

بررسی تأثیر خاکاره بر روی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های رسی*

روزبه دبیری^(۲)

روزبه تدین^(۱)

چکیده در این پژوهش تأثیر ذرات خاکاره درخت کاج بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی دو نوع خاک رس کائولنی بررسی شده است، به طوری که خاکاره با درصدهای وزنی ۳، ۶ و ۹ به صورت خشک به دو خاک کائولنی با خصوصیات خمیری مختلف به صورت تصادفی مخلوط گردیده است. در ادامه، نمونه‌های ساخته شده تحت آزمایش‌های تراکم، تک‌محوری، نفوذپذیری (با ارتفاع متغیر)، تحکیم و برش مستقیم (خشک و اشباع) قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد، زمانی که ۳٪ خاکاره به نمونه‌های مورد مطالعه افزوده گردد سبب کاهش نسبت تخلخل حداقل (e_{min}) در بین ذرات خاک کائولن با خاصیت خمیری بالا به میزان ۲۴٪ می‌شود. همچنین در این شرایط افزایش در مقاومت و ظرفیت باربری، تراکم‌پذیری و کاهش جذب آب به وقوع می‌پیوندد.

واژه‌های کلیدی خاک رسی، خاکاره، رفتار ژئوتکنیکی، مقاومت برشی، تحکیم، نفوذپذیری.

Effects of Sawdust on Geotechnical Properties of Clayey Soils

R. Tadayyon

R. Dabiri

Abstract In this research, effects of pine tree sawdust on geotechnical properties of two types of kaolinite clayey soil was evaluated. So that, sawdust in 3, 6 and 9 percent (by weight) in dry condition randomly mixed with two kaolinite clayey soil with different plasticity index. Compaction, uniaxial, permeability (falling head) and consolidation tests were performed on specimen. Results showed while 3% sawdust mixed to samples, 24% minimum void ratio (e_{min}) decreased in kaolinite clay with high plasticity index. Also, in this condition, increasing of bearing capacity and strength, ductility and decreasing in water absorbing have been happened.

Key Words Clayey soil, Sawdust, Geotechnical behavior, Shear strength, Consolidation, Permeability.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۷/۲/۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۱۰/۲۹ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد مهندسی عمران- ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز. Email: rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir

مقدمه

بتوان با به‌کارگیری خاک‌اره، ویژگی‌های مکانیکی خاک ریزدانه رسی را اصلاح کرد و از آلودگی محیط زیست و خسارت‌های ناشی از استفاده کردن از خاک‌های متورم‌شونده و هزینه‌هایی که در پی دارد جلوگیری نمود. در زمینه تثبیت خاک‌های ریزدانه توسط خاک‌اره مطالعات گسترده‌ای انجام یافته‌است. کافی و همکاران در سال ۱۳۹۰ [۷] در مطالعه خود دریافتند که حضور خاک‌اره و بتونیت در خاک رس باعث بهبود در جذب رنگ پساب‌های صنعتی شده‌است. نتایج تحقیق سیروس‌پور و همکاران در سال ۱۳۹۶ [۸] نشان داد که حضور خاک‌اره باعث حذف بیشتر نیترات می‌گردد. چمانی و همکاران [۹] با هدف فراهم کردن مصالح ساختمانی سبک، تأثیر خاک‌اره را بر روی ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی آجرهای سفالی مورد بررسی قرار دادند. نتیجه تحقیق نشان داد انقباض نمونه‌ای که در آن از خاک‌اره حاصل از درخت کاج استفاده شده بود نسبت به نمونه‌ای که در آن از خاک‌اره حاصل از درخت اکالیپتوس استفاده شده بود، بسیار بیشتر بود. رائو کاتسوارا [۱۰] و همکاران مشاهده نمودند که تورم آزاد نسبی خاک رس با افزودن ۱۵ درصد خاک‌اره، ۶۲/۸۵ درصد و با افزودن ۴ درصد آهک، ۷۲/۱۴ درصد کاهش می‌یابد. در تحقیقات صورت‌گرفته توسط مانوکاجی [۱] مشاهده شد که در خاک رس پایتخت نیجریه حد انقباض خطی با افزایش میزان خاک‌اره از مقدار میانگین ۸/۵۷ به ۸/۳۲ درصد به‌طور یکنواخت کاهش پیدا کرده و وزن مخصوص خشک حداکثر با افزایش میزان خاک‌اره از مقدار میانگین ۳/۱۸ به ۲/۹۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب به‌طور یکنواخت کاهش یافته و پوکی با افزایش میزان خاک‌اره از مقدار میانگین ۱۳ به ۱۷ درصد افزایش پیدا کرده و به‌مقدار قابل قبول (بین ۲۰ تا ۸۰ درصد) نزدیک‌تر شده‌است. نتایج مطالعات صورت‌گرفته توسط ایده و همکاران [۱۱] نشان داد که با افزایش میزان خاک‌اره

در سیستم نام‌گذاری متحد خاک‌ها، کلیه ذراتی که اندازه آنها از ۰/۰۷۵ میلی‌متر کمتر باشد در طبقه ریزدانه‌ها قرار می‌گیرند. اگر این‌گونه خاک‌ها در صورت مخلوط شدن با مقدار محدودی آب خاصیت خمیری از خود نشان دهند، در طبقه رس و در غیر این صورت در بخش لای قرار می‌گیرند. خاک‌های متورم‌شونده با تغییر درصد رطوبت تغییر حجم قابل ملاحظه‌ای از خود نشان می‌دهند که افزایش درصد رطوبت تورم و کاهش آن انقباض این‌گونه خاک‌ها را در پی دارد. انقباض و اتساع خاک‌های متورم‌شونده خسارت‌های قابل ملاحظه‌ای را به زیرساخت‌ها وارد می‌کنند [۱]. خاک‌اره محصول برش، سمباده زدن و یا در غیر این صورت ساییدن چوب با اهر یا ابزار دیگر است و از ذرات ریز چوب تشکیل می‌شود. زائدات خاک‌اره چوب در تمام کشورهای جهان انباشته می‌شوند و مشکلات زیست‌محیطی جدی و خطرات سلامتی گوناگونی را موجب می‌شوند و از آنجایی که تولید زائدات چوبی در کارخانه‌های چوب‌بری و صنایع چوبی گوناگون غیرقابل اجتناب است، لذا برای استفاده از این زائدات تلاش زیادی به‌عمل می‌آید [۲]. هم‌چنین، به‌منظور تثبیت و به‌سازی خاک‌های مسئله‌دار، روش‌های مختلف موجود است که برپایه تئوری‌های مکانیکی و واکنش‌های شیمیایی بنا نهاده شده‌اند [۳-۵]. انتخاب روش‌های موجود تابع پارامترهای مختلفی همچون نوع خاک، ساختار دانه‌بندی خاک، مهارت، نوع تجهیزات، مواد مصرفی و هزینه اجرای آنها می‌باشد. انجمن اداره راه‌وترابری آمریکا در سال ۲۰۱۶ [۶] روش‌های مختلف به‌سازی خاک‌ها را به‌همراه هزینه اجرای آنها طبق جدول (۱) ارائه نموده‌است. با مقایسه هزینه‌ها می‌توان مشاهده کرد، خاک‌اره به‌دلیل گستردگی در تهیه آن و قیمت بسیار پایین، امکان استفاده از آن را در جهت به‌سازی خاک‌ها ارائه می‌نماید؛ بنابراین در این تحقیق سعی بر آن است تا

خاکاره مورد استفاده در خاک رس حد روانی، حد خمیری، نشانه خمیری و انقباض خطی کاهش پیدا کرد؛ هم‌چنین با افزایش میزان خاکستر خاکاره، چگالی خشک حداکثر نمونه‌های حاوی خاک و خاکستر کاهش یافت، درحالی‌که رطوبت بهینه آنها افزایش پیدا کرد. در تحقیق انجام‌یافته به‌وسیله الحالم و البرودی [12] مشاهده شد که با افزایش درصد خاکاره ضریب نفوذپذیری خاک رس به‌شدت افزایش می‌یابد.

جدول ۱ مقایسه هزینه‌های روش‌های به‌سازی خاک [6]

هزینه (دلار)	تکنولوژی	طبقه‌بندی
۴-۰/۵ (هر یک فوت)	پیش بارگذاری، همراه و یا بدون خاکریز	زهکشی قائم و تحکیم شتاب داده‌شده
۱۵۰-۷۵ (هر یارد مکعب)	خاکریز با مقاومت فشاری، ژئوفوم، بتن فومی	خاکریزهای سبک
۱۵-۳ (هر یارد مکعب)	خاکریزی با مصالح دانه‌ای، الیاف چوب، سرباره کوره فولاد، خاکستر بادی، الیاف تایر، شیبست خاک رسی	خاکریزی‌های سبک
۳۰-۱۰ (هر یارد مکعب)	تراکم دینامیکی عمیق	تراکم عمیق
۹-۵ (هر یک فوت)	تراکم ویرهای	تراکم عمیق
۶۰-۱۵ (هر فوت)	ستون‌های سنگی	ستون‌های مصالح دانه‌ای
۹ (برای هر فوت مربع) + هزینه اجرای ستون	خاکریزهای تقویت‌شده با ستون	خاکریزهای تقویت‌شده با ستون
۸۰-۳۰ (هر فوت)	ستون‌ها: غیرفشرده	خاکریزهای تقویت‌شده با ستون
۱۰۰-۲۰ (هر فوت)	ستون‌ها: غیرفشرده	خاکریزهای تقویت‌شده با ستون
۱۲۵-۶۰ (هر فوت)	مخلوط عمیق (خشک)	خاک مخلوط
۷۵-۱۵ (هر یارد مکعب)	اختلاط توده‌ای	خاک مخلوط
۲۰ (هر فوت)	تزریق شیمیایی	تکنولوژی تزریق
۷۵۰-۷۵ (هر یارد مکعب)	تزریق به‌همراه تراکم	تکنولوژی تزریق
۱۵-۵۰ (هر یارد مکعب)	پر کردن فضاهای خالی	تکنولوژی تزریق
۹/۵-۶/۵ (هر فوت مربع)	تثبیت کف	تکنولوژی تزریق
۷۵۰-۲۵۰ (هر یارد مکعب)	تزریق جت	تکنولوژی تزریق
۸۰-۲۵ (فوت مربع)	تزریق ترک‌های سنگ	تکنولوژی تزریق
۵-۱ (هر یارد مربع)	روش‌های مکانیکی	روش‌های به‌سازی روسازی راه
۵-۲ (هر یارد مربع)	روش‌های شیمیایی	روش‌های به‌سازی روسازی راه
۱۲-۳ (هر فوت)	کنترل رطوبت	روش‌های به‌سازی روسازی راه
۱۲-۲ (هر یارد مربع)	خاکریز مسلح	خاک مسلح
۶۵-۳۰ (هر فوت مربع)	دیوارهای مسلح انعطاف‌پذیر	خاک مسلح
۲۵-۳ (هر فوت مربع)	شیب‌های خاکی مسلح‌شده	خاک مسلح
۵۰-۲۰ (هر فوت)	میخ‌کوبی	خاک مسلح

مقایسه نتایج مطالعه، خاک‌های مذکور به ترتیب نوع ۱ و نوع ۲ نام‌گذاری شدند. تصویر نمونه‌هایی از خاک‌های رسی کائولن در شکل (۱- الف و ب) ارائه شده‌است. همچنین، خصوصیات شیمیایی و درصد کانی آنها طبق جدول (۲) قابل مشاهده‌است.

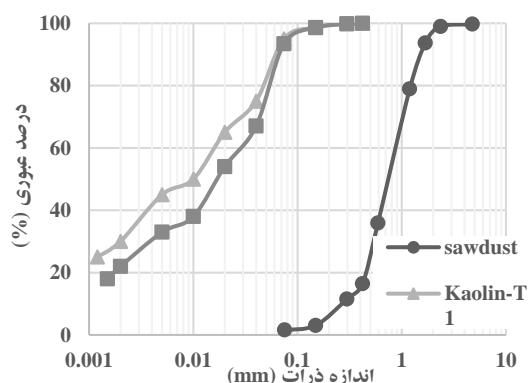


شکل ۱ تصاویر مصالح مورد مطالعه در تحقیق حاضر: الف) کائولن نوع ۱، ب) کائولن نوع ۲، ج) خاک‌اره.

تأثیر خاک‌اره در خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس حاصل از ۴ ایالت واقع در نیجریه توسط اولابا بوده و همکاران [13] مورد مطالعه قرار گرفت. ایشان دریافتند که نمونه‌های بدون خاک‌اره مقاومت بالاتری از خود نشان دادند و با افزودن خاک‌اره به خاک رس، مقاومت فشاری آن کاهش پیدا کرد. ناراناگودا و همکاران [14] مشاهده کردند که درصد رطوبت بهینه خاک رس در صورت استفاده از ۱۰ درصد خاکستر خاک‌اره و ۱۰ درصد خاکستر بادی کاهش پیدا کرد و افزودن خاکستر بادی و خاکستر خاک‌اره به خاک، سبب افزایش چگالی خشک حداکثر آن شد. در مطالعه صورت گرفته توسط خان و همکاران [15] مشاهده شد با افزودن خاکستر خاک‌اره به خاک رس، ضریب نفوذپذیری نسبت به حالت اولیه کاهش پیدا کرد. در تحقیقات صورت گرفته توسط کومارو جاین [16] افزودن خاکستر خاک‌اره به نمونه خاکی رسی مشاهده گردید که مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی بهبود یافته‌است و مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر با افزودن خاکستر خاک‌اره افزایش یافته‌است و شاخص خمیری خاک رس به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته‌است. با مرور تحقیقات صورت گرفته مشاهده می‌گردد، خاک‌اره ریز درخت کاج در جهت بررسی تأثیر آن بر خصوصیات خمیری، ساختار دانه‌بندی و فضای خالی بین ذرات خاک رس به منظور تثبیت و ارزیابی رفتار ژئوتکنیکی کمتر مدنظر واقع شده‌است. این امر از نوآوری‌های مطالعه حاضر می‌باشد.

مواد و مصالح

همچنان‌که در بخش‌های گذشته به آن اشاره گردید، هدف از تحقیق حاضر، امکان بررسی تأثیر ذرات خاک‌اره بر روی ویژگی‌های مکانیکی و رفتاری خاک رس است. برای تحقیق حاضر، دو نوع خاک رس کائولن با شاخص‌های خمیری متفاوت از کارخانه صنایع خاک چینی ایران در نزدیکی شهر مرند با نام‌های تجاری SZWMK1 و ZMK2 تهیه گردیده‌است. در ادامه به منظور ارائه و



شکل ۲ منحنی دانه‌بندی مصالح مورد مطالعه در تحقیق حاضر

جدول ۳ ویژگی های ژئوتکنیکی مصالح مخلوط مورد مطالعه

خصوصیات ژئوتکنیکی	رس کائولن نوع ۲	رس کائولن نوع ۱
PI	۱۱	۱۵
Gs		
درصد خاکاره	رس کائولن نوع ۲	رس کائولن نوع ۱
۰	۲/۶۵	۲/۶۲
۳	۲/۷	۲/۷۲
۶	۲/۵۲	۲/۶۵
۹	۲/۵۸	۲/۷۹

جدول ۴ نوع و درصد وزنی کانی‌ها در خاک‌های رسی کائولن

مورد مطالعه [17]

نوع کانی	کائولن نوع ۱	کائولن نوع ۲
کائولینیت	۶۴	۴۱
کوارتز	۲۷	۵۲
کلسیت	۲/۱	۳
سایر	۶	۴

کارهای آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر، خاک‌های رسی کائولن با خاکاره با درصد‌های وزنی ۳، ۶ و ۹ مخلوط شده‌است تا امکان بهبود خصوصیات مکانیکی و ژئوتکنیکی خاک‌های رسی ارزیابی گردد. بدین منظور ابتدا آزمون تراکم آزمایشگاهی طبق استاندارد ASTM D698 [22] انجام گرفت. سپس،

جدول ۲ خصوصیات شیمیایی و درصد کانی خاک‌های رس کائولن مورد مطالعه [17]

ماده تشکیل دهنده	درصد وزنی عناصر در کائولن SZWMK1 (نوع ۱)	درصد وزنی در کائولن ZMK2 (نوع ۲)
L.O.I	۹	۶
SiO ₂	۶۳	۷۴
Al ₂ O ₃	۲۴	۱۵
Fe ₂ O ₃	۰/۵۵	۰/۴۵
TiO ₂	۰/۰۴	۰/۰۴
CaO	۱/۲	۱/۵
MgO	۰/۵۵	۰/۴
Na ₂ O	۰/۴	۰/۳۵
K ₂ O	۰/۳	۰/۳
SO ₄	-	-

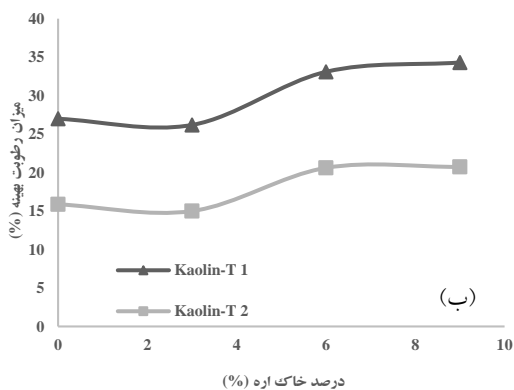
خاکاره مورد استفاده در پژوهش حاضر، مربوط به درخت کاج روسی است که از کارگاه چوب‌بری تهیه شده‌است و قبل از استفاده برای انجام آزمایش‌ها کاملاً خشک گردیده‌است. تصویر ظاهری خاکاره تهیه‌شده مطابق شکل (۱-ج) قابل مشاهده‌است. منحنی دانه‌بندی مصالح مورد مطالعه طبق استاندارد ASTM D421 [18] و ASTM D422 [19] تعیین گردیده‌است که می‌توان آن را در شکل (۲) مشاهده نمود. برای آن‌که بتوان تأثیر خاکاره را در تحقیق حاضر به‌طور مناسب ارزیابی نمود، با در نظر گرفتن منحنی دانه‌بندی خاک رس کائولنی، اندازه ذرات خاکاره کوچک‌تر از ۱/۱۹ میلی‌متر انتخاب شد. همچنین براساس منحنی‌ها می‌توان مشاهده نمود براساس سیستم نام‌گذاری متحد، خاک‌های رسی کائولن مورد مطالعه از نوع CL است که خصوصیات خمیری آنها طبق استاندارد ASTM D4318-95a [20] و چگالی ویژه نیز طبق استاندارد ASTM D854 [21] برآورد شده که در جدول (۳) ارائه شده‌است. نوع کانی‌ها و درصد‌های آنها در خاک‌های رسی کائولن مورد مطالعه در جدول (۴) قابل مشاهده می‌باشد.

صورت گرفت. در مرحله سوم، برای بررسی تأثیر خاکاره بر روی میزان نفوذپذیری، نشست تحکیم و درصد تورم خاک‌های رسی مورد مطالعه، ابتدا آزمایش نفوذپذیری با ارتفاع متغیر طبق استاندارد ASTM D5084 [25] انجام گرفت. سپس، میزان نشست تحکیم و درصد تورم با استفاده از آزمایش تحکیم طبق استاندارد ASTM D2435 [26] صورت پذیرفت. برنامه آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی نمونه‌های مورد مطالعه مطابق جدول (۵) قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که ۲۵٪ از مجموع آزمایش‌های انجام یافته روی نمونه‌ها جهت تدقیق نتایج دوباره تکرار شده است.

برای تعیین پارامترهای رفتاری خاک‌های رسی کائولن تثبیت شده با خاکاره، در مرحله اول آزمایش مقاومت فشاری تک محوری طبق استاندارد ASTM D2166 [23] صورت پذیرفت. در مرحله دوم، آزمون برش مستقیم در دو حالت خشک و اشباع طبق استاندارد ASTM D3080-11 [24] بر روی نمونه‌های با ابعاد 10×10 سانتی متر مربع به صورت کنترل کرنش تحت اثر تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال صورت گرفت. لازم به یادآوری است در حالت اشباع، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت تحت اثر بارگذاری قائم قرار گرفتند تا عملیات تحکیم به اتمام برسد. سپس با سرعت 0.5 میلی متر بر دقیقه آزمایش انجام گرفت. در حالت خشک، عملیات بارگذاری نمونه‌های مورد مطالعه با سرعت $1/25$ میلی متر بر دقیقه

جدول ۵ برنامه آزمون‌های صورت گرفته بر روی نمونه‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر

آزمایش‌های انجام یافته										
ردیف	نام نمونه	ماتریس خاک	درصد خاکاره	حدود آتربرگ	چگالی ویژه	تراکم	تک محوری	برش مستقیم (خشک)	برش مستقیم (اشباع)	تحکیم
۱	T1-0	کائولن نوع ۱ (T1)	۰	*	*	*	*	*	*	*
۲	T1-03	کائولن نوع ۱ (T1)	۳	*	*	*	*	*	*	*
۳	T1-06	کائولن نوع ۱ (T1)	۶	*	*	*	*	*	*	*
۴	T1-09	کائولن نوع ۱ (T1)	۹	*	*	*	*	*	*	*
۵	T2-0	کائولن نوع ۲ (T2)	۰	*	*	*	*	*	*	*
۶	T2-03	کائولن نوع ۲ (T2)	۳	*	*	*	*	*	*	*
۷	T2-06	کائولن نوع ۲ (T2)	۶	*	*	*	*	*	*	*
۸	T2-09	کائولن نوع ۲ (T2)	۹	*	*	*	*	*	*	*



شکل ۳ نتایج به دست آمده از آزمایش تراکم بر روی مصالح مورد مطالعه: (الف) وزن مخصوص خشک حداکثر، (ب) رطوبت بهینه.

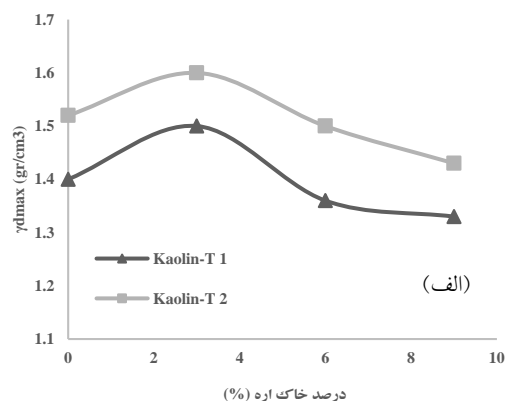
نتایج حاصل از آزمایش تک محوری

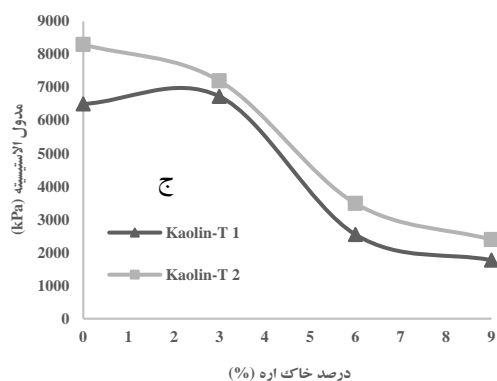
نتایج حاصل از نتایج مقاومت فشاری تک محوری را طبق نمودارهای شکل (۴-الف، ب و ج) می توان مشاهده نمود. باتوجه به نمودارهای شکل (۴-الف) مشاهده می گردد در شرایط تثبیت نشده، خاک رس کائولنی نوع ۲ دارای مقاومت فشاری بالاتری در مقایسه با خاک رس کائولنی نوع ۱ است. هنگامی که خاک اره به نمونه های مورد مطالعه افزوده شد، مشاهده گردید در کائولن نوع ۱ مقاومت فشاری تک محوری با حضور ۳٪ خاک اره به مقدار ۳۳٪ افزایش یافت و در ادامه، با افزایش درصد وزنی خاک اره مقدار توانایی باربری کاسته شد. در همین شرایط، مقاومت فشاری تک محوری کائولن نوع ۲ با حضور خاک اره کاهش یافت. این روند در دو نوع خاک رسی لاگوس و نیجر که توسط اولابایوده و همکاران [13] مورد مطالعه قرار گرفته است و از نظر مقدار شاخص خمیری به ترتیب نزدیک به کائولن های نوع ۱ و نوع ۲ تحقیق حاضر می باشد مشاهده شده است. وقوع این شرایط به آن علت است که در کائولن نوع ۱ خاصیت بالای چسبندگی و حضور پودر خاک اره (۳٪) باعث افزایش تماس ذرات به یکدیگر می شود و در نتیجه یک بهبودی نسبی در توانایی باربری به وقوع می پیوندد. کائولن نوع ۲، به دلیل بالا بودن درصد ذرات کوارتز و

نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمایش تراکم

نتایج به دست آمده حاصل از آزمون تراکم آزمایشگاهی در شکل (۳-الف و ب) ارائه شده است. باتوجه به نمودارها می توان دریافت که وزن مخصوص خشک حداکثر در شرایطی که خاک اره افزوده نشده است در خاک کائولن نوع ۲ به دلیل پایین بودن خصوصیات خمیری و وجود درصد کوارتز بالا در مقایسه با کائولن نوع ۱ دارای مقدار بالایی است. هنگامی که به مصالح مورد مطالعه خاک اره افزوده گردید، مشاهده شد که در ۳٪ وزنی خاک اره، وزن مخصوص خشک حداکثر افزایش یافت و رطوبت بهینه کاسته شد. میزان افزایش در وزن مخصوص خشک حداکثر در خاک کائولن نوع ۱ و نوع ۲ به ترتیب ۷/۱۴٪ و ۵/۳٪ بود و کاهش در مقدار رطوبت بهینه نیز به ترتیب ۳٪ و ۵/۵٪ بود. این شرایط بیان کننده آن است که تأثیر خاک اره بر روی خاک کائولن با خاصیت خمیری پایین بیشتر است؛ به گونه ای که ۳٪ خاک اره باعث کاستن فضای خالی بین ذرات کائولن می گردد و جذب رطوبت را کاهش می دهد. هم چنین، هنگامی که درصد خاک اره در کائولن ها افزایش یافت مشاهده شد هم زمان وزن مخصوص خشک کاهش و رطوبت بهینه افزایش یافت که بیان کننده بالا رفتن درصد فضای خالی بین ذرات و افزایش میزان جذب آب است. این روند در مطالعات انجام یافته توسط مانوکاجی [1] و اولابایوده [13] نیز مشاهده شده است.



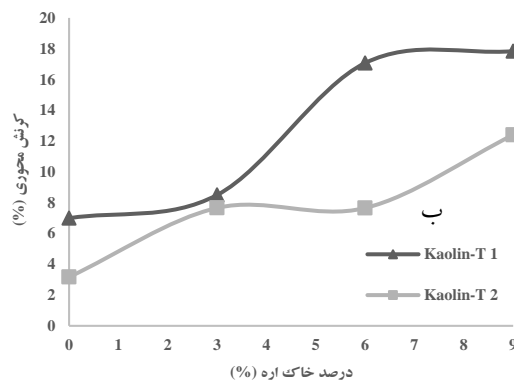
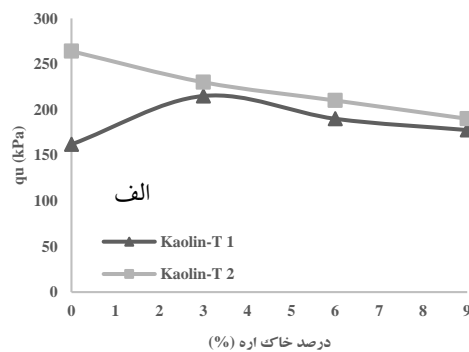


شکل ۴ نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر روی مصالح مورد مطالعه: الف) مقاومت فشاری، ب) کرنش محوری در لحظه گسیختگی، ج) مدول الاستیسیته.

نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم

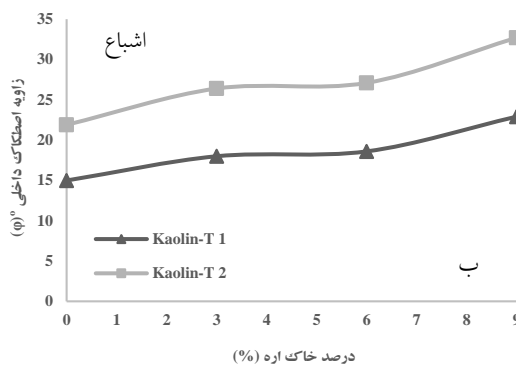
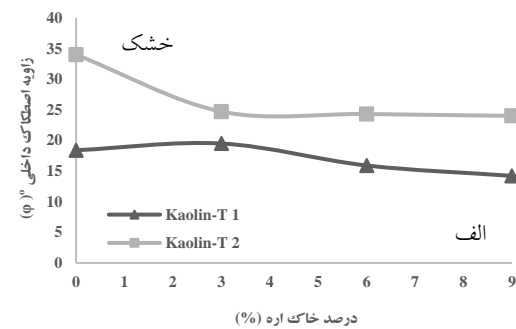
تأثیر خاک‌اره بر روی زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) خاک‌های رسی کائولنی در دو شرایط آزمایشی خشک و اشباع در شکل (۵-الف و ب) قابل مشاهده است. با توجه به دیگرام‌ها می‌توان دریافت، در حالت شرایط آزمایشی خشک و در وضعیت تثبیت نشده، خاک رس کائولن نوع ۲ دارای زاویه اصطکاک بالاتری در مقایسه با خاک رس کائولن نوع ۱ است. هم‌چنین، با مقایسه دیگرام‌ها در دو شرایط آزمایشی خشک و اشباع می‌توان دریافت که زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها در شرایط خشک در مقایسه با حالت اشباع دارای مقدار بالاتری است. در شرایط بارگذاری خشک هنگامی که خاک‌اره به نمونه‌های خاکی مورد مطالعه اضافه شد، مشاهده گردید که یک بهبودی نسبی در زاویه اصطکاک داخلی در ۳٪ وزنی خاک‌اره در کائولن نوع ۱ صورت گرفته است که به میزان ۶٪ افزایش داشته است. سپس، با افزایش درصد خاک‌اره در نمونه‌های مورد مطالعه میزان ϕ یک روند کاهشی نمایان کرده است. در خاک رسی کائولن نوع ۲ افزودن خاک‌اره باعث کاهش در زاویه اصطکاک داخلی شده است. در شرایط آزمایشی اشباع، برخلاف حالت خشک با افزودن خاک‌اره به نمونه‌های مورد مطالعه مشاهده شد یک روند افزایشی در میزان ϕ به وقوع پیوسته است؛ به طوری که با

پایین بودن خاصیت چسبندگی دارای توانایی باربری نسبی بالایی در مقایسه با کائولن نوع ۱ است ولی حضور خاک‌اره باعث افزایش نسبی فضای خالی بین ذرات می‌گردد و در نتیجه کاهش توانایی به وقوع می‌پیوندد. در شکل (۴-ب) می‌توان مشاهده نمود که افزودن خاک‌اره به خاک‌های کائولنی باعث افزایش میزان کرنش محوری در لحظه گسیختگی شده است. البته افزایش شکل پذیری در خاک کائولن نوع ۱ با توجه به خاصیت خمیری بالاتر، بیشتر است. با توجه به شکل (۴-ج) می‌توان تأثیر خاک‌اره بر روی تغییرات مدول الاستیسیته را مشاهده نمود. بر این اساس می‌توان دریافت که افزودن ۳٪ خاک‌اره در کائولن نوع ۱ باعث بهبود نسبی مدول الاستیسیته به میزان ۳/۵٪ شده است. خاک کائولن نوع ۲، اگرچه در هر دو حالت تثبیت نشده و تثبیت شده دارای مقدار مدول الاستیسیته بالایی در مقایسه با کائولن نوع ۱ است ولی افزودن خاک‌اره به آن باعث یک روند کاهشی در مدول الاستیسیته می‌گردد.



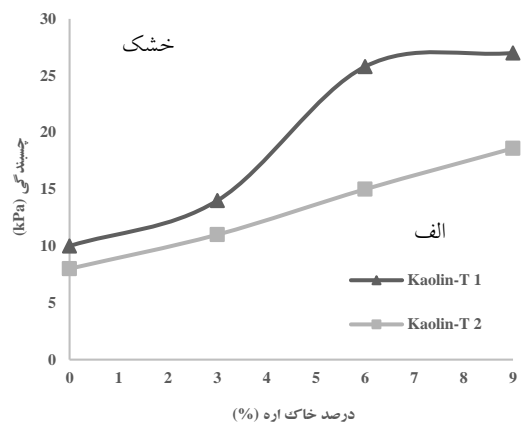
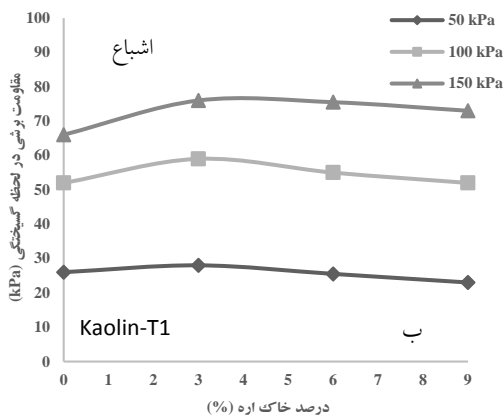
ذرات خاکاره به نمونه‌ها اضافه شد مشاهده گردید که در شرایط آزمایشی خشک، چسبندگی با افزایش درصد حضور خاکاره در خاک‌های رسی یک روند افزایشی نشان داده‌است؛ به گونه‌ای که در ۹٪ خاکاره مقدار چسبندگی در خاک‌های رسی کائولن نوع ۱ و نوع ۲ به ترتیب ۱/۷ و ۱/۳ برابر افزایش یافته‌است. در شرایط آزمایشگاهی اشباع، مشاهده شد افزودن خاکاره باعث کاهش چسبندگی می‌شود. نتایج به دست آمده باتوجه به میزان رطوبت و خصوصیات خمیری نمونه‌های رس قابل بیان است. مقدار رطوبت در صورتی که از حد بهینه تجاوز نماید، به علت ایجاد شرایط لغزندگی و صابونی شدن، خاکاره نمی‌تواند چسبندگی مناسبی را بین ذرات رس به وجود آورد. از سوی دیگر، در حالت خشک، به دلیل آن‌که آزمایش در شرایط رطوبت طبیعی محیط انجام گرفته‌است، حضور ذرات خاکاره باعث اندرکنش مناسب بین ذرات خاک رس شده‌است و سبب افزایش میزان چسبندگی نمونه‌های رس تثبیت شده گردیده‌است. تأثیر خاکاره بر روی مقادیر مقاومت برشی در لحظه گسیختگی خاک‌های رسی کائولن نوع ۱ و نوع ۲ در دو شرط آزمایشگاهی خشک و اشباع به ترتیب در شکل‌های (۷- الف و ب) و (۸- الف و ب) ارائه شده‌است. طبق شکل (۷- الف و ب) در شرایط آزمایشی خشک، مشاهده می‌شود که در خاک کائولن نوع ۱ هنگامی که ۳٪ خاکاره افزوده شود، مقاومت برشی نمونه خاک تثبیت شده به طور میانگین (در سه مقدار تنش قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال) به میزان ۲۶/۱٪ در مقایسه با حالت تثبیت نشده افزایش می‌یابد. در شرایط آزمایشی اشباع، می‌توان دریافت که افزودن خاکاره باعث بهبود مقاومت برشی خاک رس کائولن نوع ۱ می‌گردد؛ به گونه‌ای که افزودن ۳ درصد خاکاره به طور میانگین باعث افزایش ۱۲/۱٪ مقاومت برشی نمونه خاک تثبیت شده نسبت به حالت اصلاح نشده می‌گردد.

افزایش حضور خاکاره به مقدار ۹٪، زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های تثبیت شده به حداکثر میزان خود می‌رسد. این افزایش در خاک‌های رسی کائولن نوع ۱ و نوع ۲ به ترتیب تقریباً ۵۳٪ و ۴۹/۳٪ است. نتایج به دست آمده باتوجه به خاصیت جذب آب توسط ذرات خاکاره و فضای خالی بین ذرات قابل بیان است. در نمونه‌های اشباع جذب بیشتر رطوبت توسط ذرات اره و ایجاد تماس بیشتر بین آنها و ذرات رس، سبب گردیده‌است تغییرات زاویه اصطکاک داخلی رفتار متفاوتی را در مقایسه با شرایط بارگذاری خشک داشته باشد.

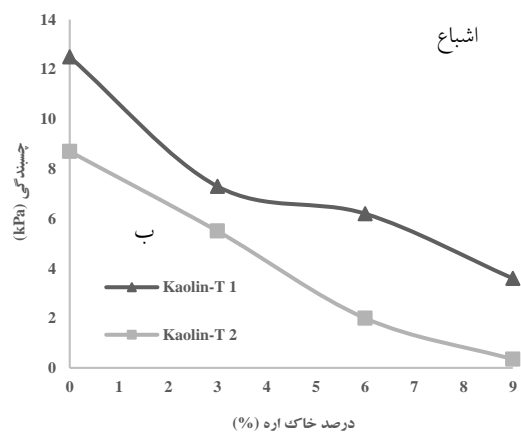


شکل ۵ تأثیر خاکاره بر روی زاویه اصطکاک داخلی مصالح مورد مطالعه: (الف) حالت خشک، (ب) حالت اشباع

تأثیر خاکاره بر روی میزان چسبندگی نمونه‌های خاکی ارزیابی شده‌است و نتایج مطالعه طبق شکل (۶- الف و ب) قابل مشاهده است. در شرایط تثبیت نشده، مشاهده می‌گردد که خاک رس کائولن نوع ۱ به دلیل خاصیت خمیری بالا در هر دو شرایط آزمایشی خشک و اشباع دارای بالاترین میزان چسبندگی است. هنگامی که

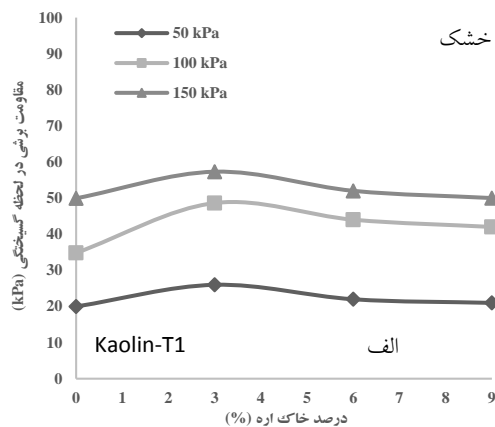


شکل ۷ تأثیر خاک‌اره بر روی مقاومت برشی خاک رس کائولن نوع ۱: الف) حالت خشک، ب) حالت اشباع

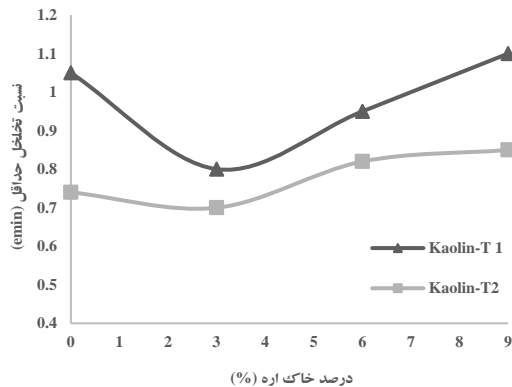


باتوجه به شکل (۸- الف و ب) می‌توان تأثیر خاک‌اره بر روی میزان مقاومت برشی خاک رس کائولن نوع ۲ را مشاهده نمود. در شرایط آزمایش خشک میزان مقاومت برشی در نمونه خاک مورد مطالعه هنگامی که ۳٪ خاک‌اره افزوده شده باشد به مقدار ۸/۵٪ به طور میانگین (در سه تنش بارگذاری قائم) افزایش می‌یابد. در شرایط آزمایش اشباع، افزودن خاک‌اره به طور کلی باعث افزایش مقاومت برشی می‌شود ولی بیشترین تأثیر در مقدار ۳٪ خاک‌اره است که به طور میانگین سبب افزایش توانایی باربری خاک مورد مطالعه به میزان ۱۱/۷۶٪ می‌گردد. با در نظر گرفتن تأثیرگذاری خاک‌اره بر میزان تغییرات نسبت تخلخل حداقل و نحوه قرارگیری ذرات رس در کنار ذرات اره، می‌توان طبق شکل (۹) دریافت که به دلیل آن که ۳٪ خاک‌اره در خاک رس کائولنی نوع ۱ فضای خالی کمتری را به وجود آورده و باعث گردیده تا نمونه تثبیت شده تراکم پذیرتر گردد، در نتیجه، زاویه اصطکاک داخلی بالاتری را ایجاد نموده و در حالت اشباع مقاومت برشی بالاتری را نسبت به شرایط بارگذاری خشک به وجود آورده است.

شکل ۶ تأثیر خاک‌اره بر روی چسبندگی مصالح مورد مطالعه: الف) حالت خشک، ب) حالت اشباع



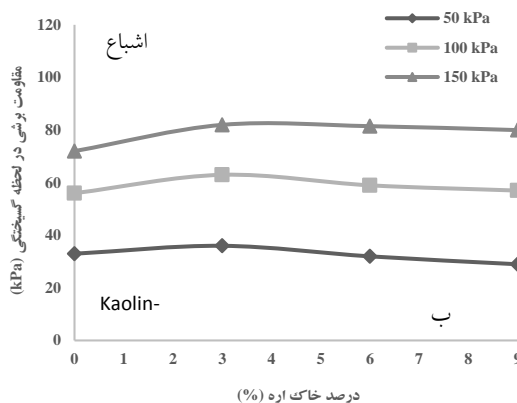
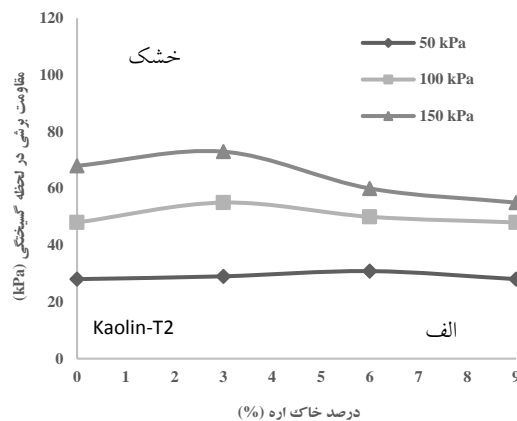
رفته که سبب سست شدن ساختار و ماتریس ذرات خاک می‌گردد که نتیجه آن، کاهش میزان توانایی باربری است.



شکل ۹ تأثیر خاکاره بر روی تغییرات نسبت تخلخل حداقل در نمونه‌های مورد مطالعه

نتایج حاصل از آزمایش نفوذپذیری

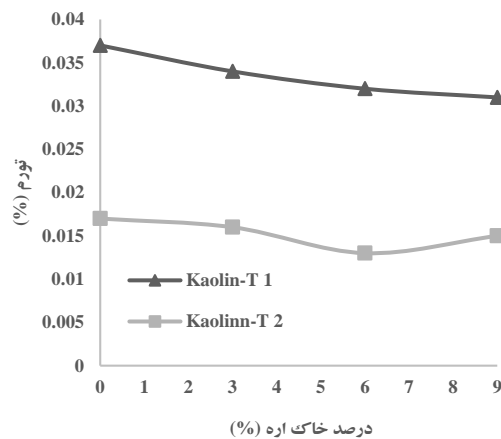
یکی از موضوعات مهم در خاک‌های ریزدانه رسی، ارزیابی رفتار آنها تحت اثر جریان آب و برآورد میزان نفوذپذیری است. در تحقیق حاضر، تأثیر خاکاره بر روی میزان نفوذپذیری خاک‌های رسی کائولنی مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج آن در شکل (۱۰) ارائه شده است. باتوجه به نمودارها می‌توان دریافت، در حالت تثبیت‌نشده میزان نفوذپذیری خاک رسی کائولن نوع ۲ در مقایسه با کائولن نوع ۱ باتوجه به نوع کانی آن (طبق جدول ۴) و حضور ذرات کوارتز بیشتر و پایین بودن خاصیت خمیری آن دارای مقدار بیشتری است. نتایج به‌دست‌آمده برخلاف مطالعات صورت‌گرفته توسط الحالم و البرودی [12] است. باتوجه به این‌که ۸۰٪ اندازه ذرات خاکاره مورد مطالعه در تحقیق حاضر کمتر از ۱/۱۹ میلی‌متر انتخاب گردیده است، هنگامی‌که به نمونه‌های مورد مطالعه افزوده شد، مشاهده گردید میزان نفوذپذیری با افزایش حضور خاکاره در هر دو نوع خاک کائولن روند کاهندگی را طی نموده است. میزان نرخ کاهش نفوذپذیری نسبت به حالت تثبیت‌نشده به‌طور میانگین در نمونه خاک کائولن نوع ۱ و کائولن نوع ۲ به‌ترتیب برابر با ۵۸/۲٪ و ۳۰/۷٪



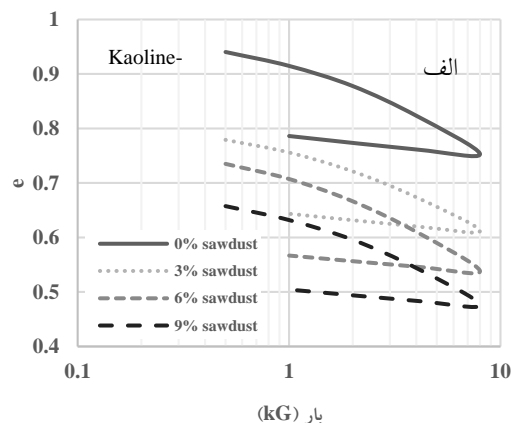
شکل ۸ تأثیر خاکاره بر روی مقاومت برشی خاک رس کائولن نوع ۲: الف) حالت خشک، ب) حالت اشباع

هم‌چنین، نتایج به‌دست‌آمده حاصل از آزمون‌های برش مستقیم را می‌توان براساس تغییرات نسبت تخلخل حداقل (e_{min}) طبق شکل (۹) بیان نمود. باتوجه به نمودارها می‌توان دریافت در حالت تثبیت‌نشده، خاک رس کائولن نوع ۱ به‌دلیل خاصیت خمیری بالا نسبت تخلخل حداقل بالاتری در مقایسه با کائولن نوع ۲ دارد که بیان‌کننده شکل‌پذیری بیشتر آن است. هنگامی‌که خاکاره به نمونه‌های مورد مطالعه افزوده می‌شود مشاهده می‌گردد در حضور ۳٪ خاکاره فضای خالی بین ذرات خاک رس کائولنی کاهش می‌یابد که این میزان کاهش در کائولن‌های نوع ۱ و نوع ۲ به‌ترتیب ۲۴٪ و ۵/۴٪ می‌باشد. این شرایط بیان‌کننده آن است که ذرات خاکاره در رس-های کائولنی با خاصیت خمیری بالا تأثیرگذاری مناسب‌تری دارند. از سوی دیگر، با افزایش میزان خاکاره در درون ذرات رسی، فضای خالی بین ذرات بالا

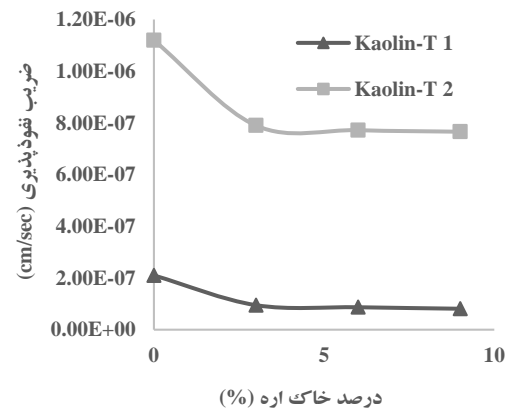
هم‌چنین تغییرات میزان نسبت تخلخل و شاخص نشست تحکیم (Cs) بر روی خاک‌های مورد مطالعه تحت اثر خاکاره به ترتیب در شکل (۱۲-الف و ب) و (۱۳) ارائه شده‌است. با مشاهده نمودارهای شکل (۱۲-الف و ب) می‌توان دریافت در حالت کلی افزودن خاکاره باعث کاهش میزان نسبت تخلخل و نشست تحکیم در نمونه‌های حاکی مورد مطالعه می‌گردد. هم‌چنین، باتوجه به دیاگرام‌های شکل (۱۳) می‌توان مشاهده نمود در حالت تثبیت‌نشده خاک رس کائولن نوع ۱ میزان نشست تحکیمی بیشتری نسبت به خاک رس کائولن نوع ۲ دارد. زمانی که خاکاره به نمونه‌ها افزوده می‌شود مشاهده می‌گردد در ۳٪ خاکاره بیشترین اثر در کاهش نشست تحکیم نمایان است که این تأثیر در خاک رس کائولن نوع ۱ و نوع ۲ به ترتیب برابر ۱۶/۶٪ و ۱۵/۴٪ است.



شکل ۱۱ تأثیر خاکاره بر روی میزان تورم خاک‌های رسی کائولنی مورد مطالعه



می‌باشد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت خاکاره با اندازه ذرات ریز می‌تواند به عنوان یک آب‌بند در خاک‌های رسی کائولنی مورد استفاده قرار گیرد.

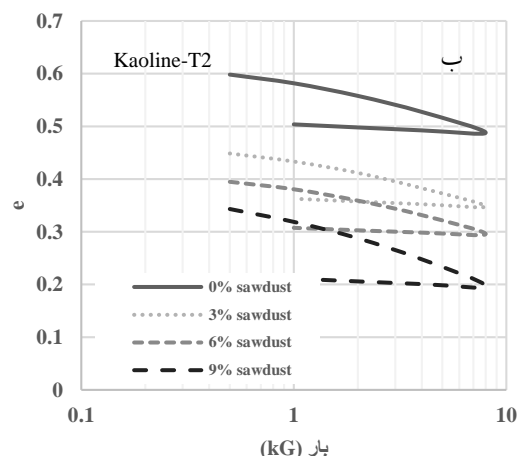
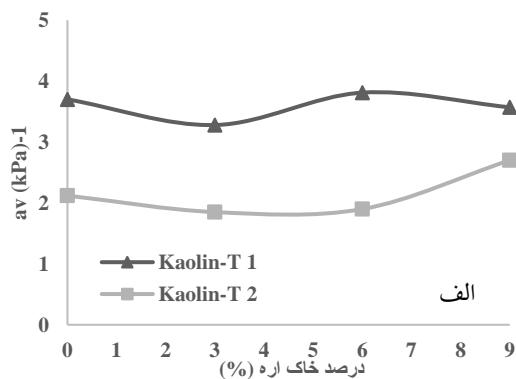


شکل ۱۰ تأثیر خاکاره بر روی میزان نفوذپذیری خاک‌های رسی کائولنی مورد مطالعه

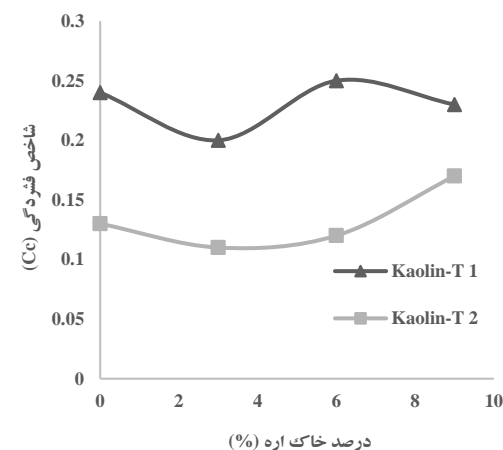
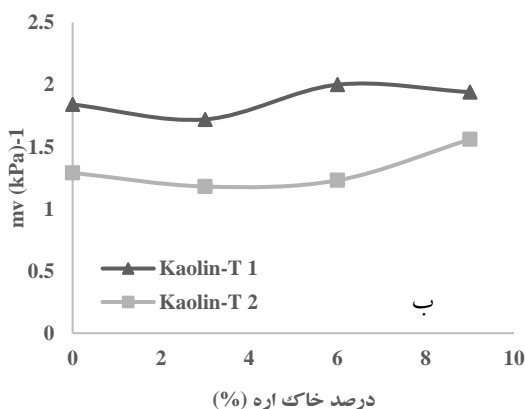
نتایج حاصل از آزمایش تحکیم

نشست تحکیم و تورم در خاک‌های ریزدانه رسی ناشی از جذب آب و رطوبت از نمونه‌های رفتاری در خاک‌های مسئله‌دار می‌باشد. در این مطالعه، با انجام آزمایش تحکیم، تأثیر خاکاره بر روی میزان نشست و تورم خاک‌های رسی کائولنی ارزیابی شده‌است. تأثیر خاکاره بر روی میزان تورم آزاد نمونه‌های مورد مطالعه طبق شکل (۱۱) قابل مشاهده است. باتوجه به نمودارها می‌توان دریافت، در حالت تثبیت‌نشده خاک رس کائولن نوع ۱ به دلیل خواص خمیری بالا دارای پتانسیل تورمی بالاتری نسبت به خاک کائولن نوع ۲ است. هنگامی که به نمونه‌های مورد مطالعه خاکاره افزوده می‌گردد مشاهده می‌شود به دلیل خاصیت جذب آب ذرات خاکاره میزان تورم کاهش یافته و از افزایش حجم جلوگیری شده‌است. میزان کاهش تورم به‌طور میانگین در خاک‌های کائولن نوع ۱ و نوع ۲ به ترتیب ۱۲/۶٪ و ۱۳/۶٪ می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده مطابق با مطالعات صورت‌گرفته توسط چمانی و همکاران [9]، رائوکاتسوارا [10] و مانوکاجی [1] می‌باشد.

خاک رس کائولنی گردید. بنابراین میزان کاهش av در اثر خاکاره در خاک رس کائولن نوع ۱ و نوع ۲ به ترتیب $۱۱/۳\%$ و $۷/۷\%$ می باشد. همچنین مقدار کاهش در mv در کائولن های نوع ۱ و نوع ۲ به ترتیب $۶/۵۲\%$ و $۸/۵۲\%$ است.



شکل ۱۲ تأثیر خاکاره بر روی میزان نسبت تخلخل خاک های رسی کائولنی مورد مطالعه، الف) خاک رسی کائولنی نوع ۱، ب) خاک رسی کائولنی نوع ۲



شکل ۱۴ تأثیر خاکاره بر روی پارامترهای نشست تحکیم خاک های رسی کائولنی مورد مطالعه: الف) ضریب تراکم پذیری (av)، ب) ضریب تغییر حجم (mv)

شکل ۱۳ تأثیر خاکاره بر روی میزان شاخص فشردگی (Cc) خاک های رسی کائولنی مورد مطالعه

جمع بندی و نتیجه گیری

خاک های متورم شونده از جمله خاک های مشکل آفرین در پروژه های عمرانی محسوب می شوند. تغییر حجم ناشی از تغییر رطوبت در آنها همواره موجب بروز خسارات فراوانی به سازه ها و بناهای ساخته شده بر روی آنها (کانال های آبیاری و زهکشی، دیوارهای حائل، بزرگراه ها و تونل ها) می شود؛ بنابراین باید با به کارگیری روش هایی خسارت های ناشی از تورم خاک ها را کاهش داد. هدف از تحقیق حاضر، بررسی تأثیر خاکاره به عنوان

در ادامه، تأثیر خاکاره بر روی پارامترهای نشست تحکیم هم چون ضریب تراکم پذیری (av) و ضریب تغییر حجم (mv) نمونه های مورد مطالعه طبق شکل (۱۴-الف و ب) ارائه شده است. با مشاهده نتایج به دست آمده می توان دریافت مشابه حالت های ذکر شده در بالا، در شرایط تثبیت نشده خاک رس کائولن نوع ۱ دارای بیشترین میزان av و mv در مقایسه با خاک رس کائولن نوع ۲ می باشد. زمانی که به نمونه های مورد مطالعه ۳% خاکاره افزوده شد باعث کاهش تراکم پذیری و تغییر حجم نمونه های

(به میزان ۰/۸۵۲٪) افزوده شده است.

۴. در حالت کلی افزودن خاک‌اره باعث کاهش میزان نفوذپذیری در هر دو نوع خاک رس شده است. نتایج به دست آمده برخلاف مطالعات صورت گرفته توسط الحالم و البرودی [12] است؛ به دلیل آن که ۸۰٪ اندازه ذرات خاک‌اره در مطالعه حاضر کمتر از ۱/۱۹ میلی‌متر است، که این امر سبب کاهش میزان نفوذپذیری گردیده است. همچنین افزودن خاک‌اره در هر دو نوع رس کائولنی باعث کاهش مقدار تورم در نمونه‌های خاکی مورد مطالعه گردیده است. این روند مشابه با مطالعات صورت گرفته توسط مانوکاجی [1]، چمانی و همکاران [9] و راثوکتسوارا [10] است.

باتوجه به نتایج به دست آمده می‌توان اشاره نمود رفتار خاک ریزدانه رسی تثبیت شده با ذرات خاک‌اره متأثر از نسبت تخلخل حداقل (e_{min}) و خاصیت جذب رطوبت و اندازه ذرات چوب می‌باشد. در حالت تثبیت نشده خاک رس کائولن نوع ۱ به دلیل خاصیت خمیری بالا، نسبت تخلخل حداقل بیشتری در مقایسه با کائولن نوع ۲ دارد که بیان‌کننده فضای خالی زیاد بین ذرات و شکل‌پذیری بیشتر آن است. همچنین حضور ذرات خاک‌اره و افزایش میزان حضور آنها در بین فضای ذرات خاک‌های کائولنی، سبب افزایش فضای خالی بین ذرات رس در نمونه تثبیت شده گردیده و باعث سست شدن ساختار و ماتریس ذرات خاک گردیده است. در این شرایط میزان ظرفیت باربری و مقاومت نمونه‌های مورد مطالعه کاهش می‌یابد. البته خاصیت جذب آب توسط خاک‌اره بر رفتار ژئوتکنیکی خاک رس تثبیت شده تأثیر می‌گذارد. نتایج به دست آمده از مطالعه حاضر نشان می‌دهد با افزودن خاک‌اره در خاک رس میزان تورم و نفوذپذیری کاهش یافته است. درانتها باتوجه به نتایج به دست آمده می‌توان بیان کرد، خاک‌اره درخت کاج با اندازه ذرات کوچک‌تر از ۱/۱۹ میلی‌متر بر روی خاک رسی کائولن با خاصیت خمیری بالا تأثیر بیشتری نسبت به خاک رس با خاصیت خمیری پایین داشته است؛ بنابراین از خاک رسی

یک ماده ضایعاتی باطله بر روی خواص مکانیکی و ژئوتکنیکی خاک‌های رس کائولنی با خواص خمیری متفاوت می‌باشد. در این مطالعه، خاک‌اره با درصدهای وزنی ۳، ۶ و ۹ با دو نوع خاک رس کائولنی به صورت تصادفی مخلوط گردید و رفتار خاک‌های تثبیت شده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج مطالعات نشان داد که در حالت کلی بهینه‌ترین مقدار ذرات خاک‌اره برای به‌سازی رفتار خاک رس برابر ۳٪ وزنی می‌باشد. دلایل آن را می‌توان به شرح ذیل بیان نمود:

۱. زمانی که ۳٪ خاک‌اره به نمونه‌های مورد مطالعه افزوده شد، نسبت تخلخل حداقل در خاک رس کائولن ۱ با خاصیت خمیری بالا به میزان ۲۴٪ کاهش یافت که نتیجه آن افزایش تراکم‌پذیری و کاهش جذب آب است. با افزایش میزان حضور خاک‌اره رفتار تغییر یافت و باعث کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و ایجاد پوکی و افزایش جذب رطوبت گردید. این روند مشابه با مطالعات انجام یافته توسط مانوکاجی [1] و اولابایوده [13] می‌باشد.

۲. مخلوط کردن ۳٪ وزنی خاک‌اره در خاک رس کائولن نوع ۱ سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری (به میزان ۳۳٪)، مدول الاستیسیته (به میزان ۳/۵٪) و مقاومت برشی (به میزان ۲۶/۱٪) در حالت خشک و ۱۲/۱٪ (در حالت اشباع) گردیده است. افزایش درصد خاک‌اره سبب کاهش میزان توانایی باربری گردید که مشابه با مطالعات انجام یافته توسط اولابایوده [13] است.

۳. خاک‌اره بر روی رفتار تحکیمی خاک‌های رس مورد مطالعه نیز تأثیر گذاشته است؛ به طوری که، افزودن خاک‌اره باعث کاهش میزان نشست تحکیم در هر دو نمونه مورد مطالعه گردیده است. همچنین خاک‌اره بر روی رفتار تحکیم هر دو نوع خاک رس کائولنی مؤثر است ولی در خاک کائولن نوع ۲ دارای تأثیرگذاری بیشتر می‌باشد؛ به طوری که ضریب تراکم‌پذیری (به میزان ۱۱/۳٪) و ضریب تغییر حجم

تنبیت شده با خاکاره می توان برای احداث لایه خاک بستر روسازی راه در معرض رطوبت، به سازی خاک زیر پی و در احداث ابنیه های ژئوتکنیکی استفاده نمود. البته نوع خاکاره، اندازه آن و شرایط کاربرد آن (مرطوب و یا سوخته) می تواند بر رفتار ژئوتکنیکی خاک رسی تنبیت شده تأثیر گذار باشد که سعی می گردد در تحقیقات آینده مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

1. Manukaji, U., "The Effects of Sawdust Addition on the Insulating Characteristics Of Clays From The Federal Capital Territory Of Abuja", *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 3, No. 2, Pp. 6-19. (2013).
2. نوظهور، س و فروغی اصل، ع. «بررسی خواص مکانیکی بتن خاکاره ای»، فصل نامه آنالیز سازه- زلزله، ج. ۱۴، ش. ۲، صص. ۱-۱۴، (۱۳۹۶).
3. Kontopoulos, N., "The Effects of Sample Disturbance on Pre-consolidation Pressure for Normally Consolidated and over consolidated Clays", Diploma In Civil Engineering, Civil And Environmental Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology. (2012).
4. Asadollahi, F. and Dabiri, R., "Effects of Glass Fiber Reinforced Polymer on Geotechnical Properties of Clayey Soil", *Journal of Structural Engineering and Geotechnics*, Vol. 7, No. 2, Pp. 73-83, (2017).
5. Sahebkarim A., A. and Dabiri, R., "Effects of the Fiber Types on Improving the Bearing Capacity of Clayey Soil", *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, Vol. 9, No. 1, Pp. 43-50, (2017).
6. FHWA, "Ground modification methods references manual", Vol. 1 and Vol. 2, U.s. Depart. Of Trans. Feder. High. Admin, (2017).
7. سیروس پور، س.، پرویزی، م.، پروین نیا، م. و شکرالهی، ا. «حذف نیترات از سیلاب های شهری توسط فرایند فیلتر چندگانه»، نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک، ج. ۲۴، ش. ۱، ۸۵-۱۰۱، (۱۳۹۶).
8. کافی، ذ.، گنجی دوست، ح. و آیتی، ب. «حذف رنگ از محلول آبی با خاکاره و رس بتونیت»، نشریه عمران مدرس، دوره یازدهم، ش. ۳، صص. ۶۷-۱۲۵، (۱۳۹۰).
9. Chemani, B. and Chemani, H., "Effect of Adding Sawdust on Mechanical-Physical Properties of Ceramic Bricks to Obtain Lightweight Building Material", *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 11, Pp. 36-55. (2012).
10. Koteswara Rao, D., Anusha, M., Pranav, P.R.T. and Venkatesh, G., "A Laboratory Study On The Stabilization Of Marine Clay Using Saw Dust And Lime", *International Journal of Engineering Science & Advanced Technology*, Vol. 2, Pp. 851-862. (2012).
11. Edeh, J., Agbede, I. and Tyoyila, A., "Evaluation of Sawdust Ash-Stabilized Lateric Soil as Highway Pavement Material", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.26, Pp. 367-373, (2014).
12. El Halim, A. and El Baroudy, A., "Influence addition of Fine Sawdust on Physical Properties of

- Expansive Soil in the Middle Nile Delta, Egypt", *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, Vol.14, No.2, pp :483-490, (2014).
13. Olubayode, S. A., Olateju, O. T., Awokola, O. S., Dare, E. O., Akinwamide, J. T. and Eshiett, I. M., "Engineering Properties of Sawdust Modified Clay Soil", *International Journal of Pure & Applied Bioscience*, Vol. 3, No. 5, Pp. 35-41, (2015).
 14. Naranagowda, M. J., Nithin, N. S., Maruthi, K. S. and Mosin Khan, D. S., "Effect of Sawdust Ash And Fly Ash on Stability of Expansive Soil", *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol. 4, No.7, Pp. 83-96, (2015).
 15. Khan, S. and Khan, H., "Improvement of Mechanical Properties by Waste Sawdust Ash Addition into Soil", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 20, Pp.1901-1914, (2015).
 16. Kumar, R. and Jain, P., "Prediction of Compression Index (Cc) of Fine Grained Remolded Soils from Basic Soil Properties", *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 11, No.1, Pp. 592-598, (2016).
 17. Iran China Clay Industries Company, Marand, East Azerbaijan, Iran. www.icckaolin.com.
 18. ASTM D421-85, "Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants", Annual book of ASTM standards, (1985).
 19. ASTM D422-63, "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils", Annual book of ASTM standards, (1963).
 20. ASTM D 4318-95a, "Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index for Soils", Annual book of ASTM standards, (1995).
 21. ASTM D 854-02, "Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer", Annual book of ASTM standards, (2002).
 22. ASTM-D 698-00, "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, (2000).
 23. ASTM D2166-16, "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil", Annual book of ASTM standards, (2016).
 24. ASTM D3080-11, "Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions", Annual book of ASTM standards, (2011).
 25. ASTM D5084-03, "Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using Flexible Wall Permeameter", Annual book of ASTM standards, (2003).
 26. ASTM D2435-11, "Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading", Annual book of ASTM standards, (2011).