تراکم آنها اندازه‌گیری شد. جدول (۱) حدود اتربرگ و ویژگی‌های تراکمی این خاک‌ها را نشان می‌دهد. دانه‌بندی خاک‌های استفاده شده در (شکل ۱) دیده می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، بیش از ۸۷٪ ذرات خاک‌های مورد مطالعه ریزتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر است. دانه‌بندی بخش ریزتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر انجام نگرفته است.

جدول (۱) مشخصات خاک‌های مصرفی در این پژوهش

Properties	Low plasticity clay	High plasticity clay
Liquid Limit	35	49
Plastic Limit	22	17
Plasticity Index	13	32
Optimum Moisture content %	18.4	21.3
Maximum dry density (gr/cm ³)	1.79	1.62
Soil classification in Unified System	CL	CH

Table 1. Properties of the soils used in this research

شکل (۱) دانه‌بندی خاک‌های استفاده شده در این پژوهش

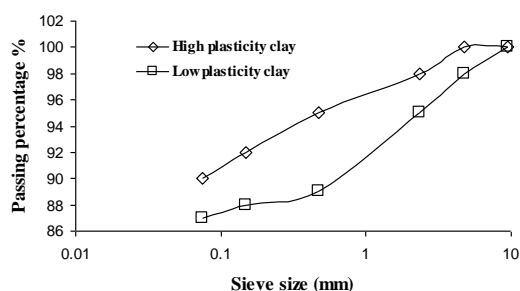


Fig. 1. Gradation of the soils used in this research

پلیمرها از نظر ترکیب شیمیایی تفاوت قابل ملاحظه‌ای در مقاومت‌ها وجود ندارد. همچنین اثر زمان عمل‌آوری بیشتر از اثر نوع پلیمر بر مقاومت خاک تثبیت شده است.

CBR PLUS محصولی ترکیبی از مشتقات سنتزی بوده که یک لایه حفاظتی روغنی روی سطح دانه‌های رس تشکیل داده جاذب‌های آب را از بین برده خاک رس را آب‌گریز کرده حساسیت خاک را به رطوبت کاهش و باعث افزایش کارایی و تراکم پذیری می‌شود. نتیجه تاثیر این 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 غیر چسبنده زمانی امکان پذیراست که با مقداری خاک رس مخلوط شوند [۱۸]. 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 فرایند رساندن نانو پلیمر CBR PLU به تمام ذرات خاک رس به زمان معینی نیاز دارد که به آن دوره تکامل می‌گویند که مدت آن از حدود دو تا چهار هفته است. واکنش پذیری خاک با این ماده و مقدار ماده مورد نیاز برای تثبیت با ارسال نمونه‌های خاک به آزمایشگاه پژوهشگاه پلیمر و آنالیز خاک و انجام تست واکنش‌پذیری و آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا تعیین می‌شود. در پروژه‌های زیادی در سراسر دنیا از این ماده برای ساخت راه‌های کم هزینه استفاده شده است.

انتخاب نوع ماده تثبیت کننده متأثر از میزان تاثیر آن روی ویژگی‌های فنی مورد نظر خاک و هزینه‌های اجرا است. یکی از مهمترین مشخصات فنی خاک بستر روسازی‌ها مقاومت و باربری آن است. با توجه به امکان انتخاب انواع مختلف مواد افزودنی برای تثبیت خاک رس و افزایش مقاومت آن در این پژوهش به بررسی اثر دو نوع ماده تثبیت کننده متعارف شامل سیمان و آهک و یک ماده تثبیت کننده غیر متعارف به نام نانو پلیمر CBR PLUS روی دو نوع خاک رس پرداخته می‌شود. با توجه به جدید بودن معرفی و کاربرد این ماده تثبیت کننده نانو پلیمر، مقایسه آن با مواد تثبیت کننده متعارف ضروری به نظر می‌رسد، که تاکنون بررسی نشده است.

۳- کارهای آزمایشگاهی

۳-۱- برنامه آزمایشها

در این پژوهش، بعد از انجام آزمایشهای اولیه روی هر کدام از خاکها، شامل دانه‌بندی، حدود اتربرگ و تراکم، آزمایشهای حدود اتربرگ، تراکم و مقاومت فشاری در شرایط آوری مرطوب و تر روی خاکهای تثبیت شده با مقادیر مختلف از مواد افزودنی انجام گرفت. بر اساس مقادیر تجربی توصیه شده، برای سیمان و آهک، چهار درصد وزنی مختلف ۱، ۳، ۵ و ۷٪ در این پژوهش، استفاده شد. برای ماده افزودنی نانو پلیمر CBR PLUS بر اساس توصیه کارخانه سازنده، چهار مقدار مختلف ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متر مکعب از نانوپلیمر، به ازای هر ۵۰۰ کیلوگرم خاک، به خاکها افزوده شد. این مقدار از ماده نانو پلیمر به آب مورد نیاز برای تراکم افزوده شد. این مقدار از ماده نانو پلیمر به تناسب به آب بهینه مورد نیاز برای تراکم نمونه افزوده شد. مقادیر استفاده شده در پژوهشها و پروژههای دیگر نیز همین محدوده‌های مقادیر را تایید می‌نماید. طاهرخانی و همکارانش مقادیر ۰/۲۵ تا ۰/۷۵٪ از وزن آب را مورد استفاده قرار دادند. آنها نشان دادند که استفاده از CBR PLUS بیش از ۰/۷۵٪ از وزن آب و اختلاط با خاک تغییری در دامنه خمیری خاک ایجاد نمی‌کند. یا در پروژه دیگری برای تثبیت یک خاک با دامنه خمیری ۱۳ به مساحت یک مترمربع و ضخامت ۱۵ سانتی‌متر از مقدار ۰/۰۰۶ لیتر CBR PLUS استفاده شده است [12].

۳-۲- آزمایشهای حدود اتربرگ

آزمایشهای حدود اتربرگ شامل حد روانی و حد خمیری روی نمونه‌های خاک تثبیت شده با مواد افزودنی در درصدهای مختلف مطابق با استاندارد ASTM D4318-87 انجام گرفت، و با استفاده از آنها دامنه خمیری محاسبه شد. برای تهیه نمونه‌های آزمایش، هر کدام از مواد افزودنی به مقدار مورد نیاز افزوده شده و برای انجام واکنشهای اولیه به مدت ۲ ساعت به حال خود رها شدند و سپس آزمایشهای حدود اتربرگ انجام گرفت.

سیمان استفاده شده این پژوهش از نوع I-325 بوده که از کارخانه سیمان غرب تهیه شد. جدول (۲) ترکیب شیمیایی سیمان استفاده شده را نشان می‌دهد. آهک مورد استفاده در این پژوهش از کارخانه آهک همدان تهیه شد، که ترکیبات شیمیایی آن در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول (۲) ترکیب شیمیایی سیمان تیپ I-325 کارخانه سیمان غرب

Chemical Composition	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO
Content %	63.17	21.9	5.14	3.16	1.51	2.48

Table 2. Chemical composition of cement type I-325

جدول (۳) آنالیز شیمیایی آهک مورد استفاده

Chemical Composition	CaO	L.O.I	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO
Content %	74.92	22.86	0.56	0.12	0.69	0.32

Table 3. Chemical analysis of the lime used in this study

تثبیت کننده CBR PLUS یک محلول پلیمری است که در پژوهشگاه پلیمر ایران تهیه می‌شود. این ماده متشکل از ذراتی است که با استفاده از خاصیت نانو اعمال شده به آنها به شدت آب دوست هستند. این ماده یک اسید سولفونیک ارگانیک است که پایه گیاهی از چغندر قند دارد. 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 بوده که از دو جزء سرودم تشکیل شده‌اند که سر آن آب دوست و دم آن آب گریز است. برای استفاده مقدار کمی از این ماده در مقدار زیادی آب حل شده و با خاک مخلوط می‌شود. این ماده حدود بیست سال در سراسر جهان برای کنترل گرد و خاک و بهبود تراکم استفاده شده است. در ایران نیز از این ماده در چندین پروژه در استانهای تهران خوزستان و آذربایجان غربی استفاده شده است. با استفاده از این ماده امکان استفاده از خاکهای نامرغوب محل پروژه فراهم می‌شود.

۳-۳- آزمایش‌های تراکم

از آنجایی که نمونه‌های استفاده شده برای آزمایش‌های تورم باید در درصد رطوبت بهینه تراکم ساخته می‌شدند، لازم بود که ابتدا آزمایش تراکم روی ترکیب مختلف انجام شود. برای انجام آزمایش تراکم، درصد‌های مختلف مواد افزودنی سیمان و آهک به صورت خشک با خاک مخلوط و سپس رطوبت مورد نیاز به مخلوط افزوده شده و به طور همگن مخلوط شدند. برای انجام آزمایش تراکم روی نمونه‌های تثبیت شده با CBR PLUS با توجه به کم بودن میزان استفاده از ماده افزودنی هر بار ۵۰ کیلوگرم خاک تهیه و مقادیر مورد نظر ۲۰، ۳۰ و ۵۰ و ۶۰CC به تناسب به آب مورد نیاز برای مرطوب کردن آن اضافه شده و سپس به خاک افزوده شد. مخلوط‌های به دست آمده به مدت ۲ ساعت در کیسه پلاستیک نگهداری شده تا واکنش‌های اولیه صورت بگیرد و با استفاده از آنها آزمایش تراکم برای تمامی ترکیبات مطابق استاندارد ASTM D698 انجام گرفت. با انجام آزمایش تراکم، منحنی‌های تغییر وزن مخصوص خشک با درصد رطوبت برای درصد‌های مختلف از مواد تثبیت کننده ترسیم شده و مقدار رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر تعیین شد. شکل (۲)، برای نمونه، منحنی‌های تراکم را برای خاک رس با دامنه خمیری که با مختلف از ماده CBR PLUS تثبیت شده‌اند را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، تغییر چندانی در بیشینه وزن مخصوص خشک خاک ایجاد نمی‌شود ولی درصد رطوبت بهینه مقداری افزایش می‌یابد.

شکل (۲) منحنی‌های تراکم خاک رس تثبیت شده با CBR PLUS

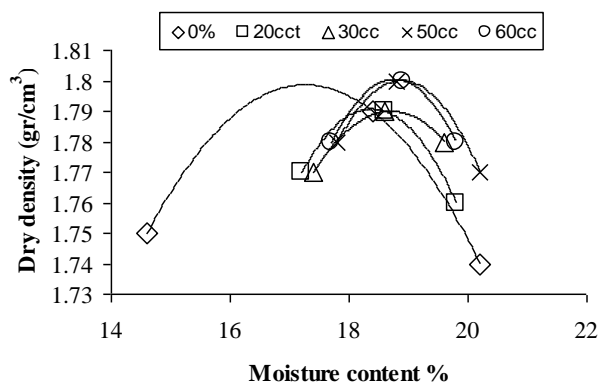


Fig. 2. Compaction curves of the clay stabilized by CBR PLUS

۳-۴- آزمایش مقاومت فشاری

برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر، با تراکم ۹۵٪ پروکتور اصلاح شده ساخته شد و مطابق استاندارد ASTM D2166، به دو صورت مرطوب و تر تحت آزمایش قرار گرفت. در حالت مرطوب، نمونه‌ها درون کیسه پلاستیکی در بسته و در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. برای حالت تر، نمونه‌ها به وسیله‌ی طلق و چند لایه سلفون پیچیده شده و دو سنگ متخلخل در زیر و بالای نمونه قرار داده شده و سپس درون آب قرار گرفتند. در عمل آوری مرطوب، نمونه‌ها در سنین ۱، ۷ و ۲۸ روز آزمایش شدند، و در حالت تر، نمونه‌ها پس از ۴ و ۲۵ روز قرارگیری در آب، به مدت ۳ روز نیز به صورت مرطوب عمل‌آوری، و آزمایش شدند.

شکل (۳) دامنه خمیری خاک رس با خمیری بالا تثبیت شده با درصد‌های مختلف سیمان و آهک

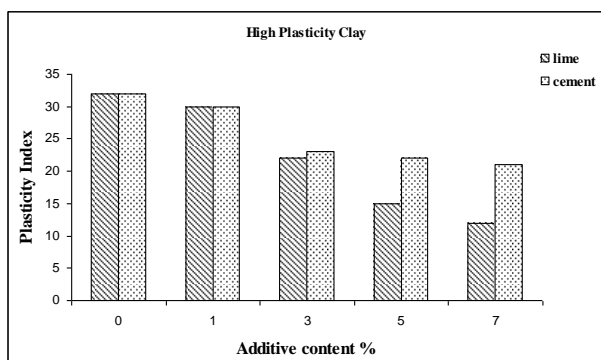


Fig. 3. Plasticity index of the soil with high plasticity and stabilized using different percentages of cement and lime

شکل (۴) دامنه خمیری خاک رس با خمیری کم تثبیت شده با درصد‌های مختلف سیمان و آهک

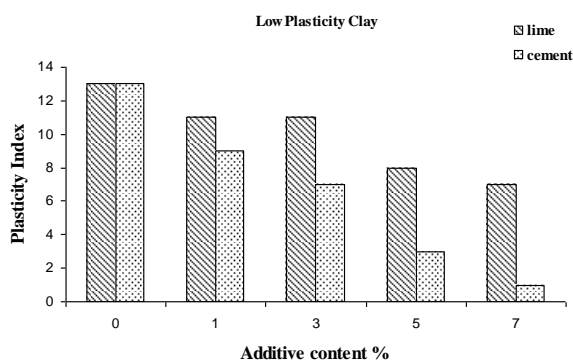


Fig. 4. Plasticity index of the soil with low plasticity and stabilized using different percentages of cement and lime

۴- نتایج آزمایش‌ها

۴-۱ نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ

پایین را با مقدار ماده افزودنی سیمان، آهک و CBR PLUS نشان می‌دهند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقاومت فشاری با افزایش مقدار مواد افزودنی افزایش می‌یابد، اما، نرخ افزایش مقاومت با مقدار ماده افزودنی برای آهک و CBR PLUS تقریباً یکنواخت بوده، و برای سیمان، مقدار افزایش مقاومت از ۵ تا ۷٪ قابل توجه است. همچنین، نتایج نشان دهنده این است که با استفاده از ماده افزودنی سیمان به بالاترین مقاومت ۲۸ روزه می‌توان دست یافت، به گونه‌ای که مقاومت فشاری حدوداً ۶ برابر بزرگتر از نمونه‌های تثبیت شده با آهک و CBR PLUS است. دلیل این موضوع واکنش کم آهک و CBR PLUS با خاک‌های رسی با دامنه خمیری پایین و تاثیر کمتر شرایط عمل‌آوری تر بر افزایش مقاومت با سیمان است. همچنین، نتایج این شکل‌ها نشان می‌دهند که میزان افزایش مقاومت از ۷ تا ۲۸ روز برای سیمان بیش از دو ماده دیگر است.

شکل (۵) دامنه خمیری خاک‌های رس تثبیت شده با درصد‌های مختلف

نانو پلیمر CBR PLUS

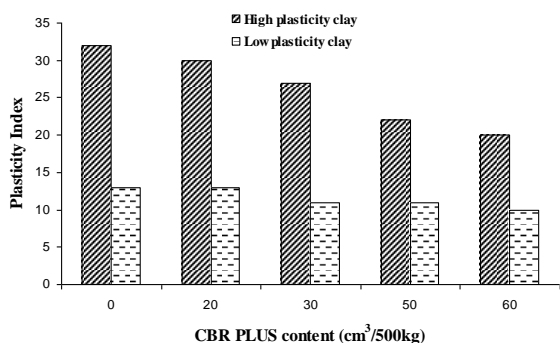


Fig. 5. Plasticity index of the soils stabilized using CBR PLUS

شکل (۶) تغییر مقاومت فشاری تر با درصد سیمان برای خاک رس با

دامنه خمیری پایین

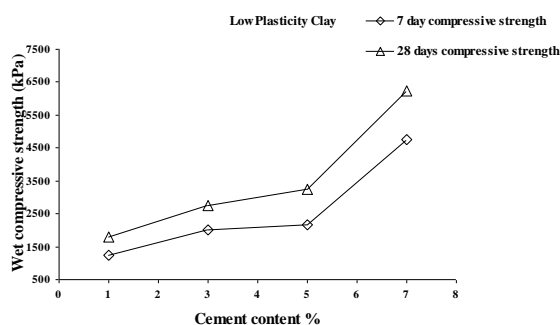


Fig. 6. Variation of the wet compressive strength with cement content for the soil with low plasticity

با اندازه‌گیری حد خمیری و حد روانی خاک‌های تثبیت شده با درصد‌های مختلف از مواد افزودنی، ۲ ساعت بعد از اختلاط، دامنه خمیری آنها محاسبه شد. شکل (۳) دامنه خمیری خاک رس با دامنه خمیری بالا، که با درصد‌های مختلف سیمان و آهک تثبیت شده است، را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، میزان دامنه خمیری با افزایش درصد آهک و سیمان کاهش می‌یابد، که سازگار با نتایج پژوهش‌های دیگر است [19, 1, 10]. اما، تاثیر آهک در کاهش دامنه خمیری خاک رس با دامنه خمیری بالا بیش از سیمان است، به گونه‌ای که، با افزودن ۷٪ آهک، دامنه خمیری خاک از ۳۲ به ۱۲، و برای سیمان به ۲۱ کاهش یافته است. شکل (۴) دامنه خمیری خاک رس با دامنه خمیری پایین، که با درصد‌های مختلف سیمان و آهک تثبیت شده است، را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، افزایش سیمان و آهک دامنه خمیری این خاک را کاهش داده‌اند، و تاثیر سیمان در کاهش دامنه خمیری بیش از آهک است. به گونه‌ای که افزودن ۷٪ سیمان، دامنه خمیری را از ۱۳ به ۱، و افزودن ۷٪ آهک، دامنه خمیری را از ۱۳ به ۷ کاهش داده است. در شکل ۵ دامنه خمیری دو نوع خاک رس که با مقادیر مختلف از ماده نانو پلیمر CBR PLUS اصلاح شده‌اند نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، دامنه خمیری هر دو نوع خاک با افزایش مقدار نانو پلیمر کاهش می‌یابد. اما، تاثیر این ماده در کاهش دامنه خمیری خاک رس با خمیری بالا بیش از آن در کاهش دامنه خمیری خاک رس با خمیری پایین است. اهمیت کاهش دامنه خمیری خاک رس با مواد تثبیت کننده در مواردی است که در هنگام اجرای پروژه‌ها در خاک‌های خمیری مرطوب، که مشکلاتی را در کار ماشین آلات ایجاد می‌نمایند، بخواهیم قابلیت کار کردن در آن ناحیه را به سرعت افزایش دهیم. نتیجه‌گیری این که آهک کارایی بهتری را در این مورد از دو تثبیت کننده دیگر خواهد داشت.

۴-۲ نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری

شکل‌های (۶، ۷ و ۸)، به ترتیب، تغییرات مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روز عمل آمده در شرایط تر خاک رس با دامنه خمیری

PLUS می‌توان دست یافت. از نظر تاثیر سن عمل آوری بر افزایش مقاومت نیز نتایج نشان می‌دهند که تاثیر سن عمل آوری در افزایش مقاومت در خاک تثبیت شده با مواد مختلف تقریباً یکسان است، و مقاومت نمونه‌های ۲۸ روزه حدوداً دو برابر مقاومت نمونه‌های ۱ روزه است.

شکل (۹) تغییر مقاومت فشاری مرطوب با درصد سیمان برای خاک

رس با دامنه خمیری پایین

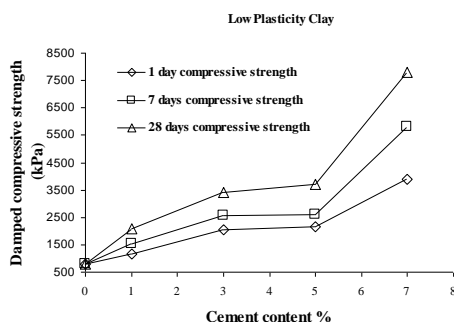


Fig. 9. Variation of the damped compressive strength with cement content for the soil with low plasticity

شکل (۱۰) تغییر مقاومت فشاری مرطوب با درصد آهک برای خاک

رس با دامنه خمیری پایین

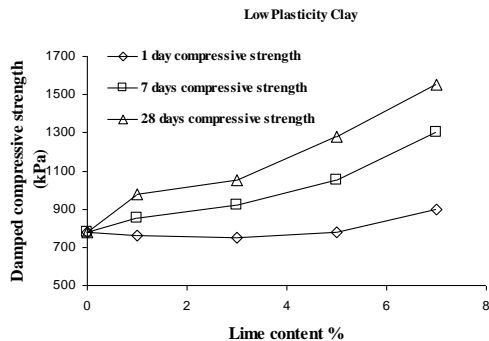


Fig. 10. Variation of the damped compressive strength with lime content for the soil with low plasticity

شکل (۱۱) تغییر مقاومت فشاری مرطوب با مقدار CBR PLUS برای

خاک رس با دامنه خمیری پایین

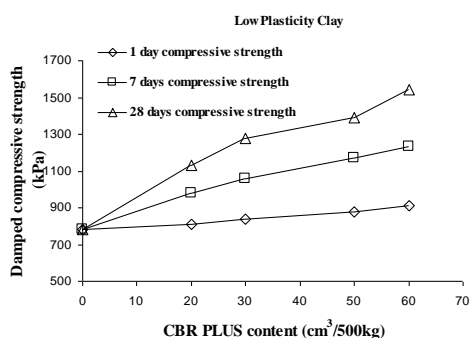


Fig. 11. Variation of the damped compressive strength with CBR PLUS content for the soil with low plasticity

شکل (۷) تغییر مقاومت فشاری تر با درصد آهک برای خاک رس با

دامنه خمیری پایین

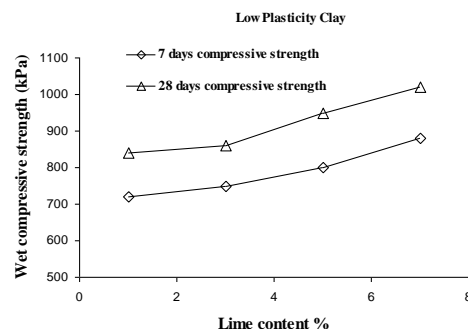


Fig. 7. Variation of the wet compressive strength with lime content for the soil with low plasticity

شکل (۸) تغییر مقاومت فشاری تر با مقدار CBR PLUS برای خاک

رس با دامنه خمیری پایین

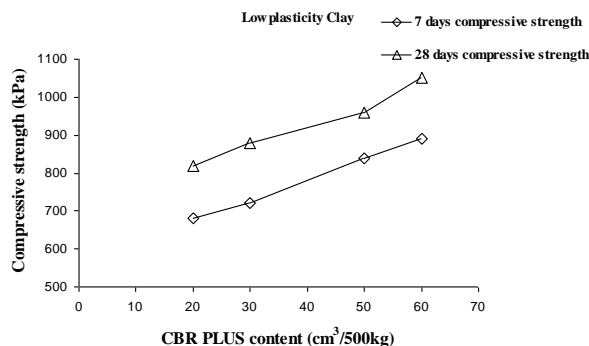


Fig. 8. Variation of the wet compressive strength with CBR PLUS content for the soil with low plasticity

شکل‌های (۹، ۱۰ و ۱۱)، به ترتیب، تغییرات مقاومت فشاری با مقدار مواد افزودنی سیمان، آهک و CBR PLUS را برای نمونه‌های تثبیت شده از خاک رس با دامنه خمیری پایین و عمل آمده به مدت ۱، ۷ و ۲۸ روز در شرایط مرطوب نشان می‌دهند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقاومت فشاری مرطوب با افزایش ماده افزودنی افزایش می‌یابد. مشابه نتایج شرایط عمل‌آوری تر، نرخ افزایش مقاومت با مقدار ماده افزودنی آهک و CBR PLUS تقریباً یکنواخت بوده، ولی با تغییر مقدار سیمان از ۵ به ۷٪، نرخ افزایش مقاومت به مقدار قابل توجهی بیشتر است. مقایسه نتایج شرایط عمل‌آوری مرطوب با تر نشان می‌دهد که، برای تمام مواد افزودنی، شرایط عمل‌آوری مرطوب مقاومت‌های بالاتری را نسبت به تر ارائه می‌دهد، که با نتایج پژوهش‌های گذشته سازگاری دارد [19]. همچنین، این نتایج نشان می‌دهند که با استفاده از ماده افزودنی سیمان به مقاومتی تا ۵ برابر بزرگتر نسبت به آهک و CBR

شکل (۱۴) تغییر مقاومت فشاری تر با درصد سیمان برای خاک رس با دامنه خمیری بالا

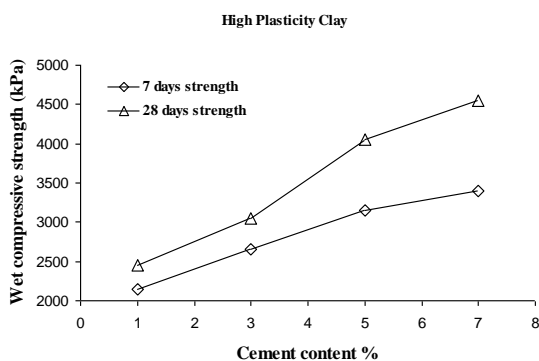


Fig. 14. Variation of the wet compressive strength with cement content for the soil with high plasticity

شکل (۱۵) تغییر مقاومت فشاری تر با درصد آهک برای خاک رس با دامنه خمیری بالا

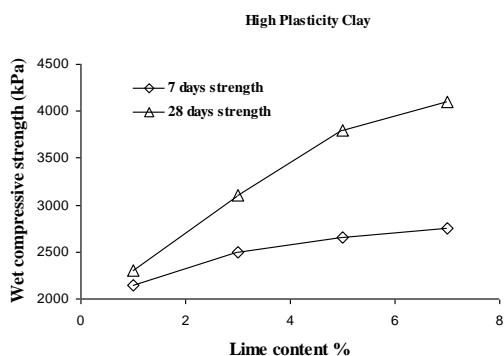


Fig. 15. Variation of the wet compressive strength with lime content for the soil with high plasticity

شکل (۱۶) تغییر مقاومت فشاری تر با مقدار CBR PLUS برای خاک رس با دامنه خمیری بالا

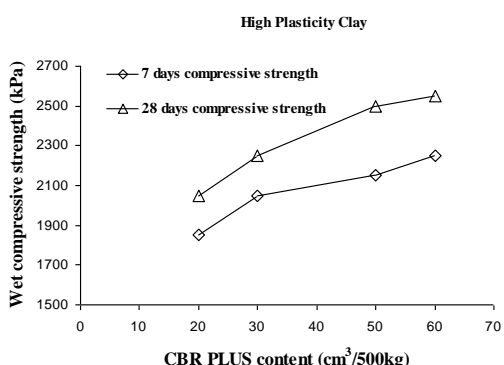


Fig. 16. Variation of the wet compressive strength with CBR PLUS content for the soil with high plasticity

تغییرات مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه خاک رس با دامنه خمیری بالا را با مقدار ماده افزودنی سیمان، آهک و CBR PLUS، که در شرایط تر عمل آمده‌اند را، به ترتیب شکل‌های

شکل (۱۲)، نسبت مقاومت مرطوب به تر خاک رس با دامنه خمیری پایین را برای درصدهای مختلف تثبیت با آهک و سیمان نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، برای آهک، این نسبت با افزایش ماده افزودنی افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که، در ۷٪ ماده افزودنی، مقدار مقاومت خاک تثبیت شده با آهک در حالت مرطوب حدوداً ۵۰٪ بیشتر از آن در حالت تر است. اما، نسبت مقاومت مرطوب به تر برای سیمان، مستقل از مقدار ماده افزودنی بوده، و به طور کلی کمتر از مقدار آن برای آهک است، که نشان دهنده تاثیر پذیری کمتر کسب مقاومت خاک تثبیت شده با سیمان در آب است. شکل (۱۴) نسبت مقاومت مرطوب به تر را برای مقادیر مختلف ماده افزودنی CBR PLUS نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش ماده افزودنی، تاثیر عمل‌آوری تر در کاهش مقاومت بیش از آن در مقادیر کم ماده افزودنی است.

شکل (۱۲) نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط مرطوب به تر برای تثبیت کننده سیمان و آهک

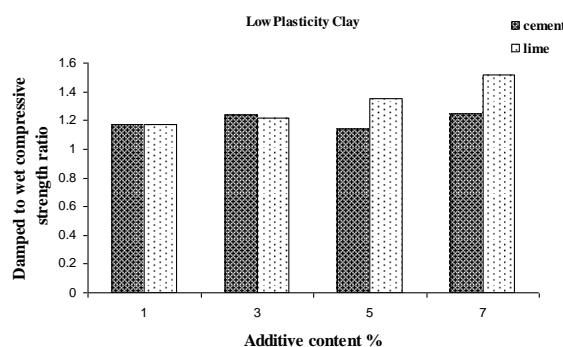


Fig. 12. The ratio of the wet compressive strength to the damped compressive strength for the soil with low plasticity and stabilized by cement and lime

شکل (۱۳) نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط مرطوب به تر برای تثبیت کننده CBR PLUS

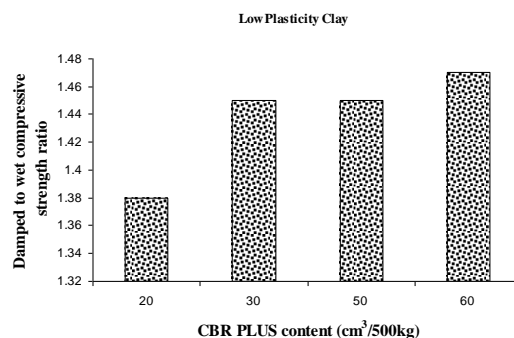


Fig. 13. The ratio of the wet compressive strength to the damped compressive strength for the soil with low plasticity and stabilized by CBR PLUS

شکل (۱۹) تغییر مقاومت فشاری مرطوب با مقدار CBR PLUS برای خاک رس با دامنه خمیری بالا

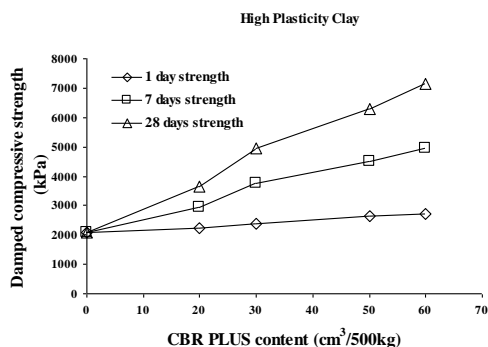


Fig. 19. Variation of the damped compressive strength with CBR PLUS content for the soil with high plasticity

تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ۱، ۷ و ۲۸ روز عمل آمده در شرایط مرطوب خاک رس با دامنه خمیری بالا را با درصد ماده افزودنی سیمان، آهک و CBR PLUS را به ترتیب شکل‌های (۱۷، ۱۸ و ۱۹) نشان می‌دهند. مقایسه نتایج با مقاومت‌ها در شرایط عمل‌آوری تر، نشان می‌دهد که در عمل‌آوری مرطوب با CBR PLUS و آهک به مقاومت‌های بالاتری می‌توان دست یافت، اما، تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین مقاومت نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط مرطوب و تر برای خاک تثبیت شده با سیمان دیده نمی‌شود. (شکل ۲۰) نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط مرطوب به تر را برای خاک تثبیت شده با سیمان و آهک نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، این نسبت برای خاک تثبیت شده با سیمان کمتر از آن برای خاک تثبیت شده با آهک است. همچنین، با افزایش درصد ماده افزودنی سیمان تاثیر عمل‌آوری تر بر مقاومت کاهش می‌یابد، اما، برای آهک، تاثیر عمل‌آوری تر بر مقاومت مستقل از مقدار ماده افزودنی است. شکل (۲۱)، نسبت مقاومت فشاری مرطوب به تر خاک رس با دامنه خمیری بالا که با مقادیر مختلفی از ماده CBR PLUS تثبیت شده است را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، این نسبت با افزایش مقدار ماده افزودنی CBR PLUS افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که، در مقدار ماده افزودنی ۶۰ CC برای هر ۵۰۰ کیلوگرم خاک، مقاومت فشاری در حالت مرطوب ۲۷۵٪ بیش از آن در حالت تر است. این نتایج نشان می‌دهند که در زمان عمل‌آوری خاک تثبیت شده با CBR

(۱۴، ۱۵ و ۱۶)، نشان می‌دهند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مشابه خاک رس با دامنه خمیری پایین، مقاومت فشاری، با افزایش مقدار ماده افزودنی افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که، در شرایط عمل‌آوری تر، افزایش مقاومت خاک تثبیت شده با سیمان بیش از آهک و CBR PLUS است. به گونه‌ای که، مقاومت ۲۸ روزه خاک تثبیت شده با ۷٪ سیمان حدوداً ۱۰٪ بیش از مقاومت خاک تثبیت شده با ۷٪ آهک است. این موضوع خلاف انتظار است، زیرا یافته‌های پژوهش‌های قبلی نشان‌گر این است که آهک ماده مناسبتری برای تثبیت خاک با دامنه خمیری بالاست. اما، در عمل‌آوری تر، واکنش‌های آهک در داخل آب به خوبی انجام نشده و نمی‌تواند افزایش مقاومت قابل توجهی را ایجاد نماید. به طور مشابه، نتایج مقاومت برای خاک تثبیت شده با CBR PLUS نیز نشان می‌دهد که واکنش‌های این ماده در داخل آب در شرایط عمل‌آوری تر به خوبی انجام نشده و مقاومت کسب شده حدوداً ۶۰٪ مقدار آن با آهک است.

شکل (۱۷) تغییر مقاومت فشاری مرطوب با درصد سیمان برای خاک رس با دامنه خمیری بالا

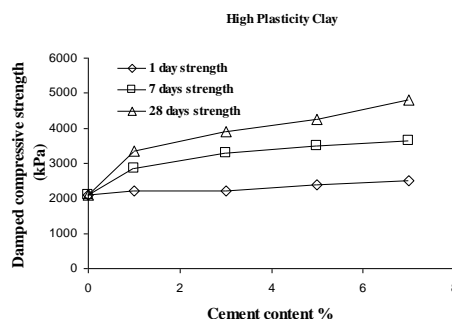


Fig. 17. Variation of the damped compressive strength with cement content for the soil with high plasticity

شکل (۱۸) تغییر مقاومت فشاری مرطوب با درصد آهک برای خاک

رس با دامنه خمیری بالا

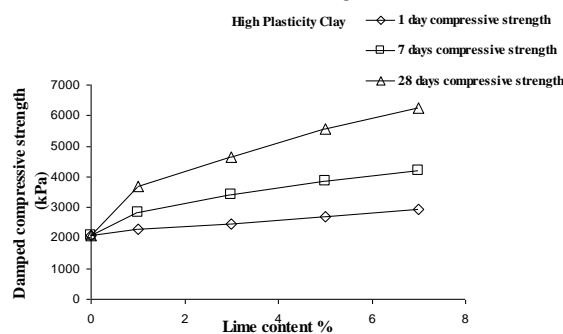


Fig. 18. Variation of the damped compressive strength with lime content for the soil with high plasticity

به منظور انتخاب اقتصادی ترین نوع ماده تثبیت کننده برای رسیدن به مقاومت های فشاری معین، بر اساس نتایج به دست آمده در قسمت های قبل برای مقاومت در شرایط عمل آوری مرطوب، مقدار ماده مورد نیاز برای افزایش مقاومت خاک تثبیت نشده در درصدهای مختلف ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰٪ محاسبه شده، و بر اساس قیمت واحد هر کدام، هزینه ها محاسبه شده است. جدول (۴) مقدار هزینه مواد افزودنی برای درصدهای مختلف افزایش مقاومت خاک رس با دامنه خمیری پایین و بالا را نشان می دهد. همان گونه که ملاحظه می شود، بیشینه افزایش مقاومت خاک رس با دامنه خمیری پایین با استفاده از آهک و CBR PLUS ۱۰۰٪ است، و با استفاده از سیمان می توان به مقاومت های بالاتر دست یافت. در مورد خاک رس با دامنه خمیری بالا، با استفاده از سیمان فقط تا ۱۰۰٪ افزایش مقاومت می توان دست یافت، و دو ماده آهک و CBR PLUS مقاومت خاک را در مقادیر بیشتر افزایش می دهند. از نتایج ارائه شده در این جدول می توان نتیجه گیری نمود که اقتصادی ترین ماده افزودنی برای افزایش مقاومت خاک رس با دامنه خمیری پایین سیمان و برای خاک رس با دامنه خمیری بالا آهک است. همچنین، ملاحظه می شود که هزینه تهیه ماده CBR PLUS بسیار بیشتر از دو ماده دیگر است. اما، باید به مزایای حجم کم و ایمنی اجرای آن و ملاحظات زیست محیطی توجه نمود.

PLUS وجود رطوبت زیاد در کنار آن مانع از افزایش مقاومت خواهد شد.

شکل (۲۰) نسبت مقاومت فشاری نمونه های عمل آوری شده در شرایط مرطوب به تر برای تثبیت کننده سیمان و آهک

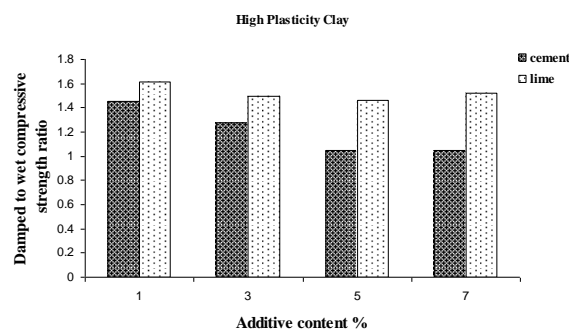


Fig. 20. The ratio of the wet compressive strength to the damped compressive strength for the soil with high plasticity and stabilized by cement and lime

شکل (۲۱) نسبت مقاومت فشاری نمونه های عمل آوری شده در شرایط مرطوب به تر برای تثبیت کننده CBR PLUS

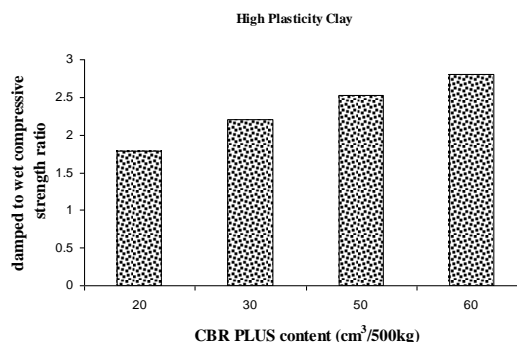


Fig. 21. The ratio of the wet compressive strength to the damped compressive strength for the soil with low plasticity and stabilized by CBR PLUS

۵- آنالیز اقتصادی

جدول (۴) هزینه مواد افزودنی برای افزایش مقاومت هر متر مکعب خاک رس (تومان)

Type soil	Type of stabilizer	Percentage of increase in strength					
		25	50	75	100	150	200
Low plasticity soil	Lime	350	1750	2450	2450	-	-
	Cement	1033	1033	1033	1033	1033	3099
	CBR PLUS	17500	17500	43750	52500	-	-
High plasticity soil	Lime	314	314	314	942	1570	2198
	Cement	926	926	2779	4631	-	-
	CBR PLUS	15750	15750	15750	23500	39250	39250

Table 4. The cost of additives for increasing the strength of a cubic meter of the soils ($\times 10^4$ IR)

۶- نتیجه گیری

• اقتصادی ترین ماده برای تثبیت خاک رس با دامنه خمیری پایین سیمان و برای خاک رس با دامنه خمیری بالا آهک است.

در این پژوهش با افزودن مقادیر مختلفی از سه نوع ماده تثبیت کننده سیمان، آهک و نانو پلیمر CBR PLUS، به دو نوع خاک رس، یکی با دامنه خمیری پایین و دیگری با دامنه خمیری بالا، دامنه خمیری و مقاومت فشاری در شرایط عمل آوری تر و مرطوب تا عمر ۲۸ روز مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این پژوهش را می توان به شرح زیر خلاصه نمود:

- اثر آهک در کاهش دامنه خمیری خاک رس با دامنه خمیری بالا بیش از سیمان و ماده نانو پلیمر CBR PLUS است.
- اثر سیمان در کاهش دامنه خمیری خاک رس با دامنه خمیری پایین بیش از آهک و CBR PLUS است.
- اثر سیمان در افزایش مقاومت فشاری خاک رس با دامنه خمیری پایین بیش از آهک و CBR PLUS است.
- در خاک های با دامنه خمیری پایین، اثر افزایش زمان عمل آوری و مقدار ماده تثبیت کننده در افزایش مقاومت برای سیمان بیش از دو تثبیت کننده دیگر است.
- برای هر دو نوع خاک رس با دامنه خمیری پایین و بالا، مقاومت فشاری خاک تثبیت شده در شرایط عمل آوری مرطوب بیش از عمل آوری تر است. اما، مقدار کاهش مقاومت در شرایط عمل آوری تر نسبت به مرطوب، برای سیمان به مراتب کمتر از دو نوع تثبیت کننده دیگر است. همچنین، در خاک با دامنه خمیری پایین، نسبت مقاومت فشاری مرطوب به تر با افزایش آهک و CBR PLUS افزایش می یابد، ولی با افزایش سیمان تغییر قابل توجهی در این نسبت ملاحظه نمی شود.
- در خاک با دامنه خمیری بالا، نسبت مقاومت مرطوب به تر، با افزایش سیمان کاهش، با افزایش CBR PLUS افزایش و با افزایش آهک تغییر قابل توجهی نمی کند.
- برای خاک رس با دامنه خمیری بالا، کسب مقاومت با ماده CBR PLUS بیش از آهک و سیمان است.
- در خاک رس با دامنه خمیری بالا، در شرایط عمل آوری تر، کمترین مقاومت با CBR PLUS به دست می آید

References

۷- منابع

- [1]. Petry, T. and Little, D. "Review of stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavements and Lightly Loaded Structures—History, Practice, and Future." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(6), (2002), pp. 447-460.
- [2]. Tingle, J. S. (2004) "Emulsion polymers for soil stabilization" in *Proceedings of the FAA Worldwide Airport Technology Transfer conference*, Atlantic city, New jersey, USA.
- [3]. Croft, C. P., Mcgeory, C. P. D., and Carlson, D. H. (1999) "Physical Geology" 8th Edn, Mc Graw Hill Companies Inc., New York, pp.48-56.
- [4]. Bell, F. G. (1996) "Lime Stabilization of Clay Minerals" *Engineering Geology*, 42 (4), pp. 223-237.
- [5]. 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.
- [6]. 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.
- [7]. 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.
- [8]. 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.
- [9]. 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.
- [10]. 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.
- [11]. Cernica, J. N. (1995) "Geotechnical Engineering Soil Mechanics" John Wiley Inc., New York, U.S.
- [12]. 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.
- [13]. 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.

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.

[18]. 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.

[19]. Mahamedi, A. and Khemisaa, M. (2015) "Stabilization of an expansive overconsolidated clay using hydraulic binders" Housing and Building National Research Center, 11, pp. 82-90.

[14]. 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.

[15]. 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.

[16]. 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.

[17]. Tolleson, R., Shatnswi, M., Harman, E. and Mahdavian, E., (2003) "An Evaluation of Strength

Investigation of Compressive Strength of Clay Soils Stabilized by Cement, Lime and CBR PLUS Nano- Polymer

Taherkhani H.^{1*}

1-AssisT. Prof., Civil Eng. Dept., University of Zanjan, Zanjan, Iran

taherkhani.hasan@znu.ac.ir

Abstract:

Clays are among the major problematic soils in construction of transportation infrastructures. Improvement of their mechanical and physical properties has always been a challenge for engineers. Stabilization is known as the most common method for improving these properties. Different types of stabilizers can be used for improving the properties of clay soils; however selecting the appropriate stabilizer is affected by soil type, environmental conditions, costs and required strength. In this research, effects of three different stabilizers on the compressive strength are investigated for two types of clay soils. Cement, lime and CBR PLUS Nano polymer, with different proportions, are added to two types of clay, one with low plasticity index and the other with high plasticity index. The compressive strength of soils is evaluated in both wet and moist curing conditions for different ages of 1, 7 and 28 days. According to the results, for the soil with low plasticity index, cement can effectively reduce the plasticity index; where, for the soil with high plasticity index, CBR PLUS plays the effective role. It is also reported that cement is the best stabilizer for improving the compressive strength of soils with low plasticity index, both in moist and wet curing conditions. Compressive strength of the cement-stabilized soil after 28 days of wet curing is found to be about 6 times higher than that of the lime and CBR PLUS-stabilized soil. Also, for the soil with high plasticity index, CBR PLUS has the highest effect on the compressive strength in moist curing conditions; where in wet curing condition, the effect of cement is higher than lime and CBR PLUS. The difference between the reported compressive strength for the cement-stabilized soil in wet curing condition and that for the soil stabilized with two other stabilizers (lime and CBR PLUS) is much lower than its difference with the strength of low plasticity index soil. For all types of evaluated soils and stabilizers, compressive strength in moist curing condition is higher than that in wet curing condition. The effect of the curing age on the compressive strength is found to be the same for different types of stabilizers. In this regard, compressive strength of the 28-day-cured specimens is approximately twice the 1-day-cured specimens. It is also reported that the ratio of compressive strength in moist curing condition to that in wet curing condition depends on the soil type, amount and type of stabilizer. The compressive strength is less affected by wet curing condition for lime-stabilized high plasticity index clay and by moist curing condition for cement-stabilized low plasticity index clay. For the CBR PLUS-stabilized clay, the amount of stabilizer plays an effective role in reducing the compressive strength of the wet-cured clay. The most economical stabilizer for the soil with low plasticity index is found to be cement, and for the soil with high plasticity index seems to be lime. Cost analysis also shows that CBR PLUS is not an economical solution for clay stabilization.

Keywords: clay, stabilization, cement, CBR PLUS, lime, compressive strength