

بررسی تأثیر میکروسیلیس بر تغییرات مقاومت، حدود اتربرگ و نفوذپذیری در خاک رس تثبیت شده با سیمان

سجاد توکلی^{۱*}، محمدحسین امین فر^۲، احمد هاشم زاده^۳

^۱ استادیار دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ایلام

^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۳ کارشناس ارشد خاک و پی از دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

(دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۵، پذیرش: ۱۴۰۰/۵/۲۶، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۵/۲۶)

چکیده

خاک‌های ریزدانه معمولاً دارای مقاومت و ظرفیت باربری کم و مشکلات تورمی هستند. یکی از راه‌های مقابله با مشکلات این نوع خاک‌ها، تثبیت خاک ریزدانه است. تثبیت خاک شامل فعالیت‌هایی است که در نتیجه آن‌ها مشخصات مهندسی خاک بهبود یافته و به ویژگی‌های مورد نظر نزدیک می‌شود. این اقدامات باعث افزایش مقاومت، کاهش تورم، کاهش نفوذپذیری، افزایش کارایی و اثرات بسیار سودمند دیگر می‌شود. در این خصوص سیمان یکی از تثبیت‌کننده‌های مهم خاک رس می‌باشد. هدف این تحقیق، پژوهش در مورد اثر ماده پوزلانی میکروسیلیس بر مقاومت تک‌محوری و حدود اتربرگ و نفوذپذیری خاک تثبیت شده با سیمان می‌باشد. برای رسیدن به این هدف ۳۸ نمونه با ۱۰ طرح اختلاط مختلف ساخته شده و بر روی آن‌ها آزمایشات آزمایشگاهی از جمله تعیین مقاومت تک‌محوری، حدود اتربرگ و نفوذپذیری انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزودن میکروسیلیس به خاک رس تثبیت شده با سیمان مقاومت تک‌محوری ۷ و ۲۸ روزه خاک را به صورت خطی افزایش می‌دهد. در مورد جایگزینی سیمان با میکروسیلیس نتایج نشان می‌دهد که مقاومت با بیشتر شدن مقدار میکروسیلیس و کاهش سیمان، کاهش می‌یابد به جز در طرح اختلاط مربوط به ۳٪ سیمان با ۲٪ میکروسیلیس که در آن مقاومت افزایش می‌یابد. همچنین، افزودن میکروسیلیس باعث افزایش خطی نشانه خمیری و کاهش نفوذپذیری به صورت خطی می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: خاک رس، تثبیت خاک، سیمان، میکروسیلیس، حدود اتربرگ.

۱- مقدمه

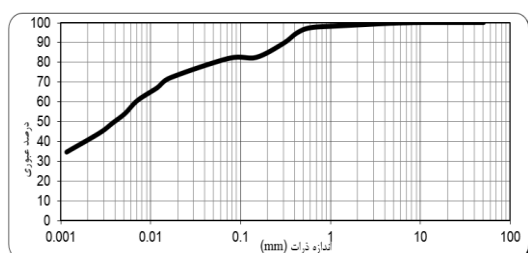
از آنجایی که وجود رس‌های نرم می‌تواند باعث ایجاد تغییر شکل زیاد، مقاومت اندک و قابلیت شدید آبستگي شود، بنابراین وجود این نوع خاک می‌تواند موجب آسیب زدن و یا تخریب یک سازه گردد (Do و همکاران، ۲۰۱۶؛ Cong و همکاران، ۲۰۱۴؛ Ahmed و Issa، ۲۰۱۴). بر این اساس تاکنون روش‌های متنوعی مانند تعویض با مصالح مناسب، انواع روش‌های بهسازی برای مقابله با مشکلات ناشی از وجود این نوع از خاک‌ها ارائه شده است (Lam و همکاران، ۲۰۱۵، Yi و همکاران، ۲۰۱۵) به نحوی که اصلاح شیمیایی با استفاده از مواد افزودنی متداولی مانند آهک و سیمان، جزء راهکارهای رایج برای تثبیت این قبیل از خاک‌ها می‌باشد (Ahmed، ۲۰۱۵؛ Kamei و همکاران، ۲۰۱۳؛ Jafari و همکاران، ۲۰۱۲).

تثبیت خاک، یکی از موضوعات مهم در ارتباط با بهسازی خاک‌های ضعیف در مهندسی ژئوتکنیک است. امروزه به دلیل هزینه‌های بالای و مشکلات فنی و ایمنی در اجرا، استفاده از مواد سازگار با محیط زیست و مناسب به منظور کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی و ایمنی، یکی از نیازهای اساسی می‌باشد. در این راستا استفاده از پوزولان‌ها می‌تواند انتظارات فوق را برآورده سازد. تثبیت خاک با سیمان از متداول‌ترین روش‌های بهسازی خاک است که به عنوان روشی مؤثر جهت بهسازی خاک‌های سست در پروژه‌های عمرانی به خصوص پروژه‌های راه‌سازی و همچنین به عنوان راهکاری مناسب به منظور بهبود خواص فیزیکی و مهندسی خاک و کاهش هزینه‌ها، ارائه می‌شود.

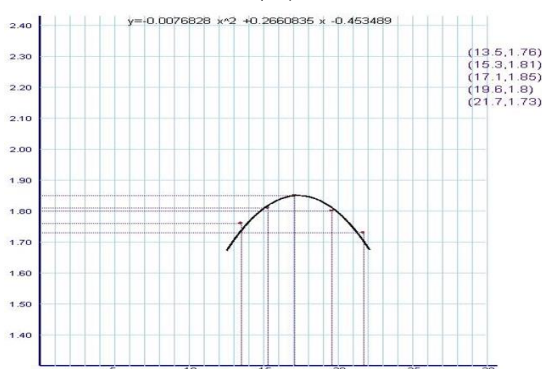
* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۸۳۴۱۰۱۳۱

جدول ۱- مشخصات خاک رسی مورد استفاده

پارامتر	مقدار	استاندارد
رطوبت طبیعی (%)	۴/۳	ASTM D2216
رطوبت بهینه (%)	۱۷/۱	ASTM D698
وزن مخصوص خشک حداکثر (gr/cm ³)	۱/۸۵	ASTM D698
نوع خاک در طبقه بندی متحد	CL	ASTM D2487
چگالی جامد	۲/۶۸	ASTM D854



(الف)



(ب)

شکل ۱- (الف) نمودار دانه بندی خاک رس مورد استفاده،

(ب) نمودار تعیین رطوبت بهینه خاک رس

به طور کلی، فرآیند بهسازی خاک پس از اندرکنش با ماده افزودنی، وابسته به مشخصات تشکیل دهنده اجزاء و شرایط محیطی است (Goodarzi و Salimi، ۲۰۱۵؛ AL-Mukhtar، ۲۰۱۰).

محققان مختلف در مورد خواص تثبیت کننده های شیمیایی مانند سیمان، آهک، ژئولیت^۱، خاکستر بادی^۲ و غیره پژوهش های بسیاری انجام داده اند و دریافتند که افزودن این مواد به خاک باعث افزایش مقاومت و دوام خاک می شود (Bell، ۱۹۹۳؛ Roohbakhshan و همکاران، ۲۰۱۶؛ Sariosseiri و Muhunthan، ۲۰۰۹). هر چند که استفاده از این مواد باعث ایجاد مشکلاتی مانند افزایش pH خاک و اثر بر روی آب های زیرزمینی شده که خود باعث خوردگی سازه های مدفون در خاک می گردد. تثبیت خاک با این مواد، باعث ایجاد رفتار ترد و شکننده در خاک می گردد و باعث می شود در مواقعی که خاک تحت بارهای دینامیکی قرار دارد مشکلاتی به وجود آید. در زمان تولید این تثبیت کننده ها علاوه بر صرف انرژی فراوان، مقدار زیادی گازهای گلخانه ای در جو رها می شوند که آسیب های زیست محیطی قابل توجهی را ایجاد می کنند (Sunil و همکاران، ۲۰۰۶؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۶).

در این تحقیق اثر توأم سیمان و میکروسیلیس بر مقاومت تک محوری، حدود انبرگ و نفوذپذیری خاک تثبیت شده با سیمان بررسی شده است. برای بررسی موضوع از طرح اختلاط های مختلف و تغییر مقادیر میکروسیلیس با ثابت نگه داشتن سیمان در قالب طرح اختلاط های نوع اول و تغییر میکروسیلیس و سیمان در قالب طرح اختلاط های نوع دوم استفاده شده است.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مصالح مورد استفاده در آزمایش ها

خاک مورد استفاده در این تحقیق پس از خشک کردن خاک طبیعی در دمای اتاق و انجام آزمایش های دانه بندی مطابق با استاندارد STM C136، تراکم استاندارد مطابق با استاندارد ASTM D698 و طبق طبقه بندی متحد ASTM D2487، خاک از نوع رس با خاصیت خمیری پایین (CL) طبقه بندی گردید. در شکل (۱) منحنی دانه بندی خاک رس و نمودار تعیین درصد رطوبت بهینه آن ارائه شده است. در جدول (۱) نیز مشخصات خاک مورد استفاده ذکر شده است.

۲-۱-۱- سیمان

سیمان مورد استفاده از نوع پرتلند تیپ دو و محصول کارخانه سیمان صوفیان بوده که سیمانی رایج با زمان گیرش و گرمای هیدراتاسیون^۳ متوسط است. مشخصات این سیمان طبق استاندارد ملی شماره ۳۸۹ ایران بوده و دارای حرارت هیدراتاسیون متوسط بوده و مقاومت آن در برابر حمله سولفات ها در حد متوسط باشد.

۲-۱-۲- میکروسیلیس

پودر میکروسیلیس استفاده شده دارای وزن مخصوص فضایی ۲۵۰ کیلوگرم در مترمکعب با رنگ خاکستری مایل به سفید که یک محصول فرعی حاصل از کوره های قوس الکتریکی در جریان تولید آلیاژهای فروسیلیس است، می باشد. در جدول (۲) ترکیبات شیمیایی میکروسیلیس مورد استفاده ارائه شده است.

۲-۱-۳- آب

آب مصرفی آب شرب شهر تبریز است.

۳- طرح اختلاط‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها

برای مطالعه اثر میکروسیلیس بر مقاومت تک‌محوری، ۱۰ طرح اختلاط با درصدهای مختلف میکروسیلیس و با ساخت ۱۹ نمونه برای تعیین مقاومت ۷ روزه و ۱۹ نمونه برای تعیین مقاومت ۲۸ روزه، ساخته شده است (جدول (۳)).

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی میکروسیلیس مورد استفاده

ترکیب شیمیایی	میزان مشارکت (%)
SiO ₂	۹۵/۴
Al ₂ O ₃	۱/۱۲
Fe ₂ O ₃	۰/۷۷
CaO	۰/۴۹
MgO	۰/۸۷
K ₂ O	۰/۸۶
Na ₂ O	۰/۳۱
سایر ترکیبات	۰/۱۸

جدول ۳- طرح اختلاط‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها

شماره طرح	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
ترکیب مصالح	N	N+5C	N+5C+2M	N+5C+4M	N+5C+6M	N+5C+8M	N+4C+1M	N+3C+2M	N+2C+3M	N+1C+4M

قبل از ساخت نمونه‌ها، ابتدا با توجه به وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه و همچنین حجم نمونه‌های مورد نظر برای ساخت، وزن نمونه‌ها تعیین شده و داخل قالب استوانه‌ای به قطر ۳/۸۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر ریخته شده و با وزنه استاندارد کوبیده می‌شود (شکل (۲-الف)). پس از خروج نمونه‌ها، آن‌ها را شماره‌گذاری کرده و در نایلون جاسازی کرده و سپس درون ظروف در بسته قرار می‌گیرند. این کار جهت اطمینان از عدم تبخیر رطوبت نمونه‌ها انجام می‌شود، سپس نمونه‌ها در محلی که تغییرات دما در آن حداقل است قرار داده و برای مدت زمان لازم جهت عمل‌آوری نمونه‌ها (۷ و ۲۸ روز) باقی‌مانند. پس از پایان روز عمل‌آوری، نمونه‌های ساخته‌شده در دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری قرار گرفته و آزمایش می‌شوند (شکل (۲-ب)).



شکل ۲- (الف) نمونه آماده‌شده برای آزمایش تک‌محوری،
(ب) نمونه آزمایش‌شده در دستگاه تک‌محوری

۵- نتایج آزمایش‌ها

آزمایش‌های انجام‌شده بر روی نمونه‌ها شامل آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، حدود اتربرگ و نفوذپذیری است. طرح اختلاط‌های مورد استفاده عبارت‌اند از: طرح اختلاط‌های نوع اول (که در آن درصد سیمان ثابت نگه‌داشته شده و درصد میکروسیلیس از مقدار ۲ تا ۸ درصد پیوسته افزایش می‌یابد) و

در این جدول، N معرف خاک رس خالص، C معرف سیمان، M معرف میکروسیلیس بوده و ضرایب این حروف معرف درصد وزنی استفاده‌شده نسبت به میزان خاک رس می‌باشد. برای بررسی اثر میکروسیلیس بر حدود اتربرگ و نفوذپذیری از ۴ طرح اختلاط مطابق جدول (۴) استفاده شده است.

جدول ۴- طرح اختلاط‌های مورد استفاده جهت بررسی اثر

میکروسیلیس بر حدود اتربرگ و نفوذپذیری

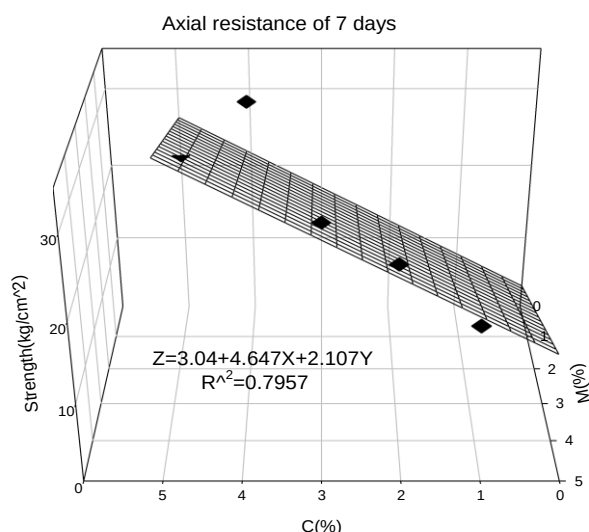
شماره طرح	۱	۲	۳	۴
ترکیب مصالح	5C+2M	5C+4M	5C+6M	5C+8M

۴- ساخت نمونه‌ها برای آزمایش مقاومت فشاری تک-

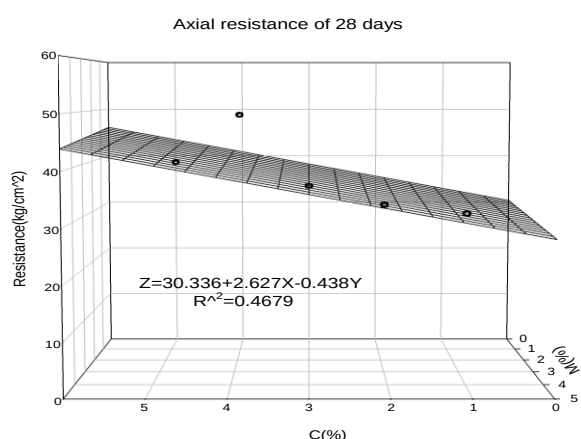
محوری (استاندارد ASTM D2166)

به‌منظور ساخت نمونه‌های آزمایش تک‌محوری، ابتدا خاک رس و مواد افزودنی بر اساس درصد وزنی خاک خشک به‌خوبی با یکدیگر مخلوط شده‌اند. پس از اختلاط کامل و یکنواخت خاک رس و افزودنی‌ها، مقدار رطوبت بهینه آزمایش تراکم، به مخلوط اضافه گردید. باید توجه داشت که خاک حاوی درصد رطوبت طبیعی می‌باشد که برای خشک شدن داخل دستگاه آون در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت گذاشته شده است. اختلاط ابتدا به‌صورت خشک انجام شد و پس از اضافه کردن مقدار آب لازم، در نایلون اختلاط کامل انجام شده است. پس از ورز دادن کامل خاک جهت برقراری یکنواختی اختلاط خاک و آب و به دست آوردن یک مخلوط کاملاً همگن، نایلون که حاوی خاک مرطوب می‌باشد، درون نایلون دیگری قرار داده شده است، که این کار جهت جلوگیری از تغییرات رطوبت نمونه‌ها انجام می‌شود. سپس خاک درون نایلون‌ها به‌مدت ۲۴ ساعت جهت ایجاد همگنی و یکنواختی کامل در مخلوط، رها می‌شود.

می‌توان گفت بهترین نتیجه زمانی حاصل می‌شود که ۵ درصد سیمان و ۶ درصد میکروسیلیس در طرح اختلاط استفاده شود. نمودار تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری (۷ و ۲۸ روزه) مربوط به طرح اختلاط‌های نوع دوم برحسب میکروسیلیس و سیمان در شکل‌های (۵) و (۶) آمده است.



شکل ۵- نمودار تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری ۷ روزه در طرح اختلاط‌های نوع دوم برحسب تغییرات میکروسیلیس و سیمان



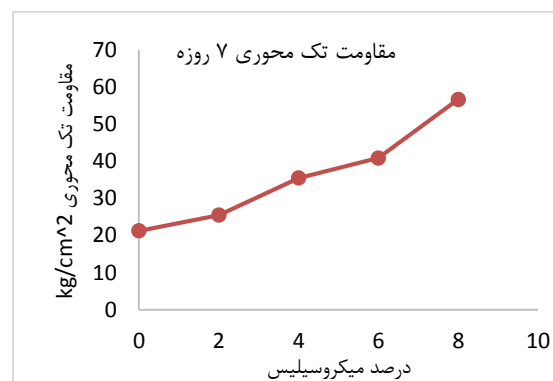
شکل ۶- نمودار تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری ۲۸ روزه در طرح اختلاط‌های نوع دوم برحسب تغییرات میکروسیلیس و سیمان

در طرح اختلاط‌های نوع دوم، هم‌مقدار سیمان و هم‌مقدار میکروسیلیس متغیر می‌باشد. به این صورت که با کاهش مقدار سیمان در طرح اختلاط مقدار میکروسیلیس به همان میزان افزایش داده شده است، تا میزان میکروسیلیسی که می‌تواند جایگزین سیمان در طرح اختلاط‌ها شود، به‌دست آید. همان‌طور

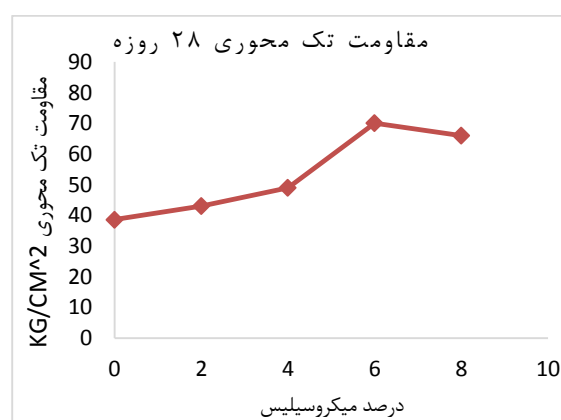
طرح اختلاط‌های نوع دوم (که در آن درصدهای مختلف سیمان با میکروسیلیس جایگزین می‌شود).

۵-۱- تأثیر میکروسیلیس بر مقاومت فشاری تک‌محوری

نمودار تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری (۷ و ۲۸ روزه) مربوط به طرح اختلاط‌های نوع اول برحسب مقدار میکروسیلیس به‌ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است.



شکل ۳- نمودار تغییرات مقاومت تک‌محوری ۷ روزه در طرح اختلاط‌های نوع اول برحسب تغییرات میکروسیلیس



شکل ۴- نمودار تغییرات مقاومت تک‌محوری ۲۸ روزه در طرح اختلاط‌های نوع اول برحسب تغییرات میکروسیلیس

نمودار تغییرات مقاومت ۷ روزه برحسب تغییرات درصد میکروسیلیس در شکل (۳) رسم شده است، همان‌طور که مشخص است، با ثابت بودن میزان سیمان و با افزایش مقدار میکروسیلیس در طرح اختلاط‌های نوع اول، مقاومت تک‌محوری ۷ روزه افزایش می‌یابد. همچنین بر اساس شکل (۴)، با ثابت بودن مقدار سیمان و افزایش میزان میکروسیلیس تا ۶ درصد در طرح اختلاط‌های نوع اول، مقاومت تک‌محوری ۲۸ روزه نیز تقریباً به‌صورت خطی افزایش می‌یابد، ولی در ۸ درصد میکروسیلیس مقاومت تک‌محوری ۲۸ روزه کاهش یافته است. بنابراین، بر اساس این شکل‌ها

- ریز و غیر بلوری بودن میکروسیلیس: برخلاف سایر پوزولان-ها میکروسیلیس به دلیل خلوص از نظر وجود سیلیس و درصد زیاد مواد غیر بلوری و ریزی بسیار زیاد، با سرعت و آهنگ بیشتری وارد واکنش شده و عملاً بر مقاومت خاک اثر مثبتی می‌گذارد.

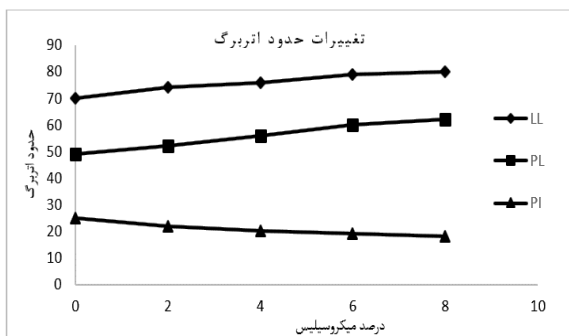
- جلوگیری از کربناسیون^۴: افزودن میکروسیلیس می‌تواند به-عنوان یک پوزولان موجب جلوگیری از کربناسیون و باعث افزایش واکنش‌های سمنتاسیون^۵ و در نتیجه باعث افزایش مقاومت گردد.

- تشکیل ژل چسباننده: در اثر واکنش میکروسیلیس با هیدروکسید کلسیم در حضور آب یک ماده چسباننده به‌وجود آمده و باعث می‌شود بلورهایی بسیار ریز از جنس هیدرات سیلیکاتی تشکیل شود. این ژل چسباننده جایگزین بلورهای درشت هیدروکسید کلسیم شده و باعث افزایش مقاومت می‌شود.

- پر کردن فضاهای خالی: میکروسیلیس فضاهای خالی خاک را پر می‌کند و مقاومت خاک را افزایش می‌دهد.

۵-۲- تأثیر میکروسیلیس بر حدود انتربرگ

نمودار تغییرات حد روانی و حد خمیری و همچنین نشانه خمیری با افزایش میکروسیلیس در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۷- نمودار تغییرات حد روانی، حد خمیری، نشانه خمیری

در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش میکروسیلیس نمودار حد روانی و حد خمیری حالت صعودی پیدا می‌کند ولی نرخ افزایش این حدود به‌گونه‌ای می‌باشد که تفاضل آن‌ها که معرف نشانه خمیری می‌باشد حالت نزولی پیدا کرده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با افزایش میکروسیلیس نشانه خمیری خاک کاهش می‌یابد. دلایل کاهش نشانه خمیری با افزودن میکروسیلیس عبارت‌اند از:

که در شکل (۵) ارائه شده است، وقتی ۵ درصد سیمان بدون میکروسیلیس در طرح اختلاط استفاده شده، مقاومت تک‌محوری ۷ روزه ۲۱/۲۷ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع حاصل شده است ولی زمانی که یک درصد از میزان سیمان کم شده و به جای آن یک درصد میکروسیلیس در طرح اختلاط استفاده شده است، مقاومت تک‌محوری ۳۱/۴۱ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع به‌دست آمده است. از این مرحله به بعد با کاهش میزان سیمان و افزایش مقدار میکروسیلیس به همان میزان در طرح اختلاط، ملاحظه می‌شود که مقاومت تک‌محوری ۷ روزه تقریباً به‌صورت خطی کاهش یافته است. بنابراین می‌توان گفت که در مقاومت تک‌محوری ۷ روزه، حدوداً یک درصد از سیمان را می‌توان با یک درصد میکروسیلیس جایگزین کرد و به مقاومت تک‌محوری بهتری رسید. علاوه بر این، با کاهش مقدار سیمان تا ۳ درصد در طرح اختلاط و جایگزین کردن آن با میکروسیلیس، یعنی افزودن ۲ درصد میکروسیلیس در طرح اختلاط، مقاومت تک‌محوری ۲۸ روزه افزایش می‌یابد. با کاهش مقدار سیمان به ۲ و ۱ درصد و جایگزین کردن آن با میکروسیلیس، یعنی افزودن به ترتیب ۳ درصد و ۴ درصد میکروسیلیس در طرح اختلاط، مقاومت تک‌محوری ۲۸ روزه کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از ۳ درصد سیمان و ۲ درصد میکروسیلیس، طرح اختلاط بهینه حاصل می‌شود.

بر اساس مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت که افزودن میکروسیلیس به خاک رس تثبیت‌شده با سیمان مقاومت تک-محوری ۷ روزه و ۲۸ روزه خاک را به‌صورت خطی افزایش می‌دهد. با توجه به کاهش مقاومت ۲۸ روزه در مقدار میکروسیلیس ۸ درصد، می‌توان نتیجه گرفت که ۶ درصد میکروسیلیس بهترین مقدار میکروسیلیس پیشنهادی جهت اضافه نمودن به خاک تثبیت‌شده با سیمان است. در مورد جایگزینی سیمان با میکروسیلیس (طرح اختلاط‌های نوع دوم) نتایج نشان می‌دهد که مقاومت با بیشتر شدن مقدار میکروسیلیس و کاهش سیمان، کاهش می‌یابد. استثنائاً در طرح اختلاط مربوط به ۳ درصد سیمان با ۲ درصد میکروسیلیس مقاومت افزایش یافته است. دلایل افزایش مقاومت با افزودن میکروسیلیس ناشی از مکانیزم‌های زیر می‌باشد:

- بهبود ناحیه انتقالی: میکروسیلیس موجب بهبود ناحیه انتقالی (وجه مشترک خمیر با دانه‌ها) می‌شود زیرا تمرکز هیدروکسید کلسیم در این منطقه بیشتر از سایر بخش‌ها است. پیش از آن که کل خمیر خاک تحت تأثیر میکروسیلیس قرار گیرد، ناحیه انتقالی بهبود کیفیت خواهد یافت و در نتیجه باعث افزایش مقاومت خواهد شد.

درشت هیدروکسید کلسیم شده و باعث کاهش نفوذپذیری می‌گردد.

- عامل حفاظتی در برابر یخبندان: با توجه به این‌که میکروسیلیس باعث پائین آمدن ضریب نفوذپذیری می‌شود، لذا در زمان یخبندان به‌عنوان عامل حفاظتی عمل می‌کند. دلیل این عملکرد این است که با افزایش آب در خاک ضریب یخبندان نیز افزایش می‌یابد. با افزودن میکروسیلیس فضاهای خالی خاک پر شده و امکان نفوذ آب کاهش یافته و مقدار آب نیز کم می‌شود و در نتیجه ضریب یخبندان کاهش می‌یابد.

۶- نتایج

تثبیت شیمیایی خاک رس ضعیف بستر، راهکاری برای اجتناب از جابه‌جایی و جایگزینی خاک در بستر راه‌ها می‌باشد. در مقاله حاضر اثر تثبیت‌کننده میکروسیلیس بر خواص تراکمی و مقاومتی خاک رس تثبیت‌شده با سیمان با کمک انجام آزمایش‌های مقاومت تک‌محوری، حدود اتربرگ و نفوذپذیری مورد مطالعه قرار گرفت. نتایجی که از آزمایش‌های انجام‌شده به‌دست آمده است به شرح ذیل می‌باشد:

- در خاک رس تثبیت‌شده با سیمان با ثابت بودن میزان سیمان و با افزایش مقدار میکروسیلیس مقاومت تک‌محوری ۷ روزه و مقاومت تک‌محوری ۲۸ روزه تقریباً به‌صورت خطی افزایش می‌یابد.

- جایگزینی میکروسیلیس با سیمان در خاک تثبیت‌شده با سیمان از نظر بررسی مقاومت جوابگو نبوده و باعث افت مقاومت می‌شود.

- اختلاط پهنه‌ای از سیمان و میکروسیلیس جهت تثبیت خاک رس مورد مطالعه ۳ درصد سیمان و ۲ درصد میکروسیلیس می‌باشد.

- در خاک رس تثبیت‌شده با سیمان، افزایش میکروسیلیس باعث افزایش حد روانی، حد خمیری و کاهش نشانه خمیری با یک نمودار خطی می‌گردد. یعنی با افزایش میکروسیلیس خاصیت خمیری خاک رس تثبیت‌شده با سیمان کم‌تر می‌شود.

- افزایش میکروسیلیس در خاک رس تثبیت‌شده با سیمان، سبب کاهش ضریب نفوذپذیری با یک تغییرات خطی می‌شود.

- در خاک رس تثبیت‌شده با سیمان، افزایش میکروسیلیس باعث افزایش مدول الاستیسیته و مقاومت در برابر کرنش می‌شود.

- ریزدانه بودن: ریز بودن بیش‌ازحد میکروسیلیس دلیل افزایش حد روانی و حد خمیری و در نتیجه باعث کاهش دامنه خمیری است.

- تشکیل ماده چسبنده: در اثر واکنش‌هایی که در بالا ذکر شد، افزودن میکروسیلیس باعث به‌وجود آمدن یک ژل چسبنده گردیده و در نتیجه نشانه خمیری کاهش می‌یابد.

۵-۳- تأثیر میکروسیلیس بر نفوذپذیری

نمودار تغییرات ضریب نفوذپذیری با افزایش میکروسیلیس در شکل (۸) ارائه شده است.



شکل ۸- نمودار تغییرات ضریب نفوذپذیری ۲۸ روزه با تغییرات میکروسیلیس

همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده است، با ثابت نگه‌داشتن مقدار سیمان در طرح اختلاط و افزایش میزان میکروسیلیس از ۲ تا ۸ درصد، ضریب نفوذپذیری تقریباً به‌صورت خطی کاهش می‌یابد، یعنی می‌توان نتیجه گرفت که میکروسیلیس باعث می‌شود که ضریب نفوذپذیری کاهش یابد و مخلوطی با نفوذپذیری کم‌تر به‌دست آید. دلایل کاهش نفوذپذیری با افزودن میکروسیلیس عبارت‌اند از:

- پرشدن فضاهای خالی: با افزودن میکروسیلیس به خاک فضای خالی بین ذرات خاک و ذرات سیمان پر شده و نفوذپذیری خاک کم می‌شود.

- بهبود ناحیه انتقالی: میکروسیلیس موجب بهبود ناحیه انتقالی (وجه مشترک خمیر با دانه‌ها) می‌گردد زیرا تمرکز هیدروکسید کلسیم در این منطقه بیشتر از سایر بخش‌ها است. پیش از آن‌که کل خمیر خاک تحت تأثیر میکروسیلیس قرار گیرد، ناحیه انتقالی بهبود کیفیت خواهد یافت و در نتیجه باعث کاهش نفوذپذیری خواهد شد.

- تشکیل ژل چسباننده: در اثر واکنش میکروسیلیس با هیدروکسید کلسیم در حضور آب یک ماده چسباننده به‌وجود آمده و باعث می‌شود بلورهای بسیار ریز از جنس هیدرات سیلیکاتی تشکیل شود. این ژل چسباننده جایگزین بلورهای

- 146-153.
- Ouhadi VR, Yong RN, "Ettringite Formation and Behavior in Clayey Soils", *Applied Clay Science*, 2008, 42 (1-2), 258-265.
- Sheng X, Xin H, "Effect of Process of Ettringite Formation on Strength Properties in Stabilized Soil", 2nd International Conference on Problematic Soils, 2006, 359-401.
- Zhang T, Cai G, Liu S, Puppala AJ, "Engineering properties and microstructural characteristics of foundation silt stabilized by lignin-based industrial by-product", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2016, 20 (7), 2725-2736.
- Yi Y, Gu L, Liu S, "Microstructural and mechanical properties of marine soft clay stabilized by lime-activated ground granulated blastfurnace slag", *Applied Clay Science*, 2015, 103, 71-76.
- ۷- مراجع
- Abdi MR, Wild S "Sulphate Expansion of Lime-Kaolinite: I. Physical Characteristics, *Clay Minerals*, 1993, 28, (4), 555-567.
- Ahmed A, "Compressive strength and microstructure of soft clay soil stabilized with recycled bassanite", *Applied Clay Science*, 2015, 104, 27-35.
- Ahmed A, Issa UH, "Stability of soft clay soil stabilised with recycled gypsum in a wet environment", *Soils and Foundations*, 2014, 54, 405-416.
- Al-Mukhtar M, Khattab S, Alcover JF, "Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil", *Engineering Geology*, 2012, 139, 17-27.
- Al-Mukhtar M, Lasledj A, Alcover JF, "Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 50 C", *Applied Clay Science*, 2010, 50, 199-203.
- ASTM, "Annual book of astm standard. American Society for Testing and Materials", Philadelphia, 2006, 4, 08.
- Roohbakhshan A, Kalantari B, "Stabilization of clayey soil with lime and waste stone powder", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 2016, 48 (4), 429-438.
- Sunil BM, Nayak S, Shrihari S, "Effect of pH on the geotechnical properties of laterite", *Engineering Geology*, 2006, 85 (1), 197-203.
- Broms BB, Boman P, "Stabilization of Soil with Lime Columns", *Ground Engineering*.
- Cong M, Longzhu C, Bing C, "Analysis of strength development in soft clay stabilized with cement-based stabilizer", *Construction and Building Materials*, 2014, 71, 354-362.
- Do TN, Ou CY, Chen RP, "A study of failure mechanisms of deep excavations in soft clay using the finite element method", *Computers and Geotechnics*, 2016, 73, 153-163.
- Bell FG, "Lime stabilization of clay minerals and soils", *Engineering Geology*, 1996, 42 (4), 223-237.
- Sariosseiri F, Muhunthan B, "Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils", *Engineering Geology*, 2009, 104 (1), 119-125.
- Goodarzi AR, Salimi M, "Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag", *Applied Clay Science*, 2015, 108, 61-69.
- Jafari M, Esna-ashari M, "Effect of waste tire cord reinforcement on unconfined compressive strength of lime stabilized clayey soil under freeze-thaw condition", *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 82, 21-29.
- Khattab SAA, Al-Mukhtar M, Fleureau JM, "Long-Term Stability Characteristics of a Lime-Treated Plastic Soil", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 2007, 19 (4), 358-366.
- Lam LG, Bergado DT, Hino T, "PVD improvement of soft Bangkok clay with and without vacuum preloading using analytical and numerical analyses", *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43, 547-557.
- Liu Z, Qian G, Zhou J, Li C, Xu Y, Qin Z, "mpovement of Ground Granulated Blast-Furnace Slag on Stabilization/Solidification of Simulated Mercury-Doped Wastes in Chemically Bonded Phosphate Ceramics", *Journal of Hazardous Materials*, 157, 1,

EXTENDED ABSTRACT

Investigation of the Effect of Microsilica on the Variations of Strength, Atterberg Limits and Permeability in Cement-Stabilized Clay

Sajad Tavakoli^{a*}, Mohamad Hosein Aminfar^b, Ahmad Hashem Zadeh^b

^a Faculty of Civil Engineering, Ilam Azad University, Ilam 6931133145, Iran

^b Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

Received: 23 February 2021; Accepted: 17 August 2021

Keywords:

Clay, Soil stabilization, Cement, Microsilica, Atterberg limits.

1. Introduction

Soil stabilization is one of the important issues related to the improvement of poor soils in geotechnical engineering. Today, due to high costs and technical and safety problems in implementation, the use of environmentally friendly and appropriate materials to reduce costs and increase efficiency and safety, is one of the basic needs. In this regard, the use of pozzolans can meet the above expectations. Cement soil stabilization is one of the most common methods of soil improvement, which is presented as an effective method for improving loose soils, especially road construction projects, as well as a suitable solution to improve the physical and engineering properties of soil and reduce costs.

Since the presence of soft clays can cause high deformation, low resistance and severe scouring ability, therefore, the presence of this type of soil can damage or destroy a structure (Cong et al. 2014, Do et al. 2016), based on this, various methods such as replacement with suitable materials, various improvement methods to deal with the problems caused by the existence of this type of soil have been presented. Chemical modification using conventional additives such as lime and cement is one of the common solutions for the stabilization of such soils (Ahmed, 2015). In general, the process of soil improvement after interaction with the additive depends on the characteristics of the components and environmental conditions.

In this research, the combined effect of cement and microsilica on uniaxial strength, atterberg limit and permeability of cement-stabilized soil has been investigated. To investigate the issue, different mix designs and changing the contents of microsilica by fixing the cement content in the form of the first type mix design and changing the microsilica and cement contents in the form of the second type mix design have been used.

2. Materials used in experiments

2.1. Soil

The soil used in this study, after drying at room temperature and performing grain size analysis and density experiments, according to the unified classification system, the soil was clay soil with low plastic property (CL).

2.2. Cement

The cement used is Portland type 2 and is a product of Sufian Cement Factory, which is a common cement with setting time and moderate hydration temperature.

* Corresponding Author

E-mail addresses: sajadtavakoli61@yahoo.com (Sajad Tavakoli), aminfar@tabrizu.ac.ir (Mohamad Hosein Aminfar), ahmad_hashemzadeh@yahoo.com (Ahmad Hashem Zadeh).

2.3. Microsilica

The microsilica powder used has a specific gravity of 250 kg/m³ with a whitish gray color.

2.4. Water

Water consumption is the drinking water in Tabriz.

3. Mix designs used in experiments

To study the effect of microsilica on uniaxial strength, 10 mix designs with different percentages of microsilica were developed by making 19 specimens to determine 7-day strength and 19 specimens to determine 28-day resistance (Table 1).

Table 1: Design of mixtures used in experiments

Design No.	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Material composition	N+5C	N+5C+2M	N+5C+4M	N+5C+6M	N+5C+8M	N+4C+1M	N+3C+2M	N+2C+3M	N+1C+4M

In this table, N represents pure clay, C represents cement, and M represents microsilica and the coefficients of these letters represent the weight percentage used in relation to the amount of clay.

To investigate the effect of microsilica on atterberg limits and permeability, 4 mix designs according to Table (2) have been used.

Table 2: Mix designs used to investigate the effect of microsilica on atterberg limit and permeability

Design No.	1	2	3	4
Material composition	5C+2M	5C+4M	5C+6M	5C+8M

4. Test results

4.1. The effect of microsilica on uniaxial compressive strength

In the diagram of a variation of in 7-day strength in terms of changes in the percentage of microsilica, with the constant content of cement and with increasing the content of microsilica in the first type mix design, the 7-day uniaxial strength increases. Also, with the constant cement content and increasing microsilica content up to 6% in the first type mix design, the 28-day uniaxial strength increases almost linearly, but in 8% microsilica the 28-day uniaxial strength decreases. Therefore, it can be said that the best results are obtained when 5% cement and 6% microsilica are used in the mix design.

In the second-type mix design, both the cement content and the microsilica content are variable. In this way, by reducing the cement content in the mix design, the microsilica content is increased by the same amount, to obtain the microsilica content that can replace cement in the mix design. When 5% cement without microsilica was used in the mix design, the 7-day uniaxial strength of 21.27 kg/cm² was achieved. However, when one percent of the cement content was reduced and instead one percent of microsilica was used in the mix design, the axial strength of 31.41 kg/cm² was obtained. From this stage onwards, by decreasing the cement content and increasing the microsilica content by the same amount in the mix design, it is observed that the 7-day uniaxial strength has decreased almost linearly. Therefore, it can be said that in 7-day uniaxial strength, about one percent of cement can be replaced with one percent microsilica and better uniaxial strength can be achieved. In addition, by reducing the cement content to 3% in the mix design and replacing it with microsilica, i.e. adding 2% microsilica to the mix design, the 28-day uniaxial strength increases. By reducing the cement content to 2 and 1% and replacing it with microsilica, i.e. adding 3% and 4% microsilica in the mix design, respectively, the 28-day uniaxial strength is reduced. Therefore, it can be concluded that the optimal mix design is achieved by using 3% cement and 2% microsilica.

4.2. The effect of microsilica on atterberg limits

With the increase of microsilica, the liquid limit chart and the plastic limit chart become ascending however, the rate of increase of these limits is such that their difference, which is a sign of plasticity, has decreased. Therefore, it can be concluded that with increasing microsilica, the soil plasticity index decreases.

4.3. The effect of microsilica on permeability

By keeping the cement content in the mixing constant and increasing the microsilica content from 2 to 8%, the permeability coefficient decreases almost linearly. That is, it can be concluded that microsilica reduces the permeability coefficient and a mixture with lower permeability is obtained.

5. Results

Chemical stabilization of the poor bed clay is a way to avoid displacement and soil replacement in the road bed. In the present paper, the stabilizing effect of microsilica on the compaction and strength properties of cement-stabilized clay was studied with the help of uniaxial strength tests, atterberg limits and permeability. The results obtained from the experiments are as follows:

- In cement-stabilized clay, with a constant cement content and with increasing the microsilica content, the 7-day uniaxial strength and the 28-day uniaxial strength increase almost linearly.
- Replacement of microsilica with cement in soil stabilized with cement has not provided appropriate results in terms of strength and causes a decrease in strength.
- The optimal mixture of cement and microsilica to stabilize the studied clay includes 3% cement and 2% microsilica.
- In cement-stabilized clay, the increase of microsilica increases the liquid limit, the plastic limit and decreases the plasticity index with a linear graph. That is, with the increase of microsilica, the plastic property of the clay stabilized with cement decreases.
- Increasing microsilica content in cement-stabilized clay reduces the permeability coefficient with a linear change.
- In cement-stabilized clay, increasing microsilica content increases the modulus of elasticity and strain resistance.

6. References

- Ahmed A, "Compressive strength and microstructure of soft clay soil stabilized with recycled bassanite", *Applied Clay Science*, 2015, 104, 27-35.
- Cong M, Longzhu C, Bing C, "Analysis of strength development in soft clay stabilized with cement-based stabilizer", *Construction and Building Materials*, 2014, 71, 354-362.
- Do TN, Ou CY, Chen RP, "A study of failure mechanisms of deep excavations in soft clay using the finite element method", *Computers and Geotechnics*, 2016, 73, 153-163.