



مطالعه آزمایشگاهی مقایسه تثبیت خاک رس کائولینیت با سیمان و غبار کوره سیمان

صادق قوامی جمال^۱، حمید جهان بخش^۲، فریدون مقدس نژاد^{۳*}

^۱ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

^۲ دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۷-۱۵

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۸-۱۲

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۹-۲۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۹-۲۶

کلمات کلیدی:

تثبیت خاک

سیمان

غبار کوره سیمان

پارامترهای ژئوتکنیکی

میکروسکوپ الکترونی روبشی

خلاصه: یکی از مسائل مهم در اجرای پروژه‌های عمرانی وجود خاک‌های رسی با مقاومت پایین و مشکلات ژئوتکنیکی ناشی از آن است. تثبیت شیمیایی با مواد افزودنی مانند سیمان از روش‌های متداول بهسازی خاک‌های رسی است. با وجود تاثیر قابل قبول سیمان در بهبود مقاومت خاک، به دلیل آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از فرایند تولید این ماده، در سال‌های اخیر محققین به دنبال مصالح جایگزین سیمان با آلودگی کمتر و صرفه اقتصادی بوده‌اند. یکی از این مصالح، غبار کوره سیمان است. غبار کوره سیمان یک محصول جانبی تولید سیمان پرتلند است که در محل خروجی گازهای آزاد شده کوره سیمان توسط فیلترهای پارچه‌ای یا رسوب‌کننده الکترواستاتیکی جمع‌آوری می‌شود. در این مقاله به مقایسه پارامترهای ژئوتکنیکی خاک رس کائولینیت تثبیت‌شده با سیمان و غبار کوره سیمان پرداخته می‌شود. به این منظور آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم، مقاومت فشاری محصورنشده و نسبت باربری کالیفرنیا بر نمونه‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد سیمان و غبار کوره سیمان (نسبت به وزن خشک خاک) انجام شد. نتایج نشان داد که سیمان و غبار کوره سیمان مقاومت خاک را افزایش می‌دهند و مقاومت فشاری محصورنشده نمونه با ۱۵ درصد غبار کوره سیمان برابر با مقاومت نمونه با ۱۰ درصد سیمان پس از ۲۸ روز عمل‌آوری می‌باشد. آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های حاوی سیمان و غبار کوره سیمان نشان داد که به دلیل تشکیل زل کلسیم سیلیکات هیدرات، حفره‌ها کاهش یافته و اتصال بین ذرات خاک بیشتر شده‌است که منجر به افزایش مقاومت می‌گردد.

۱- مقدمه

رشد جمعیت و افزایش شهرنشینی منجر به کمبود زمین‌های مناسب برای احداث زیرساخت‌ها و سازه‌ها شده‌است. یکی از متداول‌ترین مشکلات ژئوتکنیکی در مهندسی عمران، احداث سازه بر خاک‌هایی با ظرفیت باربری پایین مانند خاک‌های رسی است. تثبیت شیمیایی این خاک‌ها با استفاده از مواد افزودنی مانند سیمان و آهک از دیرباز به منظور بهسازی و بهبود مشخصات فنی خاک مورد توجه قرار گرفته‌است. میزان بهبود پارامترهای خاک، به نوع خاک و نوع و مقدار افزودنی بستگی دارد. شاخص پلاستیسیته و دانه‌بندی خاک می‌تواند به انتخاب افزودنی مناسب برای خاک مورد نظر کمک کند [۱].

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: moghadas@aut.ac.ir

مطالعات نشان می‌دهد تثبیت شیمیایی خاک رس با سیمان، موجب کاهش پلاستیسیته و افزایش مقاومت و ظرفیت باربری خاک می‌شود [۲-۵]. تغییر خصوصیات خاک با افزودن سیمان ناشی از واکنش شیمیایی سیمان و آب است که هیدراسیون نامیده می‌شود. تری کلسیم‌سیلیکات، دی کلسیم‌سیلیکات و تری کلسیم‌آلومینات از ترکیب‌های اصلی موجود در سیمان هستند [۶]. کلسیم‌سیلیکات‌های موجود در سیمان با هیدراته شدن، ترکیبات کلسیم‌هیدروکسید و کلسیم‌سیلیکات‌های هیدرات (C-S-H) را به وجود می‌آورند. تری کلسیم‌آلومینات با آب و کلسیم‌هیدروکسید واکنش انجام داده و کلسیم‌آلومینات‌های هیدرات (C-A-H) ایجاد می‌کند. به علاوه کلسیم‌هیدروکسید آزاد شده می‌تواند با سیلیکات و آلومینات موجود در خاک واکنش داده و محصولات سیمانی ثانویه (C-S-H)



۵ برابر نمونه‌های خاک خالص افزایش می‌یابد [۱۲]. مطالعات نشان می‌دهد که با افزودن غبار کوره سیمان، افزایش مقاومت خاک‌های با پلاستیسیته پایین نسبت به خاک‌های با پلاستیسیته بالا بیشتر است [۱۴].

خاک رس کائولینیت به‌عنوان خاکی ضعیف با مقاومت پایین و ظرفیت باربری کم در نظر گرفته می‌شود [۱۹]. با توجه به پایین بودن شاخص پلاستیسیته کانی کائولینیت، به‌منظور تثبیت این خاک‌ها استفاده از مصالح سیمانی مناسب می‌باشد [۱]. در تحقیقات گذشته، غبار کوره سیمان به‌عنوان مصالح جایگزین سیمان در تثبیت خاک معرفی شده‌است؛ اما مطالعه‌ای در زمینه مقایسه تاثیر این دو ماده بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک رس کائولینیت و آنالیز آماری نتایج، تاکنون انجام نشده‌است که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود. هم‌چنین در این تحقیق مشخص خواهد شد چه میزان غبار کوره سیمان می‌تواند جایگزین سیمان مصرفی جهت تثبیت رس کائولینیت شود. به‌این‌منظور پس از افزودن ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد ماده افزودنی (نسبت به وزن خشک خاک) به خاک رس، آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم، مقاومت فشاری محصورنشده (UCS) و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) بر نمونه‌ها انجام شد. در انتها با استفاده از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، تغییرات ریزساختاری ناشی از تولید محصولات سیمانی مشاهده شد.

۲- مصالح

خاک مصرفی در این تحقیق، رس کائولینیت بوده که از شرکت صنایع خاک چینی ایران تهیه گردید. منحنی دانه‌بندی خاک در شکل ۱ نشان داده شده‌است. جدول ۱ خصوصیات خاک مورد استفاده را نشان می‌دهد. خاک مورد نظر بر اساس منحنی دانه‌بندی و طبق سیستم طبقه‌بندی متحد در رده خاک‌های رسی با پلاستیسیته پایین (CL) قرار می‌گیرد. ترکیبات شیمیایی خاک که از آنالیز طیف‌نگاری فلورسانس اشعه ایکس (XRF) به‌دست آمده در جدول ۲ آورده شده‌است. به‌منظور شناسایی کانی‌های تشکیل‌دهنده این خاک آزمایش XRD انجام شد که بر اساس نتایج این آزمایش، عمده کانی‌های تشکیل‌دهنده خاک مورد بررسی کائولینیت، کوارتز و کلسیت تعیین گردید (شکل ۲).

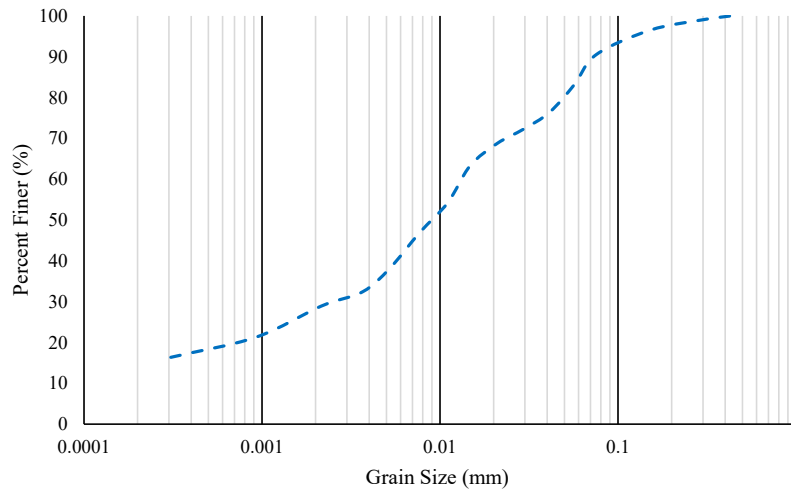
سیمان پرتلند (نوع ۲) و غبار کوره سیمان استفاده شده از

و (C-A-H) تولید کند [۷]؛ بنابراین ترکیبات معدنی موجود در خاک بر تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک تثبیت‌شده با سیمان تاثیرگذار است [۸]. تشکیل ژل‌های کلسیم‌سیلیکات‌هیدرات و کلسیم‌آلومینات‌هیدرات موجب پر شدن فضای خالی بین ذرات و افزایش مقاومت خاک می‌شود [۳ و ۵ و ۸].

امروزه استفاده از مواد شیمیایی مانند سیمان با وجود تاثیر قابل‌قبول در بهبود مشخصات مهندسی خاک، به‌دلیل آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از فرایند تولید این ماده، مورد انتقاد بسیاری قرار گرفته‌است. صنعت سیمان بیش از ۵-۷ درصد انتشار آلاینده کربن‌دی‌اکسید در جهان را شامل می‌شود به‌طوری که در تولید یک تن سیمان ۰/۸ الی ۱ تن کربن‌دی‌اکسید تولید و انتشار می‌یابد [۱۱-۹]. به علاوه برای تولید یک تن سیمان به ۱/۵-۱/۶ تن مواد خام و مصرف ۳۰۰۰-۴۰۰۰ مگاژول انرژی سوخت و ۱۲۰-۱۶۰ کیلووات انرژی الکتریکی نیاز است [۹ و ۱۱]؛ بنابراین اتخاذ راه‌کارهایی به‌منظور کاهش مصرف مواد خام و به دنبال آن مصرف انرژی و آلودگی ناشی از تولید سیمان از جنبه زیست‌محیطی بسیار اهمیت دارد. در این راستا استفاده از مصالح جایگزین سیمان توسط محققین مورد توجه قرار گرفته‌است. یکی از این مصالح، غبار کوره سیمان (CKD) است که نتایج مطالعات گویای بهبود خواص مهندسی خاک در صورت استفاده از این ماده به‌عنوان افزودنی می‌باشد [۱۵-۱۲].

غبار کوره سیمان یک محصول جانبی تولید سیمان است. در فرایند تولید سیمان پرتلند در محل خروج گازها از کوره، مقدار زیادی غبار جمع می‌شود که مقدار کمی از این غبار بازیابی شده و به‌منظور صرفه‌جویی در سوخت، مجدد وارد کوره می‌شود و مقدار زیادی از آن‌ها دفع می‌گردد. خواص فیزیکی و شیمیایی CKD می‌تواند در کارخانه‌های مختلف متفاوت باشد که بستگی به مواد خام، نحوه جمع‌آوری ذرات و نوع سوخت استفاده‌شده، دارد [۱۶].

وجود آهک آزاد (CaO)، ترکیبات قلیایی و ریزی ذرات غبار کوره سیمان موجب شده‌است که از این ماده در تثبیت خاک‌ها استفاده شود [۱۷]. اولین تحقیقات در زمینه استفاده از غبار کوره سیمان به‌منظور تثبیت خاک‌های رسی در سال ۱۹۷۱ انجام شد [۱۸]. در یک بررسی مشخص شد که مقاومت فشاری محصورنشده نمونه‌های رسی حاوی ۱۶ درصد CKD پس از ۲۸ روز عمل‌آوری به بیش از



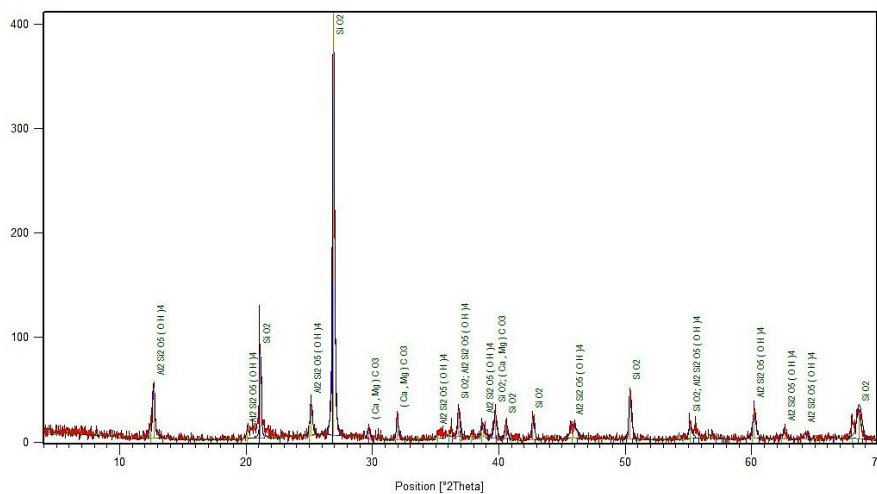
شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک رس کائولینیت

Fig. 1. Grain size distribution of the kaolinite clay

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی خاک

Table 1. Geotechnical properties of the kaolinite clay

مقدار	استاندارد	پارامتر
۲۹/۵	ASTM D4318 [۲۱]	حد روانی (LL)، %
۲۱/۵	ASTM D4318 [۲۱]	حد خمیری (PL)، %
۸	ASTM D4318 [۲۱]	شاخص پلاستیسیته (PI)، %
CL	ASTM D2487 [۲۲]	نام خاک در سیستم طبقه‌بندی متحد
۲/۶۵	ASTM D854 [۲۳]	چگالی ویژه
۱۷	ASTM D698 [۲۴]	دانسیته خشک حداکثر، kN/m^3
۱۶/۲	ASTM D698 [۲۴]	درصد رطوبت بهینه، %
۱۲۹	ASTM D2166 / D2166M [۲۵]	مقاومت فشاری محصور نشده، kPa
۳	ASTM D1883 [۲۶]	نسبت باربری کالیفرنیا در حالت اشباع، %



شکل ۲. نمودار آزمایش XRD خاک

Fig. 2. XRD analysis of the soil

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی مصالح مصرفی
Table 2. Chemical composition of materials

ترکیب	خاک رس	سیمان پرتلند	غبار کوره سیمان
SiO ₂	۷۲/۵	۲۱/۱۱	۶/۷
Al ₂ O ₃	۱۸/۰۷	۴/۴۲	۱/۳
Fe ₂ O ₃	۰/۳۶	۳/۹۶	۲/۲
CaO	۱/۱۵	۶۳/۳۶	۶۷/۹
MgO	۰/۶۱	۱/۵۱	۱/۱
SO ₃	۰/۰۶	۲/۶۱	۱/۶
K ₂ O	۰/۳۹	۰/۵۱	۴/۴
Na ₂ O	۰/۲۵	۰/۳۸	۰/۴۸
ترکیبات دیگر	۰/۶۱	۰/۱۲	۳/۰۲
درصد افت ناشی از حرارت	۶	۲/۰۲	۱۱/۳

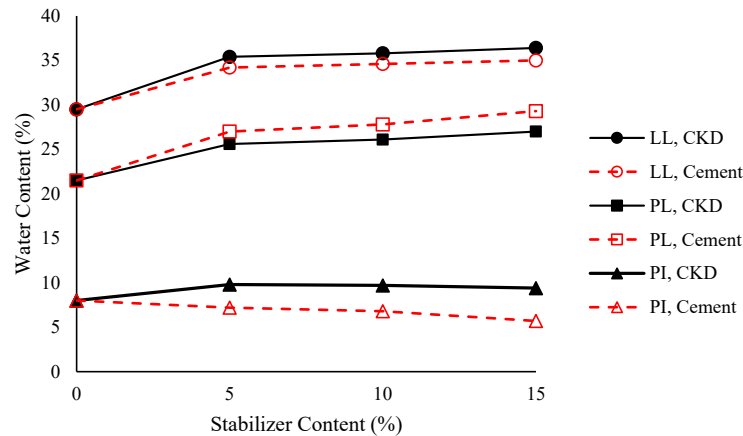
با دست به صورت همگن مخلوط شد تا مخلوط به رنگ یکنواخت برسد. حدود اتربرگ (حد روانی (LL) و حد خمیری (PL)) نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D4318 [۲۱] تعیین شد. از آنجا که مشخصه‌های تراکمی (دانسیته خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه) تاثیر به‌سزایی بر خصوصیات مهندسی خاک مانند مقاومت، تراکم‌پذیری و نفوذپذیری دارد، نمونه‌های تثبیت‌شده تحت آزمایش تراکم طبق استاندارد ASTM D698 [۲۴] قرار گرفتند. در این آزمایش نمونه‌ها در ۳ لایه و ۲۵ ضربه با انرژی ۶۰۰ کیلو نیوتن متر بر مترمکعب در قالبی به قطر ۱۰۱/۶ میلی‌متر و با چگشی به وزن ۲۴/۴ نیوتن که از ارتفاع ۳۰۵ میلی‌متر رها می‌شود متراکم شدند.

به منظور انجام آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده طبق استاندارد ASTM D2166 [۲۵]، با توجه به ابعاد قالب نمونه تک‌محوری (قطر ۳۸ میلی‌متر و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر) مقدار مشخصی خاک خشک با درصد‌های مختلف افزودنی به‌طور همگن مخلوط شد. سپس آب به مقدار رطوبت بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم به ترکیب اضافه شد و در هنگام اختلاط مصالح دقت شد تا توده‌ای در خاک ایجاد نشود. پس از آن، نمونه‌ها با تراکم ۹۵ درصد دانسیته خشک حداکثر در قالب، متراکم شدند. پس از خارج کردن نمونه‌هایی استوانه‌ای شکل از قالب، یک لایه سلفون به دور آن‌ها پیچیده شد و

کارخانه سیمان شاهرود تهیه گردید. جدول ۲ ترکیبات شیمیایی این مصالح را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سیمان و غبار کوره سیمان ترکیبات CaO، SiO₂، Al₂O₃ و Fe₂O₃ به مقدار قابل توجهی وجود دارد؛ اما ترکیبات قلیایی K₂O و Na₂O در غبار کوره سیمان بیشتر از سیمان است. مطالعات نشان می‌دهد برای این که یک ماده به‌عنوان تثبیت‌کننده، مؤثر در نظر گرفته شود باید مدول هیدراسیون (نسبت CaO به مجموع مقادیر SiO₂، Al₂O₃ و Fe₂O₃) بزرگ‌تر از ۱/۷ باشد [۱۵ و ۲۰]. با توجه به جدول ۲ مدول هیدراسیون برای CKD استفاده شده در این تحقیق بیشتر از ۱/۷ است.

۳- آزمایش‌ها

مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد که مقدار موردبررسی سیمان و غبار کوره سیمان در زمینه تثبیت خاک معمولاً به ترتیب ۰ تا ۱۲ درصد و ۰ تا ۲۰ درصد بوده است [۲، ۱۴، ۱۵ و ۲۷]. مقدار غبار کوره سیمان به‌منظور تثبیت مقرون‌به‌صرفه، ۱۵ درصد در نظر گرفته شده است [۱۴]. بنابراین برای ساخت نمونه‌ها، درصد‌های مختلف سیمان و غبار کوره سیمان به مقدار ۵، ۱۰ و ۱۵٪ (نسبت به وزن خشک خاک) انتخاب شد و پس از اضافه شدن به خاک



شکل ۳. اثر سیمان و غبار کوره سیمان (CKD) بر حدود اتربرگ خاک رس کائولینیت
 Fig. 3. Effect of cement and CKD addition on Atterberg limits of kaolinite clay

خمیری می‌تواند ناشی از افزایش مقدار آب موردنیاز برای فرایند هیدراسیون باشد. با توجه به این که شاخص پلاستیسیته خاک پایین است ($PI = 8$)، تغییرات ایجادشده در PI قابل توجه نمی‌باشد. با افزودن غبار کوره سیمان شاخص پلاستیسیته ابتدا کمی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. مشابه این روند در مطالعات محققین دیگر نیز گزارش شده‌است [۱۴ و ۱۵]. افزایش اولیه پلاستیسیته خاک با افزودن ۵ درصد CKD را می‌توان ناشی از بیشتر بودن سطح ویژه ذرات غبار کوره سیمان نسبت به خاک رس دانست. در مقادیر کم، CKD بین ذرات رس قرار گرفته و نفوذپذیری نمونه کاهش می‌یابد و به دنبال آن آب محصورشده توسط ذرات بیشتر می‌شود که منجر به افزایش ناچیز در شاخص پلاستیسیته خاک مخلوط با غبار کوره سیمان می‌گردد. با افزودن مقادیر بیشتر CKD، یون‌های دو ظرفیتی کلسیم جایگزین کاتیون‌های تک ظرفیتی موجود در رس می‌شوند و بار الکتریکی اطراف ذرات رس تغییر می‌کند. این امر منجر به افزایش جاذبه بین ذرات و به دنبال آن فلوکولاسیون و تجمع می‌شود و کاهش پلاستیسیته خاک را به دنبال دارد. کارایی خاک‌ها با کاهش شاخص پلاستیسیته، بهبود می‌یابد؛ بنابراین افزودن درصد بالای CKD باعث کارایی بهتر این خاک‌ها در حین ساخت می‌شود. با افزودن سیمان به خاک تولید محصولات سیمانی باعث تغییر بافت خاک شده و اندازه مؤثر دانه‌ها را افزایش می‌دهد در نتیجه مقدار رطوبت جذب‌شده به این ذرات کاهش یافته و پلاستیسیته خاک کمتر می‌شود. ۱۵ درصد سیمان شاخص پلاستیسیته خاک رس کائولینیت را حدود ۲۸ درصد کاهش داد.

در داخل کیسه پلاستیکی در دمای $23 \pm 1/7$ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا مدت عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه طی شود.

نمونه‌ها برای آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا در شرایط اشباع طبق استاندارد ASTM D1883 [۲۶] در قالب CBR با انرژی مشابه آزمایش تراکم استاندارد کوبیده شدند. سپس پس از ۷ روز عمل‌آوری در شرایط مشابه با نمونه‌های تک‌محوری، تحت بارگذاری قرار گرفتند.

جهت بررسی بیشتر تاثیر سیمان و غبار کوره سیمان بر ساختار و ساختمان خاک، نمونه خاک خالص و نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد سیمان و غبار کوره سیمان به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی ۵۰۰۰، تحت عکس‌برداری قرار گرفتند. نمونه‌ها پس از آماده‌سازی و اختلاط در درصد رطوبت بهینه در قالب تک‌محوری بازسازی شدند و به مدت ۲۸ روز در پوشش پلاستیکی در شرایط عمل‌آوری مشابه نمونه‌های آزمایش تک‌محوری قرار گرفتند. پس از دوره عمل‌آوری عکس‌برداری بر تکه‌ای به ابعاد حدود ۱ سانتی‌متر مکعب از وسط نمونه صورت گرفت.

۴- بیان و تحلیل نتایج

۴-۱- آزمایش حدود اتربرگ

نتایج آزمایش حدود اتربرگ در شکل ۳ نشان داده شده‌است. این مقادیر، میانگین نتایج آزمایش‌های حد روانی و حد خمیری بر ۳ نمونه از هر طرح اختلاط می‌باشد. با افزودن سیمان و غبار کوره سیمان حد روانی و حد خمیری افزایش می‌یابد. افزایش حد

جدول ۳. آنالیز آماری بر نتایج آزمون حدود اتربرگ

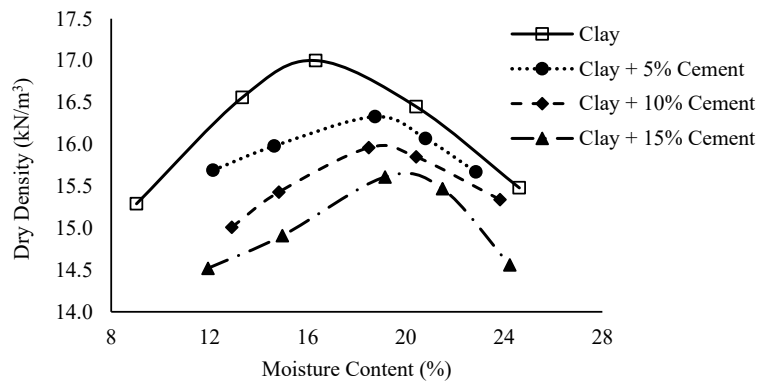
Table 3. Statistical analysis of results of Atterberg limits tests

آزمون	نتایج آزمون آنالیز واریانس				نتایج آزمون مقایسه گروهی							
		Adj. MS	F-Value	P-Value	Tukey-Kramer							
حد روانی	تثبیت کننده	۹۴/۲۲۶	۲۷/۲۱	۰/۰۰۰	CKD15	A						
				C15	۰/۱۷۱	CKD10	A	B				
				C10	۰/۶۵۴	CKD5	A	B				
				C5	۰/۶۰۶	C15	A	B				
				CKD15	۰/۰۰۰	C10	A	B				
				CKD10	۰/۰۰۴	C5		B				
				CKD5	۰/۰۲۹	Raw			C			
حد خمیری	تثبیت کننده	۱۷/۸۹	۹۹/۴۳	۰/۰۰۰	C15	A						
				C15	۰/۰۰۰	C10		B				
				C10	۰/۰۰۰	C5		B	C			
				C5	۰/۰۱۰	CKD15		B	C			
				CKD15	۰/۰۱۰	CKD10			C	D		
				CKD10	۰/۳۳۱	CKD5				D		
				CKD5	۰/۰۰۶	Raw					E	
شاخص پلاستیسیته	تثبیت کننده	۷/۷	۳۳/۲۹	۰/۰۰۰	CKD5	A						
				C15	۰/۰۰۰	CKD10	A					
				C10	۰/۰۰۰	CKD15	A					
				C5	۰/۰۰۴	Raw		B				
				CKD15	۰/۰۰۰	C5		B				
				CKD10	۰/۰۰۰	C10		B	C			
				CKD5	۰/۰۰۰	C15			C			

که نتیجه گیری شود یک پارامتر مؤثر خواهد بود در صورتی که هیچ تاثیر قابل ملاحظه ای رؤیت نشده باشد. مقدار p-value کمتر از ۰/۰۵ فرضیه صفر را نقض کرده و از لحاظ آماری این معنی را دارد که پارامتر مورد نظر تاثیر قابل ملاحظه دارد. اگر آزمون نشان دهد که میان تثبیت کننده ها تفاوت معنی داری وجود دارد، روش Tukey-Kramer به منظور مقایسه تمام جفت های ممکن استفاده می گردد که نتایج آن در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار گرفته است. در تمام جداول مربوط به آنالیز آماری برای خاک خالص از عبارت Raw، سیمان از C و غبار کوره سیمان از CKD استفاده شده است که عدد مربوط به درصد تثبیت کننده مورد استفاده نیز در مقابل آن بیان گردیده است.

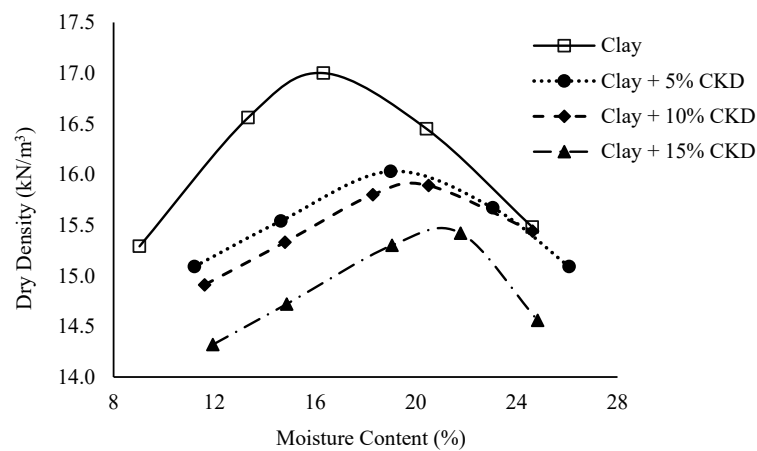
نتایج آنالیز آماری انجام شده بر نتایج آزمون حدود اتربرگ در جدول ۳ ارائه گردیده است. این نتایج با آنالیز آماری بر روی ۳ تکرار

همچنین در این مطالعه به منظور ارزیابی آماری تاثیر تثبیت کننده های به کار برده شده و بررسی اینکه آیا پارامترها و تعاملات آنها از نظر آماری قابل توجه می باشد یا خیر، یک تجزیه و تحلیل آماری صورت گرفت. برای این منظور، آنالیز واریانس چندگانه به همراه تکرار که به عنوان آزمون ANOVA چند عاملی نیز شناخته می شود مورد استفاده قرار گرفت. جهت انجام این مهم، بسته نرم افزاری Minitab نسخه سال ۲۰۱۸ مورد استفاده قرار گرفت. حد روانی، حد خمیری و شاخص پلاستیسیته به عنوان متغیرهای پاسخ انتخاب شد تا تاثیر تثبیت کننده ها بر خصوصیات پلاستیسیته خاک بررسی گردد. همچنین، سطح معنی داری ۰/۰۵ ($\alpha = 0.05$) برای بررسی فرضیه صفر (تمام نمونه ها از نظر آماری یکسان هستند) انتخاب شد. سطح اطمینان ۰/۰۵ به صورت معمول در تحلیل های آماری به کار می رود که نشان می دهد ۵ درصد ریسک وجود دارد



شکل ۴. منحنی آزمایش تراکم برای خاک ترکیب شده با درصدهای مختلف سیمان

Fig. 4. Moisture-density relationships of cement-treated soil



شکل ۵. منحنی آزمایش تراکم برای خاک ترکیب شده با درصدهای مختلف غبار کوره سیمان (CKD)

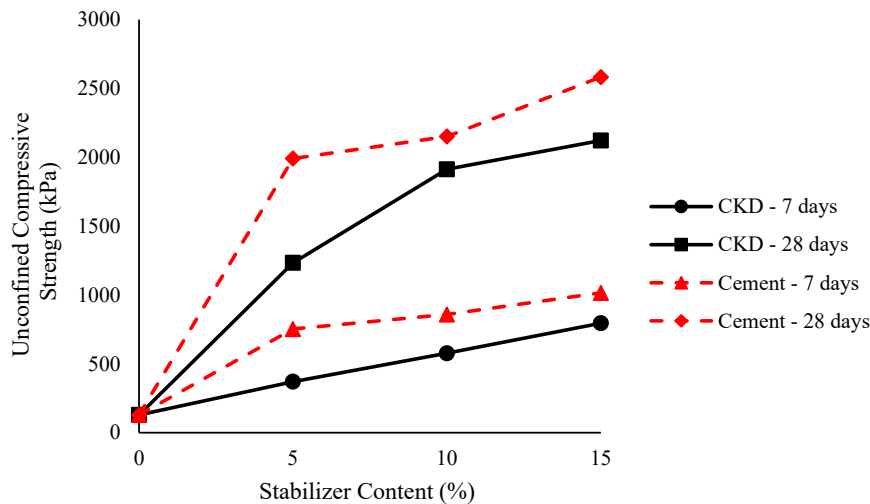
Fig. 5. Moisture-density relationships of CKD-treated soil

داده ($p\text{-value} < 0.05$) که این افزایش با افزودن درصد بیشتر غبار نیز افزایش یافته است. غبار کوره سیمان هم چنین توانسته به صورت معناداری حد خمیری خاک را افزایش دهد اما همان طور در قبل بحث شد این اثر کمتر از تاثیر سیمان است و در مقایسه گروهی ارائه شده پایین تر از سیمان در درصدهای مختلف قرار گرفته اند. در نتیجه همان طور که آنالیز آماری نتایج شاخص پلاستیسیته نشان داده افزودن غبار کوره سیمان شاخص پلاستیسیته را افزایش داده ولی با افزایش درصد این تثبیت کننده مقدار شاخص پلاستیسیته کاهش یافته که به خوبی در نتایج مقایسه گروهی قابل رؤیت است.

۴-۲- آزمایش تراکم

منحنی آزمایش تراکم برای نمونه های ترکیب شده با درصدهای مختلف سیمان و غبار کوره سیمان به ترتیب در شکل های ۴ و ۵ نشان

برای هر نمونه مورد ارزیابی قرار گرفت. در بررسی تاثیر تثبیت کننده سیمان در درصدهای مختلف نتایج نشان می دهد که سیمان بر حد روانی خاک اثر معنی داری نداشته است ($p\text{-value} > 0.05$). بر خلاف حد روانی افزودن سیمان به خاک به صورت قابل ملاحظه ای حد خمیری خاک را افزایش داده که این افزایش با زیاد شدن درصد سیمان نیز بیشتر گردیده است. مطابق نتایج حد روانی و حد خمیری همان طور که انتظار می رود افزودن سیمان به خاک به صورت قابل توجه شاخص پلاستیسیته خاک را کاهش داده است ($p\text{-value} < 0.05$) و افزودن درصد سیمان موجب افزایش این کاهش گردیده است که مربوط به تولید محصولات سیمانی در خاک می باشد. در جدول ۳ نتایج مربوط به تثبیت کننده غبار کوره سیمان نیز ارائه گردیده است. همان طور که آنالیز آماری نشان می دهد افزودن غبار کوره سیمان حد روانی خاک را به میزان قابل ملاحظه افزایش



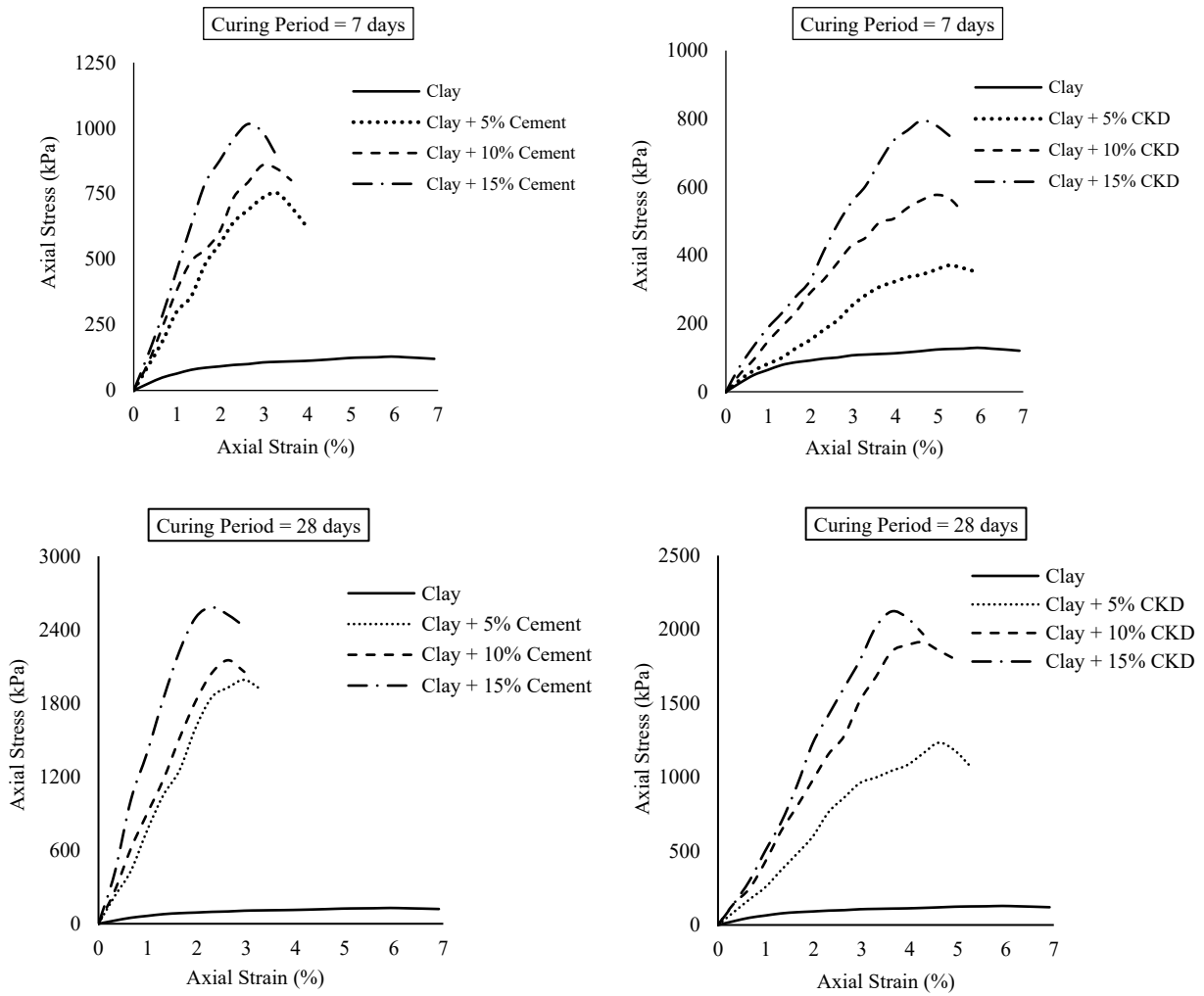
شکل ۶. تاثیر سیمان و غبار کوره سیمان (CKD) بر مقاومت فشاری محصورنشده نمونه‌ها در زمان‌های عمل‌آوری مختلف
 Fig. 6. Effect of addition of cement and CKD on UCS of kaolinite clay after 7 and 28 days curing

کوره سیمان افزایش یافته‌است و مقدار این افزایش در نمونه‌های حاوی سیمان بسیار بیشتر از نمونه‌های حاوی غبار کوره سیمان است؛ به طوری که مقاومت نمونه با ۱۵ درصد CKD تقریباً برابر با مقاومت نمونه با ۱۰ درصد سیمان پس از ۲۸ روز عمل‌آوری می‌باشد. مقاومت خاک رس کائولینیت (۱۲۹ کیلوپاسکال) با افزودن ۱۵ درصد سیمان به ۱۰۱۵ و با افزودن ۱۵ درصد CKD به ۷۹۵ کیلوپاسکال پس از ۷ روز عمل‌آوری می‌رسد. از منحنی‌های تنش-کرنش (شکل ۷) مشخص است که با افزودن سیمان و غبار کوره سیمان، کرنش متناظر با تنش محوری ماکزیمم کاهش یافته و رفتار خاک شکننده‌تر شده‌است؛ در نتیجه سختی نمونه‌ها به میزان قابل توجهی افزایش یافته‌است. بهبود خواص مهندسی خاک به دلیل استفاده از افزودنی‌های شیمیایی می‌تواند با دو واکنش اساسی توضیح داده شود: ۱- واکنش‌های کوتاه مدت شامل تعویض کاتیونی و فلوکولاسیون و ۲- واکنش‌های بلند مدت که واکنش پوزولانی نامیده می‌شود [۴ و ۲۸]. تولید محصولات سیمانی مانند کلسیم سیلیکات‌هیدرات (C-S-H) و کلسیم آلومینات‌هیدرات (C-A-H) از نتایج این واکنش‌های پوزولانی هستند. اندرکنش بین ترکیبات فلیایی در غبار کوره سیمان در حضور آب یک محیط با pH بالا ایجاد کرده که می‌تواند بخشی از ساختار رس را با حل کردن سیلیکات و آلومینای موجود در رس ناپایدار کند. این سیلیکا و آلومینای جدا شده از ساختار رس با کلسیم هیدروکسید ایجاد شده از واکنش‌های پوزولانی، ترکیب شده و ژل‌های ثانویه

داده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزودن سیمان و غبار کوره سیمان منجر به افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش دانسیته خشک حداکثر می‌شود. ۱۵ درصد سیمان و ۱۵ درصد CKD دانسیته خشک حداکثر خاک را از ۱۷ به ترتیب به ۱۵/۷ و ۱۵/۵ کیلونیوتن بر مترمکعب و مقدار رطوبت بهینه را از ۱۶/۲ به ترتیب به ۲۰ و ۲۱ درصد می‌رساند. افزایش رطوبت بهینه به دلیل ماهیت آب دوست بودن کلسیم‌اکسید است [۱۳]. هم‌چنین سطح مخصوص ذرات سیمان و CKD نسبت به سطح مخصوص ذرات خاک بیشتر است که در نتیجه آن به آب بیشتری جهت روغن کاری و ایجاد تراکم بهتر نیاز دارد. نمونه‌های حاوی سیمان دانسیته خشک حداکثر بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی غبار کوره سیمان دارند. فلوکولاسیون ذرات به دلیل حضور سیمان و CKD باعث ایجاد حفرات بزرگ‌تر می‌شود که کاهش دانسیته خشک حداکثر را به دنبال دارد. کاهش دانسیته خشک را می‌توان به کمتر بودن چگالی ویژه سیمان و CKD نسبت به چگالی ویژه خاک رس کائولینیت نیز نسبت داد.

۳-۴- آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده

شکل ۶ تاثیر سیمان و CKD را بر مقاومت فشاری محصورنشده پس از ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری نشان می‌دهد. برای هر نمونه نتایج مقاومت فشاری محصورنشده برای ۳ تکرار متوسط‌گیری شده و در این شکل ارائه گردید. مقاومت نمونه‌ها با افزودن سیمان و غبار



شکل ۷. منحنی تنش-کرنش نمونه‌های حاوی سیمان و غبار کوره سیمان (CKD) در آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده در دوره‌های عمل‌آوری مختلف

Fig. 7. Stress-strain curves of clay stabilized by cement and CKD after 7 and 28 days curing

مورد استفاده قرار گرفتند. سطح اطمینان $0.05/0.05$ ($\alpha = 0.05$) به‌منظور بررسی فرضیه صفر (تمام نمونه‌ها از نظر آماری یکسان هستند) انتخاب گردید. هم‌چنین به‌منظور مقایسه گروهی و تمام جفت‌های ممکن روش Tukey-Kramer استفاده گردید. جدول ۴ نتایج آنالیز آماری صورت‌گرفته بر نتایج آزمون مقاومت فشاری محصورنشده را نشان می‌دهد. برای هر نمونه ۳ تکرار به‌کار رفته در آنالیز مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق نتایج جدول ۴، اثر تثبیت‌کننده‌ها (سیمان و غبار کوره سیمان) در هر ۳ درصد (۵، ۱۰ و ۱۵) قابل‌ملاحظه بوده‌است. بر اساس نتایج روش Tukey-Kramer همه نمونه‌ها در عمل‌آوری ۷ روزه با هم اختلاف معناداری دارند اما پس از اعمال آنالیز آماری در نمونه‌های عمل‌آوری شده در ۲۸ روز ملاحظه گردید که نمونه تثبیت

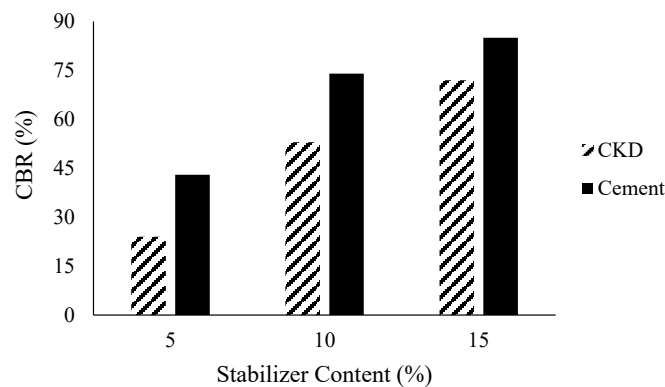
کلسیم سیلیکات‌هیدرات یا کلسیم‌آلومینات‌هیدرات را ایجاد می‌کند. این ترکیبات سیمانی تشکیل‌شده حجم فضاها را کاهش می‌دهد و ذرات خاک را به هم می‌چسباند. واکنش‌های پوزولانی وابسته به زمان و دما هستند؛ بنابراین با افزایش دوره عمل‌آوری فرایند هیدراسیون ادامه پیدا کرده و ترکیبات سیمانی بیشتری تولید می‌شود.

مطابق آنالیز آماری صورت‌گرفته بر نتایج حدود اتربرگ در بخش ۱-۴، در این بخش نیز آنالیز آماری بر نتایج آزمون‌های بررسی مقاومت خاک تثبیت‌شده با سیمان و غبار کوره سیمان صورت پذیرفت. مقاومت فشاری محصورنشده در سن عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه به‌عنوان متغیر پاسخ به‌منظور ارزیابی اثر تثبیت‌کننده‌ها بر خصوصیات ژئوتکنیکی

جدول ۴. آنالیز آماری بر نتایج آزمون مقاومت فشاری محصورنشده

Table 4. Statistical analysis of UCS test results

آزمون	نتایج آزمون آنالیز واریانس				نتایج آزمون مقایسه گروهی							
		Adj. MS	F-Value	P-Value	Tukey-Kramer							
مقاومت فشاری محصورنشده ۷ روزه	تثبیت کننده	۲۸۱۷۲۲	۲۰۲۶/۸۸	۰/۰۰۰	C15	A						
				C15	۰/۰۰۰	C10		B				
				C10	۰/۰۰۰	CKD15			C			
				C5	۰/۰۰۰	C5				D		
				CKD15	۰/۰۰۰	CKD10					E	
				CKD10	۰/۰۰۰	CKD5						F
				CKD5	۰/۰۰۰	Raw						G
مقاومت فشاری محصورنشده ۲۸ روزه	تثبیت کننده	۱۱۹۰۹۵۵۱	۱۷۵۵۹/۰۵	۰/۰۰۰	C15	A						
				C15	۰/۰۰۰	C10		B				
				C10	۰/۰۰۰	CKD15			B			
				C5	۰/۰۰۰	C5				C		
				CKD15	۰/۰۰۰	CKD10					D	
				CKD10	۰/۰۰۰	CKD5						E
				CKD5	۰/۰۰۰	Raw						F



شکل ۸. تاثیر سیمان و غبار کوره سیمان (CKD) بر مقدار نسبت باربری کالیفرنای نمونه‌ها پس از ۷ روز عمل‌آوری
Fig. 8. Effect of cement and CKD addition on CBR values of kaolinite clay after 7 days curing

آمده‌است. مقادیر ارائه‌شده در این شکل حاصل متوسط‌گیری نتایج آزمون برای سه تکرار در هر نمونه است. همانند مقاومت فشاری محصورنشده، افزودن سیمان و CKD نسبت باربری کالیفرنای نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. مقدار CBR خاک رس کائولینیت از ۳ درصد به ۴۳، ۷۴ و ۸۵ درصد به ترتیب برای نمونه‌ها با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد سیمان رسید. ۱۵ درصد غبار کوره سیمان، CBR خاک را ۲۴ برابر افزایش می‌دهد. افزایش نسبت باربری کالیفرنای مخلوط‌ها

شده با ۱۵ درصد غبار کوره سیمان با نمونه تثبیت شده با ۱۰ درصد سیمان، مقاومت فشاری محصورنشده برابری دارد.

۴-۴- آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا

آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا بر اساس مقاومت خاک در برابر نفوذ، ظرفیت باربری خاک را مشخص می‌کند. نسبت باربری کالیفرنیا در شرایط اشباع برای نمونه‌ها پس از ۷ روز عمل‌آوری در شکل ۸

جدول ۵. آنالیز آماری بر نتایج آزمون نسبت باربری کالیفرنیا

Table 5. Statistical analysis of CBR test results

آزمون	نتایج آزمون آنالیز واریانس				نتایج آزمون مقایسه گروهی							
		Adj. MS	F-Value	P-Value	Tukey-Kramer							
نسبت باربری کالیفرنیا ۷ روزه	تثبیت کننده	۲۶۱۲/۸۶	۱۴۳۷/۸۹	۰/۰۰۰	C15	A						
				C15	۰/۰۰۰	C10		B				
				C10	۰/۰۰۰	CKD15		B				
				C5	۰/۰۰۰	C5			C			
				CKD15	۰/۰۰۰	CKD10				D		
				CKD10	۰/۰۰۰	CKD5					E	
				CKD5	۰/۰۰۰	Raw						F

نشان می‌دهد که محصولات هیدراسیون با گذر زمان افزایش می‌یابند [۱۷].

۵- نتیجه‌گیری

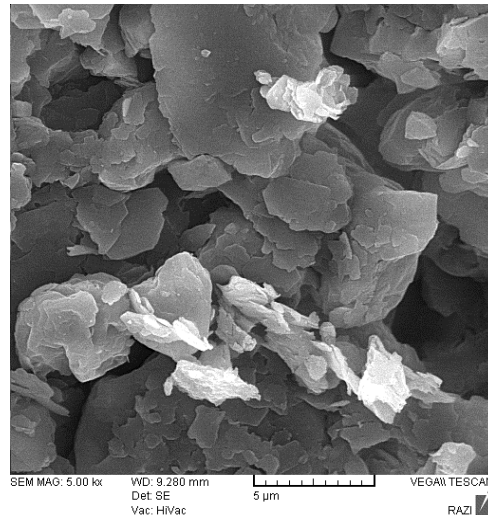
در این مقاله به بررسی و مقایسه پارامترهای ژئوتکنیکی خاک رس کائولینیت تثبیت شده با سیمان و غبار کوره سیمان (CKD) پرداخته شد. به این منظور پس از مخلوط خاک رس کائولینیت با ۵، ۱۰ و ۱۵٪ (نسبت به وزن خشک خاک) سیمان و CKD، آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم، مقاومت فشاری محصور نشده و نسبت باربری کالیفرنیا بر نمونه‌ها انجام شد. جهت بررسی اثر افزودنی‌ها بر ریزساختار خاک، نمونه‌ها به وسیله میکروسکوپ الکترونی مورد عکس‌برداری قرار گرفتند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد:

- افزودن سیمان و غبار کوره سیمان حد روانی و حد خمیری خاک رس را افزایش می‌دهد. با افزودن غبار کوره سیمان شاخص پلاستیسیته ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. تولید محصولات سیمانی در اثر افزودن سیمان باعث تغییر بافت خاک و اندازه مؤثر دانه‌ها شده و در نتیجه مقدار رطوبت جذب شده به این ذرات کاهش یافته و پلاستیسیته خاک کمتر می‌شود.
- سیمان و غبار کوره سیمان منجر به افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش دانسیته خشک حداکثر خاک رس کائولینیت می‌گردند. سطح مخصوص ذرات سیمان و CKD نسبت به سطح مخصوص ذرات خاک بیشتر است که در نتیجه آن به آب بیشتری جهت روغن کاری و ایجاد تراکم بهتر نیاز دارد.

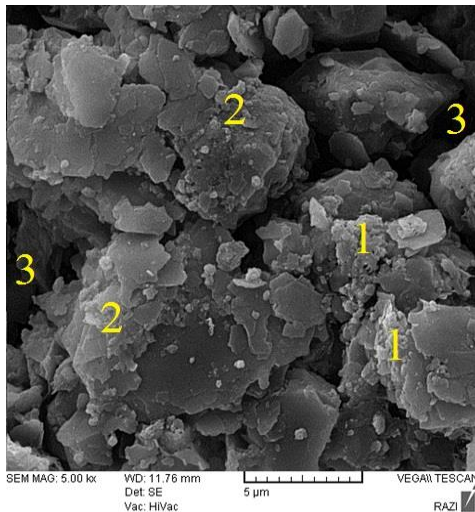
به دلیل تشکیل محصولات سیمانی و در نتیجه اتصال ذرات خاک و تثبیت کننده‌ها است که با بیشتر شدن مقدار افزودنی، این محصولات سیمانی بیشتر شده و مقدار CBR افزایش می‌یابد. جدول ۵ مطابق بخش ۳-۴ نتایج آنالیز آماری صورت گرفته بر نتایج آزمون نسبت باربری کالیفرنیا را نشان می‌دهد. برای هر نمونه ۳ تکرار به کار رفته در آنالیز مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق نتایج جدول ۵، اثر تثبیت کننده‌ها قابل ملاحظه بوده است. بر اساس نتایج روش Tukey-Kramer در عمل‌آوری ۷ روزه نمونه تثبیت شده با ۱۵ درصد غبار کوره سیمان با نمونه تثبیت شده با ۱۰ درصد سیمان، نسبت باربری مشابهی داشت.

۴-۵- آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی

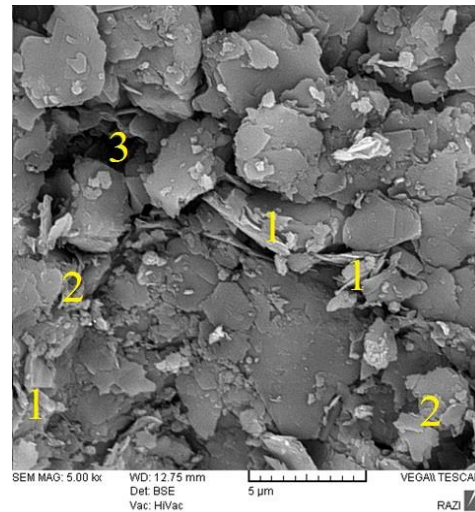
آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی بر سه نمونه خاک رس کائولینیت، خاک تثبیت شده با ۱۵ درصد سیمان و خاک حاوی ۱۵ درصد غبار کوره سیمان پس از ۲۸ روز عمل‌آوری انجام شد. همان‌طور که از شکل ۹-الف مشخص است خاک رس کائولینیت با آرایش ورقه‌ای دارای حفرات زیادی است. محصولات هیدراسیون ناشی از افزودن سیمان و غبار کوره سیمان، مطابق شکل ۹-ب و ۹-ج تخلخل بین ذرات را پر می‌کند و موجب اتصال ذرات خاک به یکدیگر می‌شود و ماتریس منسجم‌تری نسبت به نمونه خاک طبیعی از خود نشان می‌دهد. مقدار ژل تولید شده کلسیم سیلیکات هیدرات و کلسیم آلومینات هیدرات در نمونه حاوی سیمان بیشتر از نمونه تثبیت شده با CKD است و در نتیجه حفرات کمتری دارد. مطالعات



(الف)



(ج)



(ب)

شکل ۹. تصاویر میکروسکوپ الکترونی؛ الف) خاک رس کائولینیت، ب) خاک رس کائولینیت + ۱۵ درصد سیمان، ج) خاک رس کائولینیت + ۱۵ درصد غبار کوره سیمان. ۱) محصولات هیدراسیون، ۲ ساختار فلوکوله، ۳ حفرات

Fig. 9. Scanning electron micrograph of specimens (a) kaolinite clay (b) kaolinite clay+15% CKD (1. Hydration products, 2. Flocculation structure, 3. Voids)

ماتریس منسجم‌تری نسبت به نمونه خاک طبیعی از خود نشان دهند. با افزایش دوره عمل‌آوری فرایند هیدراسیون ادامه پیدا کرده و ترکیبات سیمانی بیشتری تولید می‌شود؛ بنابراین مقاومت فشاری محصورنشده نمونه‌ها با افزایش دوره عمل‌آوری افزایش می‌یابد.

• از منحنی‌های تنش-کرنش مشخص شد با افزودن سیمان و CKD، کرنش متناظر با تنش محوری ماکزیمم کاهش می‌یابد و رفتار خاک شکننده‌تر می‌شود؛ در نتیجه سختی نمونه‌ها به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. باید توجه داشت که در برخی موارد

• مقاومت فشاری محصورنشده و مقاومت CBR نمونه‌ها با افزودن سیمان و CKD افزایش می‌یابد و مقدار این افزایش در نمونه‌های حاوی سیمان بیشتر از نمونه‌های حاوی غبار کوره سیمان است. علت افزایش مقاومت با افزودن سیمان و CKD ناشی از تولید محصولات سیمانی مانند کلسیم‌سیلیکات‌هیدرات و کلسیم‌آلومینات‌هیدرات می‌باشد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد محصولات سیمانی حجم فضاها را کاهش داده و ذرات خاک را به هم متصل می‌کند و موجب می‌شود نمونه‌های تثبیت‌شده

- composition on cement stabilization, 17(2) (1967) 119-135.
- [9] R. Feiz, J. Ammenberg, L. Baas, M. Eklund, A. Helgstrand, R.J.J.o.C.P. Marshall, Improving the CO₂ performance of cement, part I: utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry, 98 (2015) 272-281.
- [10] A.M.J.J.o.C.P. Rashad, An exploratory study on high-volume fly ash concrete incorporating silica fume subjected to thermal loads, 87 (2015) 735-744.
- [11] F.M. Nejad, M. Habibi, P. Hosseini, H.J.J.o.C.P. Jahanbakhsh, Investigating the mechanical and fatigue properties of sustainable cement emulsified asphalt mortar, 156 (2017) 717-728.
- [12] Z.A.J.E.S. Baghdadi, Jeddah, Scientific Publication Center, King Abdul Aziz University, Utilization of kiln dust in clay stabilization, 2 (1990) 153-163.
- [13] Z. Baghdadi, M. Fatani, N.J.J.o.M.i.C.E. Sabban, Soil modification by cement kiln dust, 7(4) (1995) 218-222.
- [14] G.A. Miller, S.J.C. Azad, b. materials, Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust, 14(2) (2000) 89-97.
- [15] K. Carlson, F. Sariosseiri, B.J.G. Muhunthan, G. Engineering, Engineering properties of cement kiln dust-modified soils in Western Washington State, 29(5) (2011) 837-844.
- [16] R. Siddique, Waste materials and by-products in concrete, Springer Science & Business Media, 2007.
- [17] S. Peethamparan, J. Olek, J.J.C. Lovell, c. research, Influence of chemical and physical characteristics of cement kiln dusts (CKDs) on their hydration behavior and potential suitability for soil stabilization, 38(6) (2008) 803-815.
- [18] W.J. McCoy, R. W. Kriner, Use of waste kiln dust for soil Consolidation, Lehigh Portland Cement Co., Allentown, Pennsylvania, U.S.A., 1971
- [19] A.J. Alrubaye, M. Hasan, M.Y.J.I.J.o.G.E. Fattah, Stabilization of soft kaolin clay with silica fume and lime, 11(1) (2017) 90-96.
- [20] M. Kamon, S.J.J.o.g.e. Nontananandh, Combining در صورتی که تخلخل اولیه خاک زیاد است، مقاومت افزایش یافته که ناشی از سیمانته شدن می‌باشد با افزایش تنش به شدت کاهش می‌یابد و خاک رفتار نرم‌شونده از خود نشان می‌دهد که ناشی از درهم شکسته شدن ساختار خاک است. این نوع رفتار بیشتر تحت بارهای دینامیکی یا ضربه‌ای ایجاد می‌شود؛ بنابراین باید برای این نوع رفتار شکننده خاک تثبیت‌شده با سیمان و غبار کوره سیمان تدبیری اندیشید.
- نتایج نشان داد که مقاومت فشاری محصورنشده نمونه با ۱۵ درصد CKD تقریباً برابر با مقاومت نمونه با ۱۰ درصد سیمان پس از ۲۸ روز عمل‌آوری می‌باشد؛ بنابراین می‌توان از CKD به جای سیمان در تثبیت خاک‌های رسی استفاده کرد و مصرف سیمان را کاهش داد.
- ### مراجع
- [1] W.A. Dunlap, J.A. Epps, B. Biswass, B.M. Gallaway, United States Air Force Soil Stabilization Index System-A Validation, TEXAS A AND M UNIV COLLEGE STATION, 1975.
- [2] E. Basha, R. Hashim, H. Mahmud, A.J.C. Muntohar, b. materials, Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement, 19(6) (2005) 448-453.
- [3] A.A. Al-Rawas, A. Hago, H.J.B. Al-Sarmi, Environment, Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman, 40(5) (2005) 681-687.
- [4] M. Asgari, A.B. Dezfuli, M.J.A.J.o.G. Bayat, Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime, 8(3) (2015) 1439-1452.
- [5] S.H. Bahmani, B.B. Huat, A. Asadi, N.J.C. Farzadnia, B. Materials, Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement, 64 (2014) 350-359.
- [6] A. Herzog, J.K.J.H.R.R. Mitchell, Reactions accompanying stabilization of clay with cement, (36) (1963).
- [7] D. Bergado, L. Anderson, N. Miura, A. Balasubramaniam, Soft ground improvement in lowland and other environments, in, AsCE, 1996.
- [8] J.J.G. Croft, The influence of soil mineralogical

- ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.
- [25] ASTM D2166 / D2166M13-. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- [26] ASTM D99-1883. Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999.
- [27] F.M. Nejad, A. Modarres, Soil stabilization with waterproof cement for road applications. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 42 (1) (2010) 63-5.
- [28] J. Milburn, R. Parsons, Performance of soil stabilization agents, University of Kansas, Lawrence, 2014; Report no. K-TRAN: KU8-01
- industrial wastes with lime for soil stabilization, 117(1) (1991) 1-17.
- [21] ASTM D05-4318. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.
- [22] ASTM D11-2487. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [23] ASTM D02-854. Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002.
- [24] ASTM D00-698a. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Ghavami, H. Jahanbakhsh, F. Moghadas Nejad, *Laboratory study on stabilization of kaolinite clay with cement and cement kiln dust*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(4) (2020) 935-948.

DOI: [10.22060/ceej.2018.15100.5829](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.15100.5829)

