

بررسی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های رسی تثبیت شده با غبار کوره سیمان

عزیزه عبدی^۱ و روزبه دبیری^{۲*}

۱ و ۲- گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، تبریز

نویسنده مسئول: rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir *

نوع مقاله: کاربردی

دریافت: ۹۸/۱۲/۹ پذیرش: ۹۹/۳/۱۹

چکیده

در صورتی که خاک رس در محدوده اجرای پروژه مشاهده شود باعث بروز مشکلاتی از جمله تورم و بروز نشست‌های قابل توجه می‌شود. از سوی دیگر، روش‌های تقویت و بهبود خاک ضعیف را می‌توان به روش‌های مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی دسته‌بندی نمود. امروزه استفاده از مصالح قابل دسترس و باطله بمنظور جلوگیری از آلودگی محیط‌زیست جهت تثبیت مدنظر قرار گرفته که یکی از این نوع مصالح، غبار کوره سیمان بوده که یک محصول جانبی تولید شده از سیمان پرتلند است. در تحقیق حاضر، امکان تثبیت دو نوع خاک رسی بنتونیت و کائولن با استفاده از غبار کوره سیمان مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، غبار کوره سیمان با درصدهای ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ با خاک‌های رسی مخلوط گردیده و سپس به مدت‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عمل‌آوری انجام گرفته است. جهت ارزیابی رفتار ژئوتکنیکی خاک تثبیت شده آزمون‌های آزمایشگاهی حدود آتبرگ، تراکم استاندارد، مقاومت فشاری تک محوری، برش مستقیم و تحکیم انجام گرفته است. نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر نشان می‌دهد مقدار بهینه غبار کوره سیمان برابر ۳۰٪ در مدت عمل‌آوری برابر ۲۸ روز می‌باشد و بیش‌ترین تاثیرگذاری بر روی بنتونیت می‌باشد. همانطور که مشاهده گردید پس از تثبیت بنتونیت، شاخص خمیری ۶۵٪، شاخص فشردگی ۵۸٪، پتانسیل تورم ۷۵٪ کاهش یافته و وزن مخصوص خشک حداکثر به میزان ۸/۷٪، مقاومت فشاری تک‌محوری به اندازه ۳ برابر و مقاومت برشی در لحظه گسیختگی ۹/۴٪ نسبت به حالت تثبیت نشده افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: رس، غبار کوره سیمان، مقاومت برشی، تورم، تحکیم

۱- پیشگفتار

استفاده می‌شود، ولی هزینه‌های بالای مصالح مورد استفاده در ساخت و ساز، نیاز به استفاده از مواد قابل دسترس و باطله را بوجود آورده است. یکی از این نوع مصالح، غبار کوره سیمان (CKD=Cement kiln dust) است که امروزه استفاده از آن در بهسازی و تثبیت خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. 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 (بغدادی و رحمان، ۱۹۹۰؛ بغدادی و همکاران، ۱۹۹۵؛ میلر و آزاد، ۲۰۰۰). خاک‌های متورم شونده از جمله خاک‌های مشکل‌آفرین در پروژه‌های عمرانی محسوب می‌شود. تغییر حجم ناشی از تغییر رطوبت در آن‌ها همواره موجب بروز خسارات فراوانی به سازه‌ها و بناهای (کانال‌های آبیاری و زهکشی، دیوارهای حائل، بزرگراه‌ها و تونل‌ها) ساخته شده بر روی آن‌ها می‌شود. بنابراین باید با بکارگیری روش‌های مکانیکی و شیمیایی

خاک رس موجود در محل عملیات اجرایی پروژه‌ها، همواره بطور کامل برای تحمل بار سازه‌های مورد نظر مناسب نیست. خاک‌های رسی منشاء برخی از صدمات و آسیب‌ها به ساختمان‌ها هستند. بطوری که وقوع پدیده تورم و پایین بودن مقاومت برشی در آن‌ها می‌تواند سبب وقوع نشست در زیرسازه‌ها و صدمات جدی به آن‌ها وارد آورد. امروزه از روش‌های شیمیایی جهت بهسازی خاک‌های ریزدانه رسی استفاده می‌گردد. اساس این روش افزودن یک ماده شیمیایی یا مواد دیگر به خاک موجود است. برای رسیدن به اثر مطلوب در تثبیت شیمیایی، بایستی واکنش‌های شیمیایی بین ماده تثبیت کننده و مواد معدنی خاک مدنظر قرار گیرد. در حالت کلی مصالح تثبیت شده دارای مقاومت بیش‌تر، نفوذپذیری کمتر و نیز تراکم‌پذیری کمتری نسبت به خاک مادر هستند (ماکوسا، ۲۰۱۲). در روش‌های شیمیایی از مواد افزودنی (آهک و سیمان و غیره) برای تثبیت و بهسازی خاک‌ها

حرالر و پروون (۲۰۱۱)، اثر ترکیب الیاف و غبار کوره سیمان را بر روی تثبیت خاک مطالعه نمودند. آن‌ها دریافتند که افزودن الیاف و غبار کوره سیمان در افزایش مقاومت فشاری خاک تثبیت شده موثر می‌باشند. الکرگلی و جبور (۲۰۱۲) اثر *CKD* با مقادیر ۱۰ تا ۴۰ درصد را بر حد روانی خاک رس مورد ارزیابی قرار داد. مشاهدات آن‌ها حاکی از آن بود که افزودن غبار کوره سیمان به خاک ریزدانه سبب کاهش شاخص خمیری می‌گردد. در تحقیقی که توسط البسودا و سالم (۲۰۱۲) انجام گرفت، تاثیر غبار کوره سیمان بر روی ماسه بادی ارزیابی گردید. نتایج بدست آمده نشان داد با افزودن *CKD* وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش یافته و رطوبت بهینه افزایش یافته است. احمدی و همکارانش (۲۰۱۳) تاثیر خاکستر کوره سیمان بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که در خاک ماسه‌ای مورد بررسی، افزایش خاکستر کوره سیمان از ۰ تا ۱۲ درصد جهت تثبیت، افزایش دانسیته خشک حداکثر از ۱۸۳۰ تا ۲۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب را در پی داشته و پس از آن کاهش یافته است و درصد رطوبت بهینه به طور کلی با افزایش همراه بوده است. در کائولینیت، خاکستر کوره سیمان باعث بهبود دانسیته خشک و کاهش اندک رطوبت بهینه گردید. سالاودن و همکارانش (۲۰۱۴) ارزیابی مخلوط خاک منبسط شونده با غبار کوره سیمان برای ساخت و ساز قابل انعطاف راه‌ها را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که حداکثر وزن مخصوص خشک خاک مخلوط شده با *CKD* افزایش می‌یابد، این افزایش تا ۶ درصد مقدار *CKD* می‌باشد و پس از ۶ درصد با افزایش *CKD*، وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش می‌یابد. سینگ و جین (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای اثر *CKD* را بر روی خصوصیات خاک رس سست سیاه انجام دادند. ایشان با اضافه کردن ۳، ۸، ۱۳، ۱۸ و ۲۵ درصد غبار کوره سیمان به خاک مورد مطالعه دریافتند که با افزایش درصد *CKD* در خاک وزن مخصوص خشک حداکثر، *CBR*، مقاومت فشاری محدود نشده و نفوذپذیری افزایش یافته و رطوبت بهینه کاهش می‌یابد. عدی مختلف (۲۰۱۸)، تاثیر غبار کوره سیمان را بر روی میزان مقاومت فشاری و مشخصات مکانیکی ملات سیمان مطالعه نمود. آن‌ها دریافتند که مدت عمل‌آوری می‌تواند بر روی توانایی

خسارت‌های ناشی از تورم خاک‌ها را کاهش داد. در روش شیمیایی با افزودن موادی مانند آهک، سیمان یا خاکستر بادی به خاک متورم شونده و ایجاد یکسری واکنش شیمیایی در خاک از پتانسیل تورمی آن کاسته می‌شود. از سوی دیگر، غبار کوره سیمان تولید شده توسط کارخانه‌های تولید سیمان عمدتاً بر جای می‌ماند و انبار کردن باعث ایجاد شرایط آلودگی زیست‌محیطی می‌شود، بنابراین کاربرد این مواد در جهت تثبیت خاک می‌تواند در حفظ محیط‌زیست و مدیریت آن حائز اهمیت باشد. هدف اصلی در تحقیق حاضر، بررسی تاثیر شاخص خمیری بر روی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های رس تثبیت شده با غبار کوره سیمان است. بطوریکه محققان بدنبال روش‌هایی برای استفاده مجدد از مواد و مصالح باطله با نگرش به حفظ محیط‌زیست و صرفه اقتصادی در جهت بازگرداندن این مصالح به چرخه تولید و مصرف مجدد آن‌ها هستند. یکی از این نوع مصالح غبار کوره سیمان می‌باشد که از آسیاب‌های کارخانه تولید سیمان بدست می‌آید و مشابه با سیمان تولیدی است. هرچند که گرد و غبار جمع‌آوری شده معمولاً اندازه ذرات ریزتری دارد. غبار کوره‌های تولید سیمان از مواد فرار و نیمه کلسینه شده و خام تشکیل شده است. آنچه که باعث محدود شدن کاربرد غبار در صنعت سیمان می‌شود، مواد قلیایی فرار آن است (لیتل، ۲۰۰۰). توزیع دانه‌بندی غبار در واحدهای مختلف به طور عموم از صفر تا ۲۰۰ میکرون متغیر است. البته میزان کمی از غبار در محدوده بالای ۲۰۰ میکرون قرار دارد. در اکثر نمونه‌ها حدوداً ۸۰ درصد زیر ۴۵ میکرون بوده و ۲۰ درصد آن‌ها زیر ۴ میکرون است. برای کاربرد غبار، این موضوع عامل خوبی به حساب می‌آید، زیرا هرچه ذرات ریزتر باشند سطح مخصوص بیش‌تری دارند و سریع‌تر واکنش می‌دهند. همچنین اگر از غبار به عنوان پرکننده استفاده شود در اکثر فضاهای خالی قرار می‌گیرد (لیتل، ۲۰۰۰). در زمینه کاربرد غبار کوره سیمان در تثبیت خاک‌ها مطالعات مختلفی صورت گرفته است. بطوری‌که میلر و آزاد (۲۰۰۰) در مطالعات خود نشان دادند که با افزودن *CKD* به خاک، مقاومت فشاری محدود نشده افزایش می‌یابد و نرخ افزایش در خاک‌های با نشانه خمیری پایین زیاد است. همچنین با افزودن *CKD* شاخص خمیری خاک‌های با حالت خمیری متوسط تا زیاد کم می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

همچنان‌که در بخش‌های گذشته به آن اشاره گردید، هدف از تحقیق حاضر بررسی تاثیر شاخص خمیری بر روی ویژگی‌های ژئوتکنیکی و رفتاری خاک‌های رسی تثبیت شده با غبار کوره سیمان (*CKD*) است. غبار کوره سیمان از کارخانه سیمان صوفیان واقع در ۲۰ کیلومتری جاده تبریز- مرند تهیه شده است (شکل ۱). دو نوع خاک رس با شاخص‌های خمیری متفاوت از کارخانه صنایع چینی ایران در نزدیکی شهر مرند با نام‌های تجاری *ZMK2* و *ZWNK1-T1* تهیه گردید. منحنی دانه‌بندی مصالح مورد مطالعه طبق استاندارد *ASTM D421* و *ASTM D422* تعیین گردید که در شکل (۲) می‌توان مشاهده نمود. خصوصیات خمیری آن‌ها طبق استاندارد *ASTM D4318-95a* و چگالی ویژه نیز طبق استاندارد *ASTM D854* اندازه‌گیری شده است (جدول ۱). براساس سیستم طبقه‌بندی متحد، خاک‌های رسی *ZWNK1-T1* و *ZMK2* به ترتیب از نوع *CH* و *CL* می‌باشند. خصوصیات شیمیایی و درصد وزنی عناصر موجود در آن‌ها طبق جدول (۲) قابل مشاهده است.

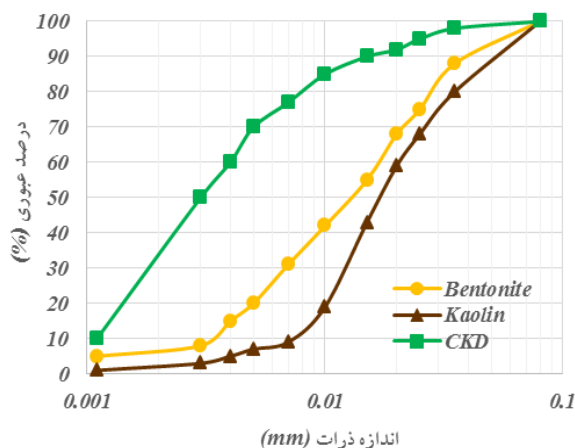
باربری ملات تاثیرگذار باشد. هم‌چنین افزودن ۲۰ درصد غبار کوره سیمان سبب بهبود خصوصیات مکانیکی ملات سیمان گردد. آدیانجو و اوککه (۲۰۱۹) مطالعه‌ای را در زمینه تثبیت خاک رس با استفاده از غبار کوره سیمان انجام دادند. نتایج بدست آمده حاصل از آزمایش تراکم و نسبت باربری کالیفرنیا نشان داد افزودن ۱۰ درصد غبار کوره سیمان به همراه عمل‌آوری ۷ روزه تاثیر مثبت در بهبود توانایی باربری خاک رس اصلاح شده دارد. در تحقیق حاضر، به بررسی تاثیر تغییرات شاخص خمیری بر روی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های رس تثبیت شده با غبار کوره سیمان پرداخته می‌شود. با مشاهده مطالعات صورت گرفته می‌توان دریافت تاثیر تغییرات شاخص خمیری در خاک‌های رسی و اثر عمل‌آوری و مدت زمان آن بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های رسی تثبیت شده همچون تغییرات مدول الاستیسیته، کرنش محوری در لحظه گسیختگی حاصل از آزمایش تک‌محوری و چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی بدست آمده از آزمون برش مستقیم به همراه ارزیابی نشست تحکیمی آن‌ها انجام نگرفته است که از جنبه‌های های نوآوری تحقیق حاضر بشمار می‌آید که در ادامه به شرح آن پرداخته شده است.



شکل ۱. محل تهیه غبار کوره سیمان (*CKD*) از کارخانه سیمان صوفیان واقع در ۲۰ کیلومتری جاده تبریز- مرند.

جدول ۱. ویژگی‌های ژئوتکنیکی مصالح مورد مطالعه.

خصوصیات ژئوتکنیکی	کاتولن <i>ZMK2</i>	بتونیت <i>ZWNK1-T1</i>
<i>PI</i>	۱۱	۵۷
<i>Gs</i>	۲/۶۵	۲/۷۵



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مصالح مورد مطالعه در تحقیق حاضر

جدول ۲. خصوصیات شیمیایی و درصد وزنی عناصر خاک‌های رسی مورد مطالعه (کارخانه چینی مرند)

غبار کوره سیمان (CKD)	درصد وزنی عناصر در کائولن	درصد وزنی عناصر در بنتونیت	ماده تشکیل دهنده
۷۹/۱۲	۷۴	۶۵	SiO_2
۵/۳	۱۵	۲۳	Al_2O_3
۲/۴۲	۰/۴۵	۰/۶۵	Fe_2O_3
-	۰/۰۴	۰/۰۵	TiO_2
۱۰/۴۳	۱/۵	۱/۷	CaO
۱/۲۵	۰/۴	۰/۴۵	MgO
۰/۰۳	۰/۳۵	۰/۴	Na_2O
۰/۷۴	۰/۳	۰/۵	K_2O
-	-	-	SO_4

طبق استاندارد *ASTM D4318-95a* و در ادامه آزمون تراکم آزمایشگاهی طبق استاندارد *ASTM D698* انجام گرفت. برای تعیین پارامترهای رفتاری خاک‌های رسی تثبیت شده با غبار کوره سیمان، در مرحله اول، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری طبق استاندارد *ASTM D2166* صورت پذیرفت. در این آزمایش نمونه‌ها براساس رطوبت بهینه با قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر تهیه شده و بارگذاری با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. در مرحله دوم، آزمون برش مستقیم طبق استاندارد *ASTM D3080-11* بر روی نمونه‌های با ابعاد 10×10 سانتی‌متر مربع بصورت کنترل کرنش صورت گرفته است. بطوری‌که ابتدا نمونه‌ها با رطوبت بهینه تهیه شده و پس از انجام عملیات اشباع و تحکیم، بارگذاری تحت اثر تنش‌های قائم ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال و با سرعت ۰/۰۵ میلی‌متر بر دقیقه آزمایش انجام گرفت. در مرحله سوم، برای بررسی تاثیر غبار کوره سیمان بر روی نشست تحکیم و درصد تورم

در تحقیق حاضر، دو نوع خاک رس با شاخص‌های خمیری متفاوت با غبار کوره سیمان با درصدهای ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ مخلوط گردیده‌اند تا امکان بهبودی خصوصیات رفتاری و ژئوتکنیکی خاک تثبیت شده مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. طبق استاندارد *ASTM C618* هنگامی که میزان مجموع عناصر $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ حداقل برابر ۷۰٪ و SO_3 حداکثر برابر ۴٪ باشد رفتار پوزولانی و سیمانی شده بوجود خواهد آمد. طبق جدول (۲) مشاهده می‌گردد مصالح مورد استفاده دارای خاصیت پوزولانی هستند. بنابراین، برای تهیه نمونه‌ها، ذرات غبار کوره سیمان با خاک‌های رسی با درصدهای مشخص شده مخلوط گردیده و سپس به مقدار رطوبت بهینه به آن‌ها آب اضافه شده و در زمان‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در ظرفی بسته نگهداری شده و تحت شرایط دمایی محیط عمل‌آوری شده‌اند. سپس جهت بررسی تاثیر غبار کوره سیمان بر خصوصیات خمیری نمونه‌های عمل‌آوری شده مورد مطالعه، ابتدا آزمون حدود آتربرگ

می‌توان دریافت در حالت کلی افزودن غبار کوره سیمان به همراه عمل‌آوری سبب کاهش شاخص خمیری شده است. در شکل (۳-الف) مشاهده می‌شود زمانی‌که که به بنتونیت ۳۰ درصد غبار CKD افزوده می‌شود، پس از عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه شاخص خمیری به ترتیب به مقدار ۴۹٪، ۵۶٪ و ۶۵٪ نسبت به حالت اصلاح نشده کاسته شده و طبق شکل (۳-ب) زمانی‌که به همان میزان مشابه غبار CKD با کائولن مخلوط گردیده، پس از عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه شاخص خمیری نسبت به حالت خالص به ترتیب ۳۶٪، ۳۹٪ و ۴۵٪ کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به دو نوع خاک رس مورد مطالعه در تحقیق حاضر می‌توان بیان کرد غبار کوره سیمان در بنتونیت بعد از انجام عمل‌آوری دارای تاثیر گذاری بیش‌تری بر کاهش خصوصیات خمیری در مقایسه با کائولن دارد.

خاک‌های رسی تثبیت شده مورد مطالعه، آزمایش تحکیم طبق استاندارد *ASTM D2435* صورت پذیرفت. بدین منظور، ابتدا نمونه‌های خاک رسی حاوی ذرات غبار کوره سیمان در قالب آزمایش ریخته شده و سپس عمل‌آوری بر روی آن‌ها مشابه شرایطی که در بالا به آن اشاره انجام گردیده است. برنامه آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی نمونه‌های مورد مطالعه مطابق جدول (۳) قابل مشاهده است. لازم بذکر است جهت ارزیابی صحت نتایج ۲۵ درصد از مجموع آزمایش‌ها دوباره تکرار شده است.

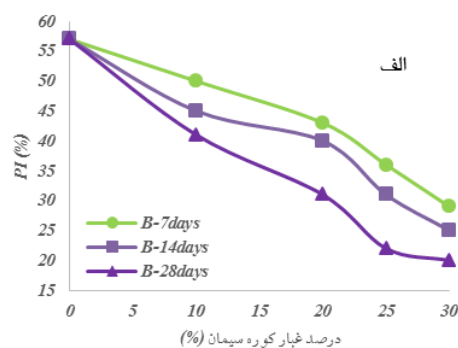
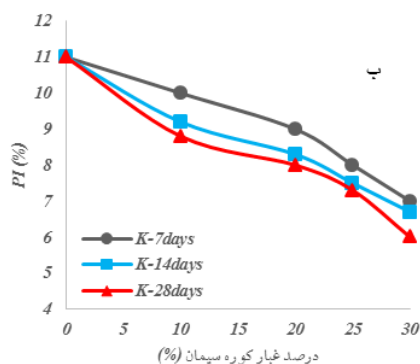
۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج حاصل از آزمایش حدود آتربرگ

نتایج حاصل از تاثیر غبار کوره سیمان در درصد‌های وزنی مختلف بر خصوصیات خمیری نمونه‌های خاک‌های رسی مورد مطالعه پس از انجام عمل‌آوری در شکل (۳ الف و ب) نشان داده شده است. با توجه به نمودارها

جدول ۳. برنامه آزمون‌های صورت گرفته بر روی نمونه‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر

ردیف	نام نمونه	ماتریس خاک	CKD (%)	آزمایش‌های انجام یافته		
				حدود آتربرگ	تراکم	تک محوری
۱	B-0	رس بنتونیت	۰	*	*	*
۲	B-10	رس بنتونیت	۱۰	*	*	*
۳	B-20	رس بنتونیت	۲۰	*	*	*
۴	B-25	رس بنتونیت	۲۵	*	*	*
۵	B-30	رس بنتونیت	۳۰	*	*	*
۶	K-0	رس کائولن	۰	*	*	*
۷	K-10	رس کائولن	۱۰	*	*	*
۸	K-20	رس کائولن	۲۰	*	*	*
۹	K-25	رس کائولن	۲۵	*	*	*
۱۰	K-30	رس کائولن	۳۰	*	*	*

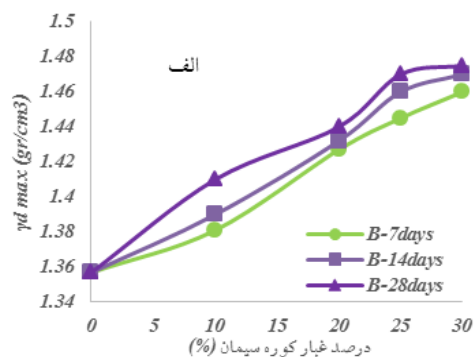
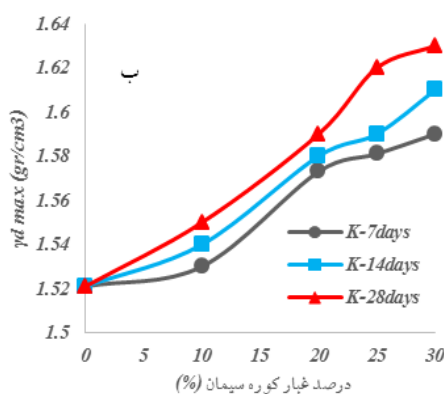


شکل ۳. تاثیر غبار کوره سیمان و مدت زمان عمل‌آوری بر روی شاخص خمیری: الف- بنتونیت، ب- کائولن.

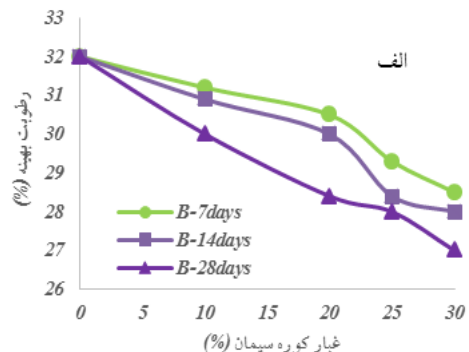
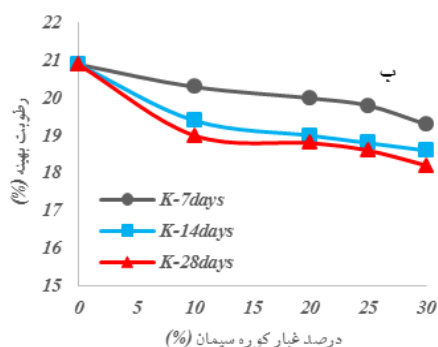
هم‌چنین طبق شکل (۵-الف وب) تاثیر غبار CKD بر میزان رطوبت بهینه خاک‌های رسی تثبیت شده قابل مشاهده است. نتایج بدست آمده نشان داده افزودن غبار کوره سیمان در نمونه‌های مورد مطالعه سبب کاهش مقدار رطوبت بهینه شده است. بطوری‌که با افزودن ۳۰٪ وزنی CKD به خاک‌های بنتونیت و کائولن با ۲۸ روز عمل آوری، مقدار رطوبت بهینه به ترتیب به مقدار ۱۶٪ و ۱۲/۹٪ نسبت به نمونه‌های تثبیت نشده کاهش یافته است. نتایج بدست آمده همسو با پژوهش‌های صورت گرفته قبلی می‌لر و آزاد (۲۰۰۰) و آدیانجو اوکپکه (۲۰۱۹) است. اگرچه نتایج کلی بدست آمده در مورد اثرات CKD بر ویژگی‌های تراکم نمونه‌های رسی مورد مطالعه در این تحقیق با آنچه که توسط سینگ و جین (۲۰۱۵) بر روی رس سیاه گزارش شده با توجه به نوع کانی رس ایلیت کاملاً برعکس می‌باشد.

۳-۲- نتایج حاصل از آزمایش تراکم

در حالت کلی می‌توان دریافت با افزایش میزان غبار CKD در خاک‌های رسی، مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر (γ_{dmax}) یک روند رو به رشد را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل (۴-الف) نشان داده شده است، در خاک بنتونیت با شاخص خمیری بالا، زمانی‌که با ۳۰٪ غبار CKD مخلوط می‌شود، وزن مخصوص خشک حداکثر خاک تثبیت شده پس عمل‌آوری‌های ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب به میزان ۷/۱۶٪، ۸/۳۳٪ و ۸/۷٪ افزایش می‌یابد و این روند در کائولن طبق نمودارهای شکل (۴-ب) به ترتیب برابر با ۴/۵٪، ۵/۸۵٪ و ۷/۲٪ است. بنابراین مشابه حالت قبل مشاهده می‌گردد غبار CKD در خاک رسی با خاصیت خمیری بزرگ‌تر تاثیرگذارتر است.



شکل ۴. تاثیر غبار کوره سیمان و زمان عمل‌آوری بر وزن مخصوص خشک حداکثر، الف- بنتونیت، ب- کائولن



شکل ۵. تاثیر غبار کوره سیمان و مدت زمان عمل‌آوری بر رطوبت بهینه خاک، الف- بنتونیت، ب- کائولن.

کائولن در مقایسه با نمونه رسی بنتونیت دارای مقدار بیش‌تری است. هم‌چنین، در خاک بنتونیت با افزایش درصد غبار CKD، توانایی باربری در نمونه‌های تثبیت

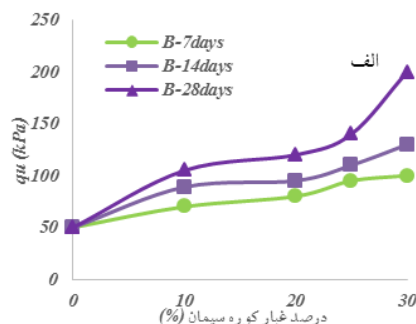
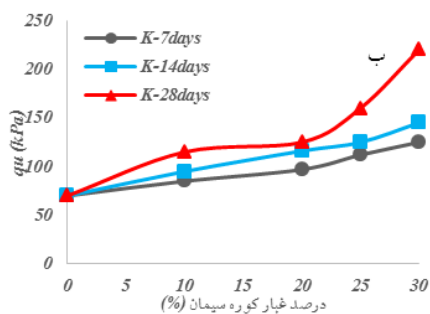
۳-۳- نتایج حاصل از آزمایش تک‌محوری

همانطور که در شکل (۶-الف) نشان داده شده، در حالت تثبیت نشده، مقاومت فشاری در لحظه گسیختگی خاک

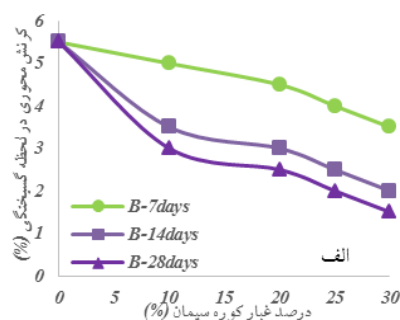
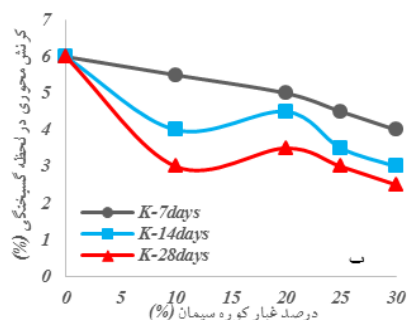
تاثیر دارد. بطوریکه روند تغییرات متفاوت با مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری در لحظه گسیختگی است. در هر دو نوع خاک رسی مورد مطالعه در مدت عمل‌آوری ۱۴ و ۲۸ روزه با افزایش درصد غبار CKD تا ۱۰٪، میزان کرنش محوری در لحظه گسیختگی کاهش یافته و سپس با رسیدن میزان غبار به ۲۰٪، کرنش محوری مجدداً افزایش می‌یابد. در انتها، با رسیدن غبار CKD به ۳۰٪، کرنش محوری در لحظه گسیختگی کاهش می‌یابد. البته در مدت عمل‌آوری ۷ روزه نمونه‌های تثبیت شده با افزایش مقدار غبار کوره سیمان کرنش محوری در لحظه گسیختگی کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به نتایج می‌توان بیان کرد در خاک بنتونیت با شاخص خمیری بالا حاوی ۳۰٪ غبار کوره سیمان باعث بوجود آمدن کمترین میزان شکل‌پذیری می‌شود.

شده افزایش یافته است. اگرچه زمان عمل‌آوری سبب افزایش بیش‌تر توانایی باربری نسبت به حالت تثبیت نشده گردیده است. میزان افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری در نمونه‌های تثبیت شده بنتونیت هنگام افزودن ۳۰٪ وزنی غبار CKD در مدت عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب ۱، ۱/۶ و ۳ برابر شده است. این روند طبق نمودارهای شکل (۶-ب) در خاک کائولن نیز مشاهده می‌گردد. زمانی که ۳۰٪ وزنی غبار CKD به خاک کائولن اضافه شده در مدت عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مقاومت به ترتیب ۰/۷۸، ۱/۰۷ و ۲/۱ برابر افزایش یافته است. نتایج بدست آمده نشان‌دهنده آن است غبار CKD بر روی خاک بنتونیت با شاخص خمیری بالا بیش‌تر تاثیرگذار می‌باشد که مشابه با مشاهدات انجام یافته توسط آدیانجو و اوکپکه (۲۰۱۹) است.

طبق نمودارهای شکل (۷-الف و ب) مشاهده می‌شود غبار CKD بر میزان کرنش محوری در لحظه گسیختگی



شکل ۶. تاثیر غبار کوره سیمان و مدت زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری تک‌محوری در لحظه گسیختگی، الف- بنتونیت، ب- کائولن.

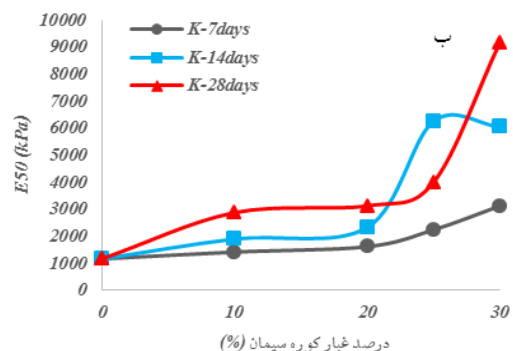


شکل ۷. تاثیر غبار کوره سیمان و مدت زمان عمل‌آوری بر کرنش محوری در لحظه گسیختگی، الف- بنتونیت، ب- کائولن.

(E_{50}) تعیین گردید و در شکل (۸-الف و ب) نمایش داده شده است. با توجه به نمودارها مشاهده می‌شود در هر دو نوع خاک رسی، در مدت عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه با افزایش درصد وزنی غبار CKD مقدار مدول سکانت و

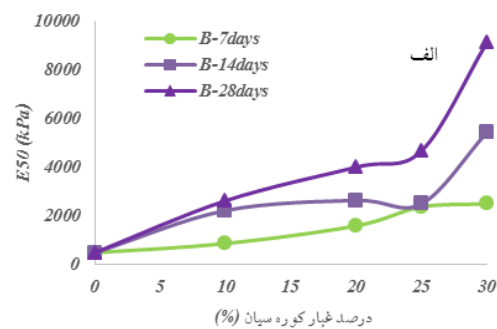
جهت بررسی و ارزیابی اثر غبار کوره سیمان بر میزان شکل‌پذیری نمونه‌های خاک رس با شاخص خمیری متفاوت، با استفاده از منحنی تنش-کرنش بدست آمده از آزمون تک‌محوری، مدول تغییر شکل سکانت نمونه‌ها

مدول سکانت افزایش و سپس در ۳۰٪ وزنی غبار کوره سیمان کاهش یافته است. با مقایسه نمودارهای شکل‌های (۷-الف و ب) و (۸-الف و ب) دیده می‌شود روند تغییرات دو پارامتر مدول تغییر شکل سکانت و کرنش محوری در لحظه گسیختگی برعکس هم می‌باشند که نشان از صحت نتایج دارد.



شکل ۸. تاثیر غبار کوره سیمان و مدت زمان عمل‌آوری بر مدول سکانت (E_{50})، الف- بنتونیت، ب- کائولن.

شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. ولی در مدت عمل‌آوری ۱۴ روزه، طبق نمودار شکل (۷-الف) مشاهده گردید در خاک بنتونیت با افزایش غبار کوره سیمان تا ۲۰٪ شکل‌پذیری افزایش، سپس در مقدار ۲۵٪ CKD مدول سکانت کاهش و در انتها با ۳۰٪ غبار کوره سیمان شکل‌پذیری افزایش یافته است. در خاک کائولن، همانطور که در شکل (۷-ب) مشاهده می‌شود تا ۲۵٪ غبار CKD



خاک رسی در مدت ۲۸ روزه، نتایج بدست آمده نشان می‌دهد، با افزایش درصد غبار کوره سیمان در خاک‌های بنتونیت و کائولن تا ۳۰٪، میزان زاویه اصطکاک داخلی در آن‌ها به ترتیب تا ۳۳٪ و ۱۹/۲٪ افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود غبار کوره سیمان در خاک بنتونیت با شاخص خمیری بالا دارای تاثیرگذاری بیش‌تری در مقایسه با کائولن است.

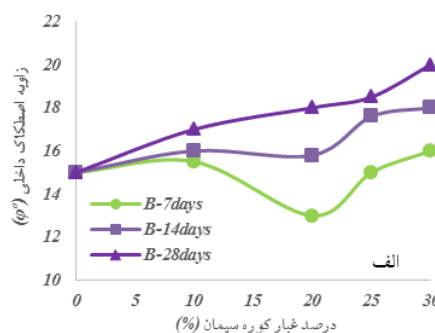
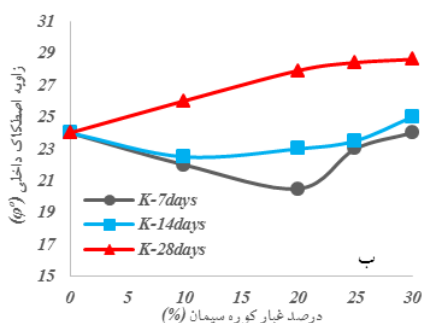
مطابق با شکل (۱۰-الف و ب) تاثیر غبار کوره سیمان را بر روی میزان چسبندگی خاک‌های رسی با شاخص‌های خمیری متفاوت مورد مطالعه را می‌توان مشاهده نمود. در حالت تثبیت نشده، خاک بنتونیت دارای مقدار چسبندگی بالایی در مقایسه با خاک کائولن است. مشابه با زاویه اصطکاک داخلی، شاخص خمیری، مدت زمان عمل‌آوری و درصد غبار کوره سیمان بر روی میزان چسبندگی نمونه‌های مورد مطالعه تاثیرگذار است. در شکل (۱۰-الف) نشان داده شده در حالت کلی با افزایش درصد حضور غبار CKD میزان چسبندگی کاهش یافته است. اگرچه مدت عمل‌آوری می‌تواند سبب افزایش در میزان چسبندگی شود. با رسیدن میزان غبار کوره سیمان تا ۳۰ درصد در خاک بنتونیت، در مدت‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه میزان چسبندگی به ترتیب ۳۳/۳٪، ۳۰٪ و ۲۷٪ کاسته شده است. این روند نشان‌دهنده آن

۳-۴- نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم

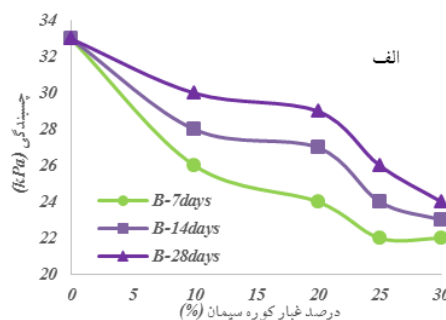
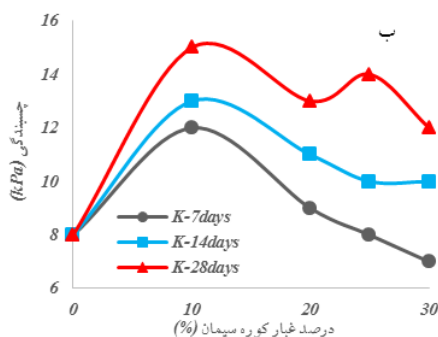
تغییرات میزان زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های تثبیت شده در شکل (۹-الف و ب) نشان داده شده است. با توجه به نمودارها مشاهده می‌شود در حالت تثبیت نشده، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) کائولن دارای مقدار بیش‌تری در مقایسه با بنتونیت بوده و شاخص خمیری و مدت زمان عمل‌آوری و درصد وزنی غبار کوره سیمان بر زاویه اصطکاک داخلی تاثیرگذار است. در مدت عمل‌آوری ۷ روزه با افزایش میزان CKD به ۲۰٪، در خاک کائولن مقدار ϕ تا ۱۴/۶٪ کاهش یافته و در خاک بنتونیت زاویه اصطکاک داخلی با رسیدن غبار کوره سیمان تا ۱۰٪ ابتدا اندکی افزایش و سپس با رسیدن مقدار CKD به ۲۰٪ تا ۱۳/۳٪ کاسته شده است. در مدت عمل‌آوری ۱۴ روزه نتایج مطالعه نشان می‌دهد، در خاک بنتونیت زمانی که ۱۰٪ غبار افزوده می‌شود اندکی در ϕ افزایش بوجود پیوسته و در ادامه با رسیدن CKD به ۲۰٪، در ϕ کاهش مشاهده شده ولی با افزایش غبار کوره سیمان تا ۳۰٪ زاویه اصطکاک داخلی تا ۲۰٪ نسبت به حالت تثبیت نشده افزایش یافته است. در خاک کائولن، با افزایش غبار CKD تا ۱۰٪ اندکی کاهش در زاویه اصطکاک اتفاق افتاده ولی با رسیدن CKD تا ۳۰٪ مقدار ϕ تا ۴/۲٪ افزایش می‌یابد. پس از عمل‌آوری نمونه‌های

شده ولی در مدت‌های عمل‌آوری ۱۴ و ۲۸ روزه نسبت به حالت تثبیت نشده دارای مقدار بیش‌تری می‌باشند. این مقدار به ترتیب ۲۵٪ و ۵۰٪ افزایش نسبت به حالت تثبیت نشده است. نتایج نشان می‌دهند که افزودن غبار *CKD* به خاک‌های رسی با خصوصیات خمیری مختلف تاثیر متفاوتی را می‌تواند ارائه نماید.

است که رفتار خاک ترد و شکننده است. در شکل (۱۰-ب) مشاهده شد، هنگامی که در خاک کائولن با ۱۰٪ غبار *CKD* مخلوط می‌شود، افزایش نسبی در میزان چسبندگی بوجود می‌آید. میزان افزایش در مدت زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب ۵۰٪، ۲۵٪ و ۸۷/۵٪ است. در ادامه با افزایش مقدار غبار کوره سیمان تا ۳۰ درصد، یک کاهش در چسبندگی ایجاد



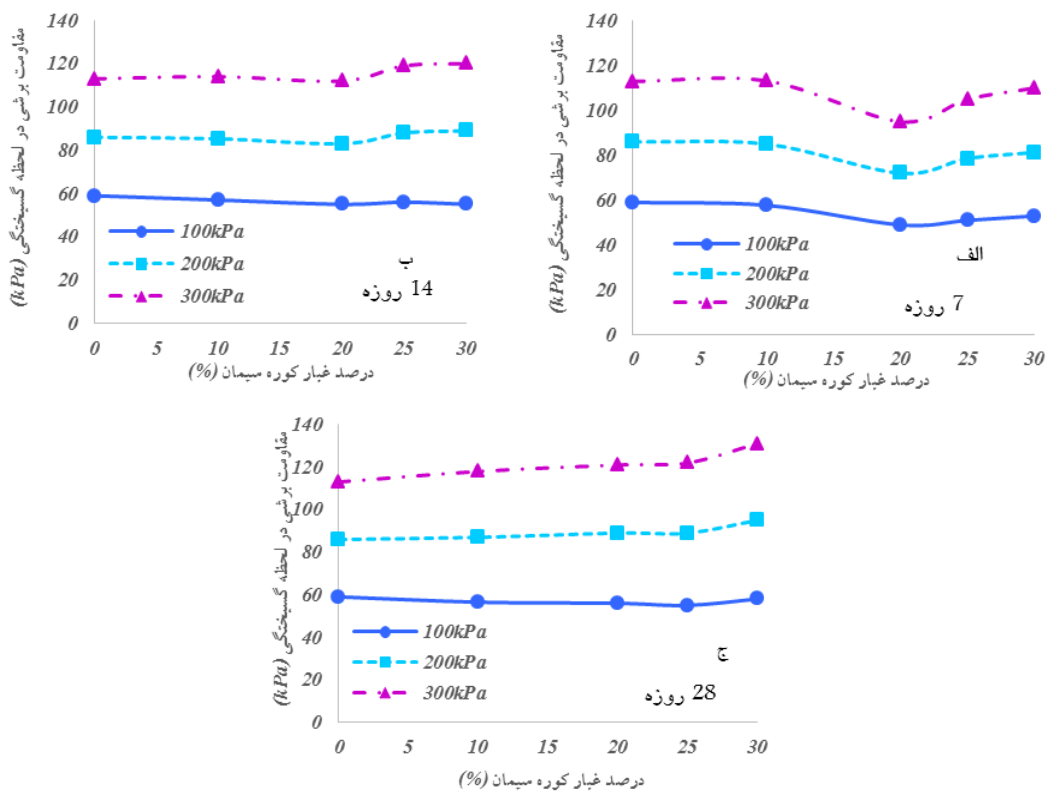
شکل ۹. تاثیر غبار کوره سیمان و مدت زمان عمل‌آوری بر زاویه اصطکاک داخلی، الف- بنتونیت، ب- کائولن.



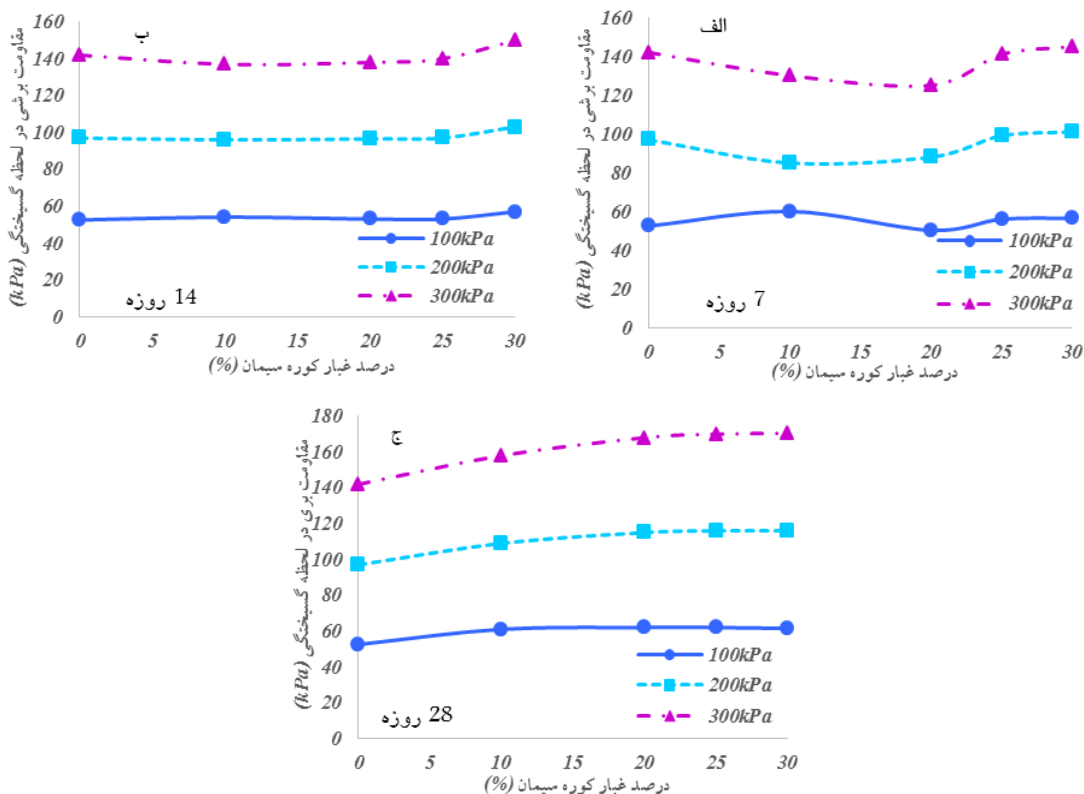
شکل ۱۰. تاثیر غبار کوره سیمان و مدت زمان عمل‌آوری بر چسبندگی، الف- بنتونیت، ب- کائولن.

CKD مشاهده می‌شود توانایی باربری افزایش می‌یابد ولی از حالت تثبیت نشده کمتر است. در زمان عمل‌آوری ۱۴ روزه، افزودن *CKD* تا مقدار ۲۰٪ تاثیر محسوسی در افزایش مقاومت برشی تمام تنش‌های قائم ارائه نمی‌دهد. در ادامه، زمانی که مقدار غبار کوره سیمان به ۳۰٪ می‌رسد مقاومت برشی در لحظه گسیختگی بطور میانگین ۳/۵۵٪ بالا می‌رود. در نمونه‌های بنتونیت عمل‌آوری شده در ۲۸ روز مشاهده می‌شود، با افزایش درصد غبار کوره سیمان، مقاومت برشی افزایش می‌یابد. بطوری که با رسیدن *CKD* به ۳۰٪، مقاومت برشی در تمامی تنش‌های قائم به طور میانگین ۹/۴٪ نسبت به حالت تثبیت نشده افزایش می‌یابد.

تاثیر غبار کوره سیمان بر روی مقاومت برشی در لحظه گسیختگی نمونه خاک‌های بنتونیت و کائولن تحت تنش‌های قائم ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال به ترتیب در شکل‌های (۱۱-الف، ب و ج) و (۱۲-الف، ب و ج) نشان داده شده است. با توجه به نمودارها می‌توان دریافت در حالت تثبیت نشده، مقاومت برشی در لحظه گسیختگی نمونه‌های خاک کائولن در تمامی تنش‌های قائم دارای میزان بالاتری نسبت به خاک بنتونیت است. هنگامی که به خاک بنتونیت غبار افزوده شد، مشاهده گردید در مدت عمل‌آوری ۷ روزه با رسیدن میزان غبار کوره سیمان تا ۲۰٪، مقاومت برشی به طور میانگین به میزان ۱۶/۳٪ کاهش می‌یابد. ولی با افزایش حضور



شکل ۱۱. تاثیر غبار کوره سیمان و مدت زمان عمل‌آوری بر مقاومت برشی در لحظه گسیختگی خاک بنتونیت.



شکل ۱۲. تاثیر غبار کوره سیمان و مدت زمان عمل‌آوری بر مقاومت برشی در لحظه گسیختگی خاک کائولن.

خاک کائولن مشاهده می‌شود، اضافه نمودن غبار کوره سیمان سبب کاهش میزان تورم با شیب ملایم‌تر نسبت به خاک بنتونیت شده است. همچنین مدت عمل‌آوری نمونه‌ها بر کاهش پتانسیل تورمی خاک کائولن تاثیرگذار بوده است. بطوری‌که مقدار کاهش در اثر مدت زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب ۲۸٪، ۲۶٪ و ۴۴٪ است. با مقایسه نتایج بدست آمده می‌توان دریافت غبار کوره سیمان بر کاهش تورم خاک بنتونیت با شاخص خمیری بالا تاثیرگذاری محسوسی دارد.

در ادامه، تاثیر غبار کوره سیمان بر میزان شاخص فشردگی نمونه خاک‌های رسی تثبیت شده ارزیابی گردیده که در نمودارهای شکل (۱۴-الف و ب) نتایج قابل مشاهده است. با توجه به نمودارها می‌توان دریافت، خاک رس بنتونیت دارای شاخص فشردگی بالایی در مقایسه با خاک رس کائولن است. در شکل (۱۴-الف) دیده می‌شود، در تمامی مدت‌های عمل‌آوری نمونه‌ها با افزودن غبار *CKD* تا ۲۰٪، شاخص فشردگی به آرامی کاسته می‌شود. ولی با افزایش غبار کوره سیمان تا ۳۰٪ مقدار شاخص فشردگی با شیب تند کاهش یافته و میزان کاهش در مدت‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب برابر ۲۸٪، ۲۴٪ و ۵۸٪ است. مشابه همین روند در خاک رس کائولن نیز مشاهده می‌شود، میزان کاهش شاخص فشردگی براساس مدت عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۲۱٪، ۲۸٪ و ۴۲٪ است. با مقایسه نتایج می‌توان دریافت تاثیر غبار کوره سیمان در مدت‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز در خاک رسی بنتونیت تاثیرگذار بوده و در مدت عمل‌آوری ۱۴ روزه در خاک رسی کائولن موثرتر است.

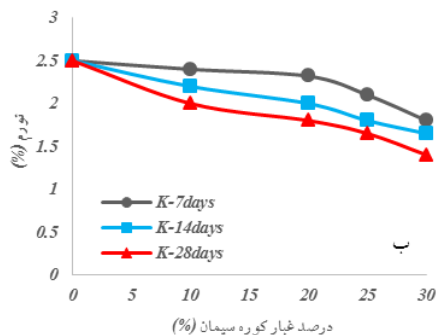
در مرحله بعدی، تاثیر غبار کوره سیمان بر روی پارامترهای ضریب تراکم‌پذیری (*av*) و ضریب تغییر حجم (*mv*) نمونه‌های خاک‌های رسی مورد مطالعه بررسی گردیده که نتایج آن به ترتیب در شکل‌های (۱۵-الف و ب) و (۱۶-الف و ب) نشان داده شده است. در شکل (۱۵-الف) قابل مشاهده است، در خاک بنتونیت در مدت عمل‌آوری‌های ۷ و ۱۴ روز شیب کاهش ضریب تراکم‌پذیری با افزایش غبار *CKD* بصورت ملایم بوده ولی در نمونه‌هایی که به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شده‌اند، کاهش با شیب تند صورت گرفته است. بطوری‌که میزان کاهش اتفاق افتاده برابر ۱۹/۴٪ است. طبق

هم‌چنین طبق نمودارهای شکل (۱۲-الف، ب و ج) می‌توان تاثیر غبار کوره سیمان را بر روی مقاومت برشی در لحظه گسیختگی خاک رسی کائولن مشاهده نمود. با توجه به دیاگرام‌ها می‌توان دریافت، در مدت زمان عمل‌آوری ۷ روزه، عموماً با افزایش حضور غبار *CKD* تا ۲۰٪ در خاک، بطور میانگین ۸/۴۵٪ کاهش در مقاومت برشی نهایی اتفاق افتاده است. سپس، با افزودن *CKD* تا ۳۰٪ مقاومت برشی در لحظه گسیختگی به طور میانگین ۴/۶٪ افزایش می‌یابد. در نمونه‌های عمل‌آوری شده در مدت زمان ۱۴ روزه، تا ۲۵٪ حضور غبار *CKD* در نمونه‌ها تاثیر محسوسی در مقاومت برشی در لحظه گسیختگی بوجود نمی‌آورد. ولی با رسیدن مقدار غبار *CKD* تا ۳۰٪، مقاومت نهایی در لحظه گسیختگی بطور میانگین ۶/۷۹٪ افزایش می‌یابد. در مدت عمل‌آوری ۲۸ روزه، مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار غبار کوره سیمان در خاک رس، مقاومت نیز یک روند مشابه را طی می‌نماید. زمانی‌که میزان *CKD* به ۳۰٪ می‌رسد، مقاومت برشی در لحظه گسیختگی بطور میانگین به ۱۸/۸٪ افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج مطالعات می‌توان دریافت غبار کوره سیمان بر روی خاک رسی کائولن تاثیر بیش‌تری در مقایسه با خاک بنتونیت دارد.

۳-۵- نتایج حاصل از آزمایش تحکیم

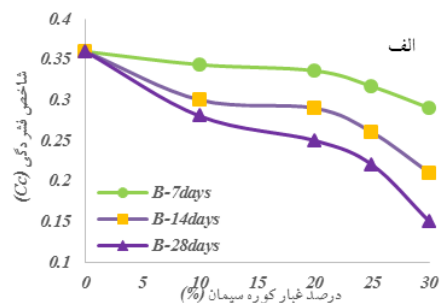
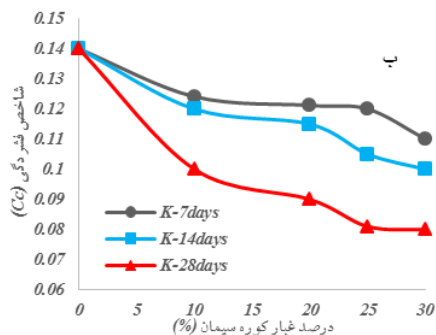
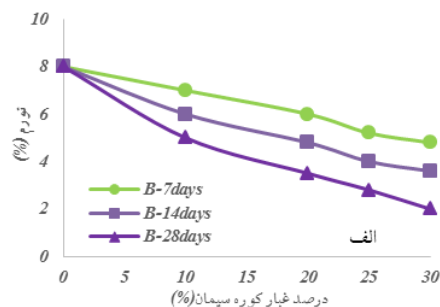
نشست تحکیمی و تورم در خاک‌های رسی ناشی از جذب آب و رطوبت از نمونه‌های رفتاری در خاک‌های مساله‌دار است. در این مطالعه با انجام آزمایش تحکیم، تاثیر غبار کوره سیمان بر میزان نشست و تورم خاک‌های رسی بررسی گردیده است. تاثیر غبار *CKD* بر میزان تورم آزاد نمونه‌های خاک‌های رسی مورد مطالعه طبق نمودارهای شکل (۱۳-الف و ب) نشان داده شده است. با توجه به نمودارها می‌توان دریافت در حالت تثبیت نشده، میزان تورم خاک بنتونیت دارای مقدار بیش‌تری نسبت به خاک کائولن است. در شکل (۱۳-الف) دیده می‌شود با افزودن غبار کوره سیمان و افزایش حضور آن در خاک رس بنتونیت، میزان تورم آن با شیب تندی کاهش می‌یابد. اگرچه مدت زمان عمل‌آوری بر مقدار کاهش تورم تاثیرگذار است بطوری‌که در مدت‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه با حضور ۳۰٪ غبار، مقدار کاهش تورم به ترتیب ۴۰٪، ۵۵٪ و ۷۵٪ است. مطابق شکل (۱۳-ب) در

عمل‌آوری‌های ۱۴ و ۲۸ روزه با شیب ملایم کاسته می‌شود. در نمونه خاک رسی با مدت عمل‌آوری ۷ روزه کاهش ضریب تراکم‌پذیری بصورت آنی اتفاق می‌افتد که میزان آن تقریباً ۱۹٪ است.

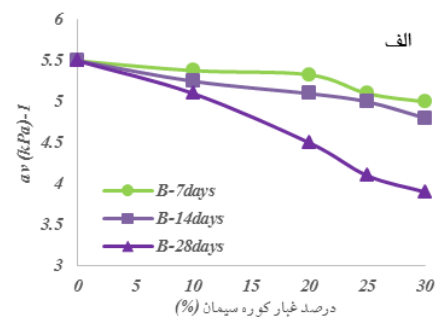
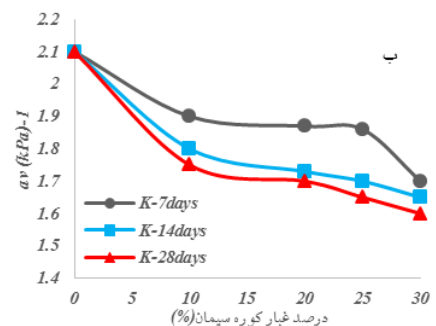


شکل ۱۳. تاثیر غبار کوره سیمان و مدت زمان عمل‌آوری بر میزان تورم آزاد، الف- بنتونیت، ب- کائولن.

نمودارهای ارائه شده در شکل (۱۵-ب) با افزودن ۱۰٪ غبار کوره سیمان به خاک کائولن، یک کاهش آنی در ضریب av در تمامی مدت‌های عمل‌آوری مشاهده می‌گردد. در ادامه، با افزایش غبار CKD تا ۳۰٪، ضریب av در تمامی نمونه‌های مورد مطالعه با مدت



شکل ۱۴. تاثیر غبار کوره سیمان و مدت زمان عمل‌آوری بر میزان شاخص فشردگی، الف- بنتونیت، ب- کائولن.



شکل ۱۵. تاثیر غبار کوره سیمان و مدت زمان عمل‌آوری بر میزان ضریب تراکم‌پذیری، الف- بنتونیت، ب- کائولن.

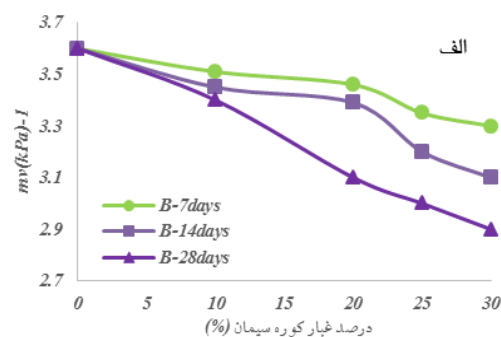
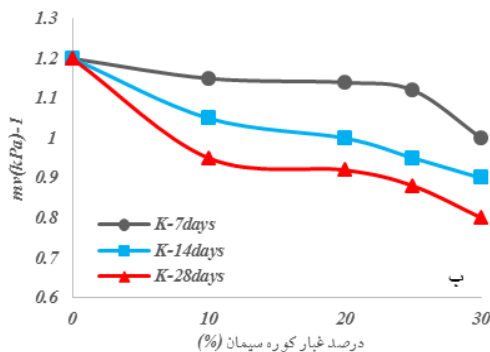
۸٪، ۱۴٪ و ۱۹٪ است. البته روند کاهش در نمونه‌های رسی با مدت عمل‌آوری ۲۸ روزه با شیب تند و در مدت زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۱۴ روزه با شیب ملایم بوقوع می‌پیوندد. در شکل (۱۶-ب) مشاهده می‌شود، در خاک کائولن نیز روندی مشابه با خاک رس بنتونیت بوقوع پیوسته است، با این تفاوت که در نمونه‌های با مدت زمان

غبار کوره سیمان می‌تواند بر میزان ضریب تغییر حجم (mv) تاثیرگذار باشد. همانطور که در نمودارهای شکل (۱۶-الف) دیده می‌شود ضریب تغییر حجم در نمونه‌ها در تمامی مدت زمان عمل‌آوری با افزایش غبار کوره سیمان تا ۳۰٪ در خاک بنتونیت کاهش می‌یابد. مقدار کاهش در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب

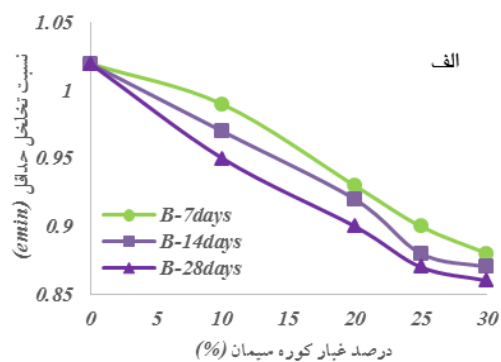
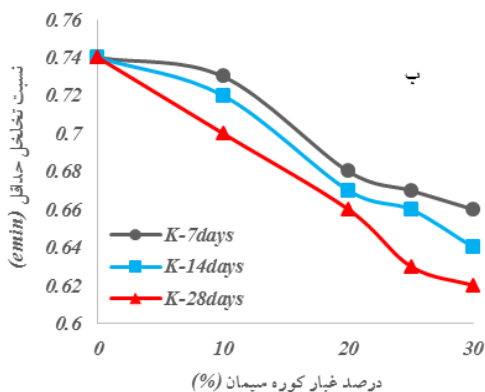
عمل‌آوری ۷ روزه شیب تغییر ضریب mv ملایم بوده ولی در مدت زمان‌های عمل‌آوری ۱۴ و ۲۸ روزه شیب تغییرات تند است. مقدار کاهش در زمان‌های عمل‌آوری ۱۴، ۷ و ۲۸ روز به ترتیب $۱۶/۶\%$ ، ۲۵% و ۳۳% است. با مقایسه نتایج می‌توان بیان نمود غبار کوره سیمان بر روی خاک کائولن دارای تاثیرگذاری بیش‌تری نسبت به خاک بنتونیت است.

نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر را می‌توان بر اساس نوع کانی‌های خاک رسی و تغییرات ایجاد شده در ساختار دانه‌بندی به علت مخلوط نمودن غبار کوره سیمان با ذرات خاک رس و نتیجتاً تغییرات نسبت تخلخل حداقل (e_{min}) با توجه به نمودارهای شکل (۱۷-الف و ب) بیان نمود. همانگونه که مشاهده می‌شود، افزودن غبار کوره سیمان به هر دو نوع خاک رس مورد مطالعه باعث کاهش فضای خالی بین ذرات شده است. این روند با در نظر گرفتن انجام واکنش سمنته بین ذرات غبار CKD افزوده شده با ذرات رس و تشکیل ساختار جدید دانه‌بندی صورت گرفته است. البته مدت زمان

عمل‌آوری در انجام واکنش تاثیرگذار بوده است. افزودن ۳۰ درصد غبار کوره سیمان به خاک بنتونیت در مدت‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه بترتیب سبب کاهش نسبت تخلخل حداقل به میزان $۱۳/۷\%$ ، ۱۷% و $۱۵/۷\%$ شده است. این روند در خاک کائولن به ترتیب برابر با $۱۰/۸\%$ ، $۱۳/۵\%$ و $۱۶/۲\%$ است. بنابراین می‌توان دریافت غبار کوره سیمان بر روی خاک بنتونیت با شاخص خمیری بالا تاثیرگذاری بیش‌تری دارد. این شرایط بیان‌کننده آن است، نوع کانی رس می‌تواند بر روی واکنش شیمیایی صورت گرفته بین غبار کوره سیمان و ذرات خاک رس تاثیرگذار باشد. البته نتیجه آن تشکیل ذرات درشت‌تر و در نتیجه تغییر ساختار و بافت خاک ریزدانه رسی پس از اتمام واکنش سمنته و پوزولانی است که سبب کاهش فضای خالی بین ذرات گردیده و ساختار سست خاک رس را تبدیل به ساختار درشت دانه با یک استخوان‌بندی و ساختار اسکلتی قوی و مستحکم نموده است.



شکل ۱۶. تاثیر غبار کوره سیمان و مدت زمان عمل‌آوری بر میزان ضریب تغییر حجم، الف- بنتونیت، ب- کائولن.



شکل ۱۷. تاثیر غبار کوره سیمان و مدت زمان عمل‌آوری بر میزان نسبت تخلخل حداقل خاک‌های رسی مورد مطالعه: الف- بنتونیت، ب- کائولن.

پیوسته است ولی در مقایسه با حالت تثبیت نشده دارای میزان کمتری است. در انتها، پس از ۲۸ روز عمل‌آوری نمونه‌های تثبیت شده مشاهده می‌گردد در حالت کلی غبار کوره سیمان پس از اتمام واکنش شیمیایی سمته با خاک‌های رسی باعث بهبود مقاومت برشی در لحظه گسیختگی نسبت به حالت تثبیت نشده شده است. البته تاثیر غبار کوره سیمان در افزایش مقاومت برشی خاک رسی اصلاح شده کائولینیت بیش‌تر از بنتونیت است.

این روند باعث تاثیرگذاری بیش‌تر در میزان مقاومت برشی در لحظه گسیختگی شده است که طبق جدول (۴) می‌توان مشاهده نمود. با توجه به اعداد موجود می‌توان دریافت غبار کوره سیمان در مدت ۷ روزه عمل‌آوری بدلیل عدم تکمیل واکنش شیمیایی سمته تاثیر منفی بر روی مقاومت برشی در لحظه گسیختگی هر دو نوع نمونه رسی نشان داده است. پس از مدت عمل‌آوری ۱۴ روزه مشاهده می‌شود تا حدودی بهبودی نسبی در خاک‌های رسی نسبت به حالت ۷ روزه بوقوع

جدول ۴. میزان تاثیر غبار کوره سیمان بر مقاومت برشی در لحظه گسیختگی نمونه‌های خاک رسی مورد مطالعه در مقایسه با حالت تثبیت نشده.

تنش	$\sigma = 100 \text{ kPa}$		$\sigma = 200 \text{ kPa}$		$\sigma = 300 \text{ kPa}$	
	بنتونیت	کائولن	بنتونیت	کائولن	بنتونیت	کائولن
۷ روزه						
۱۰	٪ ۱۴	-٪ ۲/۳	٪ ۱۲/۳	-٪ ۱/۱۶	-٪ ۸/۴۵	٪ ۰/۱۱۷
۲۰	-٪ ۴	-٪ ۱۶/۹	-٪ ۹/۲۷	-٪ ۱۶/۲	-٪ ۱۲	-٪ ۱۵/۹
۲۵	٪ ۶/۶	-٪ ۱۳/۵	٪ ۲/۰۶	-٪ ۸/۶	-٪ ۰/۱۷	-٪ ۷/۰۷
۳۰	٪ ۷/۶	-٪ ۱۰/۱	٪ ۴/۱	-٪ ۵/۴۶	٪ ۲/۱۱	-٪ ۲/۶۵
۱۴ روزه						
۱۰	٪ ۲/۸۵	-٪ ۳/۳	-٪ ۱/۰۳	-٪ ۰/۸۱	-٪ ۳/۵۲	٪ ۰/۱۸۸
۲۰	٪ ۰/۹۵	-٪ ۶/۷۷	-٪ ۰/۵۱	-٪ ۳/۴۸	-٪ ۲/۸۱	-٪ ۰/۱۸۸
۲۵	٪ ۰/۹۵	-٪ ۵/۰۸	-٪ ۰/۱	٪ ۲/۳۲	-٪ ۱/۴	٪ ۵/۳
۳۰	٪ ۸/۵۷	-٪ ۶/۷۷	٪ ۶/۱۸	٪ ۳/۴۸	٪ ۵/۶۳	٪ ۶/۱۹
۲۸ روزه						
۱۰	٪ ۱۶/۱	-٪ ۴/۲۳	٪ ۱۲/۳	٪ ۱/۱۶	٪ ۱۱/۲	٪ ۴/۴۲
۲۰	٪ ۱۸	-٪ ۵/۰۸	٪ ۱۸/۵	٪ ۳/۴۸	٪ ۱۸	٪ ۷/۰۷
۲۵	٪ ۱۸	-٪ ۶/۷۷	٪ ۱۹/۵	٪ ۳/۴۸	٪ ۱۹/۷	٪ ۷/۹۶
۳۰	٪ ۱۷/۱	-٪ ۱/۶۹	٪ ۱۹/۵	٪ ۱۰/۴	٪ ۲۰	٪ ۱۵/۹

و ویژگی‌های ژئوتکنیکی و رفتاری خاک‌های رسی است. در این مطالعه غبار CKD با درصد‌های ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ با دو نوع خاک رس بنتونیت و کائولن مخلوط گردیده و پس از ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عمل‌آوری بر روی نمونه‌های تثبیت شده نتایج بدست آمده نشان می‌دهد میزان بهینه غبار کوره سیمان برای بهبود رفتار ژئوتکنیکی هر دو نوع خاک رس مورد مطالعه برابر ۳۰ درصد در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه است. دلایل آنرا می‌توان به شرح ذیل بیان نمود:

۱- همان میزان مشابه غبار کوره سیمان سبب افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر به ترتیب در خاک‌های

۴- نتیجه‌گیری

وجود خاک ریزدانه رسی در محل اجرای پروژه‌های عمرانی و راهسازی به عنوان یک خاک مساله‌دار شناخته می‌شود. بخصوص زمانی‌که تغییر حجم ناشی از تغییر رطوبت سبب بروز خسارات و صدماتی در آن‌ها می‌شود. اما به دلیل افزایش روز افزون هزینه مصالح ساخت و ساز و حفظ محیط‌زیست، امروزه کاربرد مصالح باطله قابل دسترس پیشنهاد می‌گردد. یکی از مصالح پیشنهادی بدین منظور غبار کوره سیمان (CKD) است که انبار آن باعث آلودگی محیط‌زیست می‌گردد. هدف از تحقیق حاضر امکان بررسی تاثیر غبار کوره سیمان بر خصوصیات

با وجود مواد چسبنده یک استخوان‌بندی قوی ایجاد گردیده که نتیجه آن کاهش میزان نشست تحکیم و تورم و بالاتر رفتن نسبی توانایی باربری است. بنابراین می‌توان بیان نمود غبار کوره سیمان در خاک رسی بنتونیت نسبت به خاک رس کائولن تاثیرگذارتر بوده است. بنابراین در حالت کلی می‌توان بیان نمود از خاک رسی تثبیت شده با غبار کوره سیمان برای ساخت لایه‌های روسازی راه (بوئزه لایه خاک بستر)، آب‌بندی ابنیه‌های ژئوتکنیکی در معرض رطوبت و بهسازی خاک زیر پی استفاده نمود. البته نوع غبار کوره سیمان با توجه به سیمان تولید شده و نحوه عمل‌آوری ممکن است بر رفتار ژئوتکنیکی خاک رس با توجه به نوع کانی‌های آن‌ها و میزان نفوذپذیری تاثیرگذار باشد که سعی می‌گردد در تحقیقات آینده مورد بررسی قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

از داوران محترم این نشریه که در جهت ارتقای کیفیت این مقاله، پیشنهادات ارزنده‌ای ارائه نمودند، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- احمدی، م و صادق، غ. ج (۱۳۹۲) اثر غبار کوره سیمان بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌ها، اولین کنفرانس مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه محقق اردبیلی، ۳۰ مهر تا ۱ آبان، اردبیل، ایران.
- Adeyanju, E. A. and Okeke, C. A (2019) Clay soil stabilization using cement kiln dust, 1st International conference on sustainable infrastructural development, 1-11.
- Al Karagooly, Jabur, Y. H (2012) Effect of Cement Kiln Dust on Some Properties of Soil, Journal of Babylon University, Engineering Science, 20(4): 1150-1156.
- Albusoda, B. S., Salem, L. A. Kh (2012) Stabilization of Dune Sand by Using Cement Kiln Dust, Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, 2(1): 131-143.
- ASTM C618-01 (2001) Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolana for Use as Mineral Admixture, Annual book of ASTM standards.
- ASTM D 4318-95a (1995) Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index for soils, Annual book of ASTM standards.
- ASTM D 854-02 (2002) Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer, Annual book of ASTM standards.

رسی بنتونیت و کائولن به میزان ۸/۷ و ۷/۲ درصد گردیده و مقدار رطوبت بهینه بطور قابل‌ملاحظه کاهش یافته است.

۲- ۳۰ درصد غبار کوره سیمان در خاک‌های رس بنتونیت و کائولن مقاومت فشاری تک‌محوری در لحظه گسیختگی را به ترتیب به میزان ۳ و ۲/۱ برابر نسبت به حالت تثبیت نشده افزایش می‌دهد.

۳- زاویه اصطکاک داخلی در نمونه‌های خاک رس بنتونیت و کائولن تثبیت شده با ۳۰ درصد غبار کوره سیمان به ترتیب به میزان ۳۳٪ و ۱۹/۲٪ افزایش یافته و در همین شرایط میزان چسبندگی در خاک رس بنتونیت به مقدار ۲۷٪ کاهش و در خاک رس کائولن به میزان ۵۰ درصد بهبود یافته است.

۴- با حضور ۳۰٪ غبار کوره سیمان مقدار کاهش تورم آزاد در رس بنتونیت ۷۵٪ و در خاک رس کائولن مقدار کاهش به ترتیب ۴۴٪ است.

۵- در خاک رس بنتونیت با افزایش CKD تا ۳۰٪ مقدار شاخص فشردگی در مدت‌های عمل‌آوری ۲۸ روز سبب کاهش به مقدار ۵۸٪ نسبت به حالت تثبیت نشده می‌گردد. مشابه همین روند در خاک رس کائولن نیز مشاهده شده و میزان کاهش شاخص فشردگی براساس مدت عمل‌آوری ۲۸ روز برابر ۴۲٪ است.

با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان اشاره نمود رفتار خاک ریزدانه رسی تثبیت شده متأثر از، اندازه ذرات غبار کوره سیمان، نسبت تخلخل حداقل (e_{min}) و واکنش شیمیایی صورت گرفته بین ذرات خاک رسی و غبار CKD در مدت زمان عمل‌آوری است. با توجه به اینکه ذرات غبار کوره سیمان نسبت به ذرات خاک رسی کائولن و بنتونیت ریزتر بوده و می‌تواند سطح تماس بیش‌تری با ذرات رس داشته باشد و بدلیل وجود خاصیت پوزولانی در ذرات غبار کوره سیمان می‌تواند واکنش شیمیایی مناسب ایجاد نماید. این شرایط پس از عمل‌آوری در مدت زمان‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روز خود را نشان می‌دهد. بطوریکه با افزایش درصد حضور غبار کوره سیمان بطور میانگین در خاک‌های رسی بنتونیت و کائولن به ترتیب ۱۵/۴٪ و ۱۳/۵٪ نسبت تخلخل حداقل کاهش یافته و این شرایط بیان‌کننده آن است واکنش شیمیایی صورت گرفته باعث ایجاد یک ساختار دانه‌بندی جدید با ابعاد درشت‌تر و با نسبت تخلخل و محدودتر و

- Singh, V., Jain, R (2015) *Effect of Cement Kiln Dust on Index Properties of Black Cotton Soil*, *International Journal of Engineering and Science Research*, 5(4): 142-146.
- ASTM D2435-11 (2011) *Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*, Annual book of ASTM standards.
- ASTM D421-85 (1985) *Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants*, Annual book of ASTM standards, (reapproved 1998).
- ASTM D422-63 (1963) *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*, Annual book of ASTM standards (reapproved 1998).
- ASTM-D 2166/D2166M-13 (2013) *Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soils*, Annual book of ASTM standards.
- ASTM-D 3080-98 (1998) *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained condition*, Annual book of ASTM standards.
- ASTM-D 698-00 (2000) *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*, Annual book of ASTM standards.
- Baghdadi, Z. A., Fatani, M. N., and Sabban, N. A (1995) *Soil Modification by Cement Kiln Dust*, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 7(4): 218-222.
- Baghdadi, Z. A., Rahman, M. A (1990) *The Potential of Cement Kiln Dust for The Stabilization of Dune Sand in Highway Construction*, *Building and Environment*, 25(4): 285-289.
- Heeralal, M., Praveen, G. V (2011) *Study on Effect on Fiber on Cement Kiln Dust Stabilized*, *Journal of Engineering Research and Studies*, 2(4): 173-177.
- Iran China Clay Industries Company, website address: www.icckaolin.com.
- Little, D. N., Males, E. H., Prusinki, J. R. and Stewart, B. S (2000) *Cementation Stabilization, A2J01: Committee on Cementitious Stabilization*, <http://www.onlinepubs.trb.org/onlinepubs/millennium/00016.pdf>, (2000).
- Makusa, G (2012) *Soil Stabilization Methods and Materials*, In *Engineering Practice*, Lulea University of Technology, Sweden.
- Mehatlaf, A (2018) *Compressive Strength and Physical Properties Behavior of Cement Mortars with Addition of Cement Kiln Dust*, *Journal of Babylon University/Engineering Science*, 26(1): 114-121.
- Miller, G. A. and Azad, Sh (2000) *Influence of Soil Type on Stabilization with Cement Kiln Dust*, *Construction and Building Materials*, 3: 89-97.
- Salahudeen, A. B., Eberemu, A. O., Osinubi, K. J (2014) *Assessment of Cement Kiln Dust-Treated Expansive Soil for the Construction of Flexible Pavements*, *Geotechnical and Geological Engineering*, 4: 1-9.

Geotechnical behavior of clayey soils stabilized with cement kiln dust

A. Abdi¹ and R. Dabiri^{2}*

1, 2- Dept., of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz

** rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir*

Received: 2020/2/28 Accepted: 2020/6/8

Abstract

Clayey soil can cause problems such as swelling and significant settlements during the geotechnical projects. In this regard, improving and reinforcing methods of weak soils can be classified into mechanical, chemical, and physical procedures. Nowadays, the use of available and waste materials is considered to prevent environmental pollution for soil stabilization. One of these materials is cement kiln dust, which is a by-product of Portland cement. In the present study, the possibility of stabilizing two types of bentonite and kaolin clayey soils is evaluated using cement kiln dust (CKD). For this purpose, cement kiln dust was mixed with clayey soils at 10, 20, 25, and 30% and then processed for 7, 14, and 28 days. To investigate the geotechnical behavior of stabilized soil, laboratory tests such as Atterberg limits, compaction, uniaxial compressive strength, direct shear test, and consolidation were carried out. The results show that the optimal amount of CKD is 30% during the processing time of 28 days, which are the most effective on bentonite. The results of bentonite stabilization show a 65%, 58%, and 75% of reduction in the plasticity index, compression index, and swelling potential, respectively. On the other hand, maximum dry unit weight, uniaxial compressive strength, and shear strength increased by 8.7%, 3 times, and 9.4%, respectively, compared to the unstabilized state.

Keywords: *Clay, cement kiln dust, shear strength, swelling, consolidation*