



تأثیر آلاینده فلز سنگین بر پارامترهای مقاومت برشی خاک رسی ماسه‌دار

علیرضا نگهدار^{*}، محمدرضا شعبانیان، مینو نیک قلب پور

دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۴ اردیبهشت ۱۳۹۶
بازنگری: ۱۸ مرداد ۱۳۹۶
پذیرش: ۲۱ مرداد ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۲ شهریور ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

خاک رسی ماسه‌دار
آلاینده فلز سنگین
چسبندگی
زاویه اصطکاک داخلی
حدود اتربرگ

چکیده: ویژگی‌های مطلوب فیزیکی و رفتاری خاک‌های رسی، موجب استفاده‌ی گسترده از آن‌ها در مراکز دفن مهندسی زباله شده است. خاک‌های رسی به دلیل ساختار خاص کانی خود قادرند با مواد موجود در آلاینده‌ها در اندرکنش قرار گرفته و تمام یا قسمتی از مواد خطرناک موجود در شیرابه‌ی نشت یافته در خود را جذب نمایند. مطالعات پیشین نشان‌دهنده آن است که تغییر در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مایع منفذی در خاک، بسته به نوع کانی‌های تشکیل دهنده خاک‌های رسی و ساختار خاک، به میزان محسوسی بر مشخصات مهندسی خاک از جمله پارامترهای برشی، میزان تورم و درصد جذب آب تأثیرگذار است. هدف تحقیق حاضر، مطالعه تأثیر حضور آلاینده‌های فلز سنگین بر برخی پارامترهای مقاومتی و ژئوتکنیکی خاک‌های رسی ماسه‌دار است. برای این منظور پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، آزمایش‌های جذب، برش مستقیم و تعیین حد روانی بر روی نمونه‌هایی که در معرض آلاینده‌های فلز سنگین سرب و روی قرار گرفته بودند، انجام شد. نتایج نشان‌دهنده آن است که در سه نوع خاک مورد مطالعه (نمونه‌های مخلوط کاتولینیت-ماسه با درصد‌های مختلف ماسه) با افزایش غلظت هر دو آلاینده چسبندگی خاک کاهش یافته است. به گونه‌ای که با افزایش غلظت هر دو آلاینده‌ی فلز سنگین تا ۲۵ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک، چسبندگی نمونه‌های حاوی ۹۰٪ و ۶۰٪ کاتولینیت در حضور آلاینده‌ی روی به ترتیب ۲۰٪ و ۲۳٪ و در حضور آلاینده‌ی سرب به ترتیب به میزان ۴۲٪ و ۵۱٪ کاهش یافته است. در حالی که زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها تحت تأثیر حضور آلاینده‌های فلز سنگین نبوده است.

۱- مقدمه

ویژگی‌های مطلوب فیزیکی و رفتاری خاک‌های رسی، موجب استفاده‌ی گسترده از آن‌ها در مراکز دفن مهندسی زباله شده است. خاک‌های رسی به دلیل ساختار خاص خود قادرند با مواد موجود در آلاینده‌ها در اندرکنش قرار گرفته و تمام یا قسمتی از مواد خطرناک موجود در شیرابه‌ی نشت یافته در خود را جذب نمایند. این قابلیت باعث محدود شدن جریان انتقال آلاینده‌ها به آب‌های زیرزمینی یا تأخیر افتادن آن می‌شود [۱].

بررسی تغییر رفتار فیزیکی-شیمیایی و مکانیکی مصالح خاکی به علت تغییر در توزیع نیروهای الکترواستاتیکی ناشی از نشت شیرابه یکی از مهم‌ترین موضوعات در استفاده از مصالح رسی به عنوان نگه‌دارنده‌های آلودگی محسوب می‌شود. این در حالی است که مکانیک خاک کلاسیک بر اساس مفهوم تنش مؤثر بنا شده و در آن تأثیر نیروهای الکترواستاتیکی فاز مایع بر رفتار مقاومتی خاک منظور نشده و از اثر نیروهای موجود در سطح مشترک آب و خاک، که منجر به اندرکنش بین ذرات خاک، یون‌های محلول و آب می‌شود، صرف‌نظر شده است [۲]. خصوصیات خاک‌های رسی به میزان زیادی وابسته به اندرکنش بین ذرات خاک و سیال منفذی پیرامون آن

است. بار الکتریکی خالص بر روی ذرات رسی منفی است، که سبب می‌شود کاتیون‌های حل شده در سیال منفذی پیرامون، جذب سطح ذرات رس شوند. به لایه‌ای از آب و یون‌های جذب شده، که ذرات رس را احاطه می‌کنند، لایه دوگانه پخشیده (DDL) یا لایه دوگانه الکتریکی اطلاق می‌شود [۳]. نظریه لایه دوگانه در ابتدا توسط گوی^۱ (۱۹۱۳) و چپمن^۲ (۱۹۱۳) ارائه، سپس توسط استرن^۳ (۱۹۲۴) اصلاح شد. مطابق نظریه لایه دوگانه گوی-چپمن، ضخامت لایه دوگانه از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$\frac{1}{K} = \left[\frac{DkT}{8\pi n_0 v^2 \epsilon^2} \right]^2 \quad (1)$$

در معادله ۱، D ثابت دی‌الکتریک سیال، T دما برحسب درجه کلون، غلظت الکترولیت e (ion/m³) بار الکتریکی الکترون (c) ۱۰^{-۱۹} × (۱/۶۰۲)، k ثابت بولتزمن (۱۰^{-۲۳} × ۱/۳۸)، ثابت دی‌الکتریک خلأ و ظرفیت یونی است. مطابق معادله ۱، ضخامت لایه دوگانه تنها وابسته به نمک‌های حل شده و فاز مایع است از این رو تغییر در مشخصات فاز مایع

1 Goy
2 Chapman
3 Stern

^{*}نویسنده عهده‌دار مکاتبات: negahdar@uma.ac.ir

به یکدیگر نزدیکتر می‌شوند به عبارت دیگر ایجاد ساختار درهم که نتیجه فرایند کاهش pH خواهد بود به نوبه خود باعث کاهش خصوصیات خمیری و افزایش نفوذپذیری شده است [۹].

علاوه بر آن، عدم دسترسی به منابع مناسب خاک رسی خالص از یک سو و برخی مشکلات استفاده از پوشش‌های رسی متراکم شده در مراکز دفن مهندسی زباله از جمله: بروز ترک در هنگام خشک‌سالی، حساسیت بسیار زیاد این پوشش‌ها به سیکل ذوب و یخبندان و همچنین مقاومت ناکافی در برابر سربارهای موجود از سوی دیگر موجب استفاده از مخلوط خاک‌های رسی و ماسه در برخی پروژه‌ها گردیده [۱۰].

پولیدور^۴ به بررسی رابطه بین حدود اتربرگ و نسبت رس در مخلوط رس - ماسه سیلیکاتی پرداخت [۱۱]. بر اساس تحقیقات صورت گرفته توسط این محققین حدود اتربرگ اندازه‌گیری شده ارتباط مستقیم و خطی با اندازه ذرات رسی دارد. همچنین انجام آزمایش برش مستقیم بر روی مخلوط خاک رس حاوی کانی مونت‌موریلونیت و دو نوع ماسه ریزدانه و درشت‌دانه نشان‌دهنده آن بود که مقاومت برشی حداکثر با افزایش درصد ذرات رسی کاهش می‌یابد [۱۲]. بایوگل و اسرا^۵ نیز مقاومت برشی و فشاری خاک رسی را در ترکیب با ماسه و سیلت مورد بررسی قرار دادند [۱۳]. بر اساس این نتایج تا زمانی که درصد ریز دانه موجود در خاک کمتر از ۵۰٪ بوده زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها در محدوده‌ی بین ۳۰ تا ۳۸ درجه قرار داشته‌است. درحالی‌که با افزایش درصد ریزدانه مقدار زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها تا ۱۰ درجه کاهش یافته است.

همان‌طور که بیان شد، طیف گسترده‌ای از پژوهش‌ها به بررسی تاثیر آلاینده‌های فلز سنگین بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های رسی و همچنین بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی مخلوط خاک‌ای رس و ماسه معطوف شده‌است. این در حالی‌است که مطالعات اندکی بر روی تغییرات پارامترهای مقاومت برشی خاک‌های رسی ماسه‌دار در حضور آلاینده‌های فلز سنگین صورت گرفته است. در این پژوهش سعی بر آن بوده تا با انجام آزمایشات برش مستقیم بر برخی آزمایشات تکمیلی، چگونگی تغییر پارامترهای مقاومت برشی خاک‌های رسی ماسه‌دار در حضور آلاینده‌های فلز سنگین مورد بررسی قرار گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

کائولینیت مورد استفاده در این پژوهش به صورت پودری سفیدرنگ مایل به شیری بوده که از شرکت صنایع خاک چینی ایران تهیه شده و تحت عنوان کائولینیت "سوپر" شناخته شده‌است. جدول ۱ برخی مشخصات ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی کائولینیت مورد استفاده، که بر اساس روش استاندارد ASTM 2007 تعیین شده را نشان می‌دهد.

ناشی از ورود آلاینده به محیط خاک سبب تغییر در ضخامت لایه دوگانه و در نتیجه مشخصات رفتاری خاک می‌شود. در حالی‌که هر چه ضخامت لایه دوگانه بیشتر باشد، تمایل ذرات به لخته شدن کمتر خواهد بود [۲]. در حوزه‌ی بررسی تأثیر آلاینده‌های فلز سنگین بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های رسی تحقیقات فراوانی صورت گرفته‌است. در زمینه‌ی بررسی مقاومت برشی، میراندا و همکاران^۱ با مطالعه اثر فلزات سنگین بر ویژگی‌های کائولینیت دریافتند که مقاومت برشی تحت تأثیر ساختمان کائولینیت قرار می‌گیرد [۴]. ساختمان کائولینیتی که در معرض مواد آلاینده قرار گرفته تغییر می‌کند و با افزایش فضای بین مولکولی، ذرات آزادی بیشتری برای حرکت دارند. کائولینیت به دلیل ساختار فشرده نسبت به سایر رس‌ها دارای مقاومت برشی بالاتری است، این در حالی‌ست که زاویه اصطکاک داخلی کائولینیت با افزایش فضای بین مولکولی کاهش می‌یابد. همچنین مطالعات دیگر نشان‌دهنده‌ی آن است که جذب کاتیون‌های دو ظرفیتی مانند سرب، روی و کادمیوم توسط کائولینیت موجب کاهش ضخامت لایه دوگانه شده، در نتیجه نیروهای دافعه کاهش یافته و ساختار مجتمع می‌شود. بر این اساس زمانی که کائولینیت در برابر آلاینده فلز دو ظرفیتی قرار بگیرد مقاومت برشی آن کاهش می‌یابد [۵]. مطالعات صورت گرفته در خصوص تأثیر آلاینده‌های فلز سنگین بر سایر مشخصات ژئوتکنیکی خاک‌های رسی از جمله حدود اتربرگ و خصوصیات تحکیمی آن‌ها نیز نشان‌دهنده‌ی آن است که رفتار خاک‌های رسی تحت تأثیر حضور و غلظت آلاینده‌ها است. سیواپولیا و مانژو^۲ مشخصات ژئوتکنیکی رس با خمیری پایین با استفاده از NaOH را مورد بررسی قرار دادند [۶]. این محققین دریافتند که حد روانی نمونه خاک با افزایش غلظت NaOH به دلیل شکل‌گیری ترکیب‌های متورم شونده افزایش می‌یابد. همچنین جانگ و همکاران^۳ اثر محلول‌های الکترولیتی را روی ویژگی‌های دو نوع خاک کائولینیت خالص و ترکیب ۷۰ درصدی کائولینیت با ۳۰ درصد ماسه را بررسی نمودند. این محققین دریافتند که محلول کلسیم کلرید اثر قابل ملاحظه‌ای بر حد روانی نداشته در حالی‌که موجب کاهش شاخص خمیری کائولینیت شده است [۷]. اوحدی و شریفیان در مطالعات خود، تنها تاثیر سرب و روی را بر حد روانی مخلوط ماسه در مراکز دفن مهندسی زباله مورد بررسی قرار دادند [۸] و نتایج مطالعات آن‌ها حاکی از آن بود که به طور کلی با افزایش غلظت آلاینده‌ها حد روانی خاک کاهش یافته است در ضمن کاهش در حد روانی در افزایش غلظت آلاینده ناشی از جانشینی کاتیون‌های با ظرفیت بالاتر، باعث فشرده شدن لایه دوگانه و در نتیجه کاهش دافعه بین ذرات می‌باشد. همچنین بررسی‌های انجام شده از سوی محققین پیشین حاکی از آن است که جذب آلاینده‌های فلز سنگین توسط خاک رسی موجب کاهش pH خاک می‌شود [۴]. کاهش pH سبب خنثی شدن بخشی از بارهای سطوح رسی می‌شود که با کم شدن پتانسیل سطحی پولک‌های رسی، نیروی دافعه کاهش یافته و ذرات

1 Miranda et al.

2 Sivapullaiah and Manju

3 Jang et al.

4 Polidori

5 Bayoğlu and Esra

دستگاه لرزاننده الکتریکی کاملاً باهم مخلوط شده و پس از رسیدن به تعادل، نمونه‌ها را داخل پیرکس‌های شیشه‌ای ریخته و در داخل گرم‌خانه با دمای ۶۰ درجه قرار داده تا کاملاً خشک شود.

البته لازم بذکر است نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها، خلاقیت محققین مختلف در این حوزه بوده و روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. در این پژوهش آماده‌سازی نمونه مطابق روش‌های مورد استفاده در پژوهش‌های انجام شده توسط یانگ و اوحدی [۱۴] و روش انجام آزمایش برش مستقیم با فرض شرایط طبیعی خاک در مراکز دفن زباله بوده است. به عبارت دیگر می‌توان بیان نمود که فرض گرفته شده دور از واقعیت هم نیست زیرا روند آلودگی خاک در مراکز دفن زباله به‌صورتی است که ابتدا شیرابه از خاک مورد نظر عبور کرده و خاک را آلوده می‌کند؛ پس از گذشت زمان و عدم استفاده از محل، خاک خشک شده و به‌دلیل پایین بودن سطح آب زیرزمینی در آن محل امکان اشباع شدن دوباره خاک آلوده بسیار کم است. لذا در شرایط موجود و با افزایش سربار شرایطی همانند UU را خواهیم داشت. بنابراین با توجه به شرایط انجام آزمایش امکان تغییر غلظت آلاینده‌ها و همچنین میزان نگهداشت آن‌ها توسط خاک در طول انجام آزمایش بسیار اندک است. از این‌رو پس از آماده‌سازی نمونه‌های خاک، به‌منظور بررسی اثر آلاینده‌های فلز سنگین بر حدود اتربرگ و پارامترهای مقاومت برشی، آزمایش تعیین حد روانی و برش مستقیم مطابق استاندارد ASTM D4318 و ASTM D3080-03 بر روی نمونه‌ها انجام شد. در آزمایش برش مستقیم در حالت تحکیم نیافته-زهکشی نشده ی (UU)، نمونه‌ها با رطوبت بهینه و تراکمی معادل حداکثر دانسیته‌ی به‌دست‌آمده از آزمایش تراکم درون قالب دستگاه برش مستقیم به ابعاد ۶ سانتی‌متر و ارتفاع ۲٫۶ سانتی‌متر متراکم شدند و با نرخ کرنش معادل ۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه تحت بارگذاری قرار گرفتند.

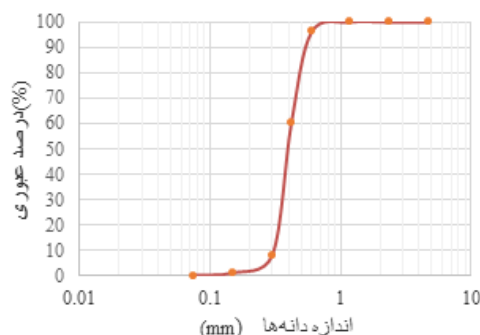
آنالیز مشخصات آب حفره‌ای به‌منظور تعیین میزان کاتیون‌های جذب‌شده مطابق روش ارائه شده در مرجع EPA [۱۵] و توسط دستگاه icp دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. برای انجام این آزمایش در ابتدا با هدف تعیین غلظت آلاینده‌ها در فاز محلول خاک، به میزان ۱ گرم از نمونه خاک ساخته‌شده (خاکی که در معرض آلاینده قرار گرفته) پس از خشک شدن و عبور از الک ۲۰۰ درون تیوب (لوله فالكون^۲) ریخته و به‌میزان ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر (نسبت ۱:۱۰) به آن اضافه شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۴ روز و روزی ۲ ساعت توسط دستگاه لرزاننده الکتریکی کاملاً باهم مخلوط شده است. پس از آن نمونه‌ها درون دستگاه سانتریفیوژ قرار گرفته و با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه، به مدت ۱۵ دقیقه فاز مایع و جامد خاک از هم جدا گردید، در پایان این مرحله غلظت آلاینده‌ها در فاز مایع توسط دستگاه icp اندازه‌گیری می‌شود. در ادامه به‌منظور تعیین مجموع غلظت آلاینده‌ها در دو فاز محلول و تبادل‌ی خاک، به‌میزان ۱ گرم از نمونه خاک ساخته‌شده پس از خشک شدن و عبور از الک ۲۰۰، درون تیوب ریخته و سپس ۱۰ میلی‌لیتر محلول باریم کلراید ۰/۱ مولار (نسبت ۱:۱۰) به آن اضافه شد که همانند

جدول ۱: خصوصیات اولیه فیزیکی و شیمیایی خاک کائولینیت

Table 1. Initial Physical and Chemical Characteristic of Kaolinite

مشخصه مورد ارزیابی	مقدار اندازه‌گیری شده
Liquid limit, %	۴۶
.P.I, %	۲۰
Soil Classification	CL
pH (1:50, Soil-Water)	۸/۹
Carbonate, %	۴

ماسه استفاده شده در این پژوهش در طبقه‌بندی ASTM-C778 ماسه سیلیسیم SiO₂ (اوتوا)، قرار دارد. در حالت خالص درصد سیلیکای موجود در آن حدود ۸/۹۹٪ می‌باشد. ذرات آن به شکل گرد و قطر ذرات ۰/۳ تا ۰/۶ میلی‌متر متغیر می‌باشد. نمودار دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: نمودار دانه بندی ماسه مورد استفاده

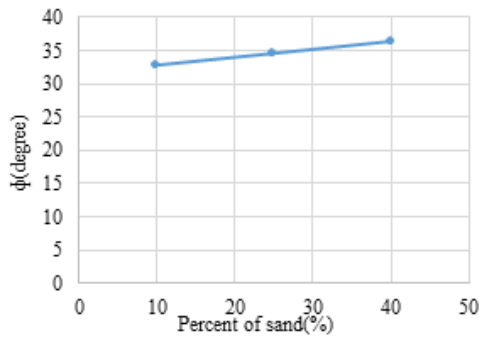
Fig. 1. Sieve Analysis of Sand Used in this research

ساخت نمونه‌های مخلوط کائولینیت-ماسه، با استفاده از ترکیب کائولینیت با نسبت‌های وزنی ۱۰٪، ۲۵ و ۴۰٪ ماسه انجام شد. ثابت ماندن نام‌گذاری خاک بر اساس سیستم نام‌گذاری یونیفاید (CL) در محدوده‌ی تقریباً وسیعی از تغییرات نسبت ماسه را می‌توان دلیل انتخاب این درصدها دانست.

به‌منظور افزودن آلاینده‌های فلز سنگین به نمونه خاک‌های مورد بررسی، در ابتدا محلول آلاینده‌ها در غلظت‌های موردنظر ساخته شد، انتخاب غلظت آلاینده‌ها با توجه به ظرفیت تبادل کاتیونی^۱ (CEC) کائولینیت و برابر ۵ و ۲۵ سانتی‌متر بر کیلوگرم خاک بود. در ادامه محلول آلاینده و خاک با نسبت ۱ به ۱۰ (۱ واحد وزنی خاک-۱۰ واحد وزنی خاک) درون بطری‌های پلاستیکی ریخته شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۴ روز و روزی ۲ ساعت توسط

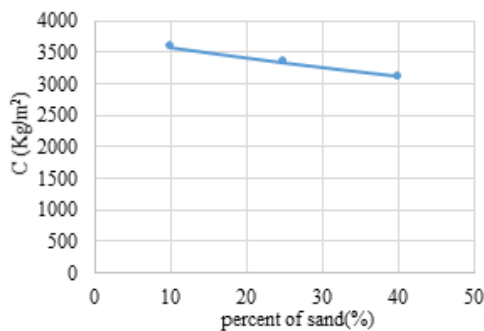
2 Falcon tube

1 Cation exchange capacity



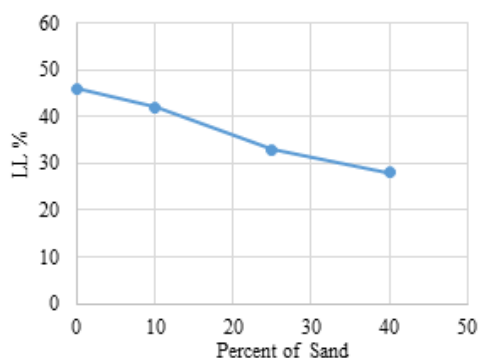
شکل ۲: منحنی تغییر زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های مخلوط کائولینیت-ماسه در مقابل درصدهای مختلف ماسه

Fig. 2. Internal friction angle changes of the kaolinite-sand mixture samples versus different sand percentages



شکل ۳: منحنی تغییر چسبندگی نمونه‌های مخلوط کائولینیت-ماسه در مقابل درصدهای مختلف ماسه

Fig. 3. Cohesion changes of kaolinite-sand mixture samples versus different sand percentages



شکل ۴: تغییرات حد روانی نمونه‌های مخلوط کائولینیت-ماسه با تغییر درصد ماسه‌ی آنها

Fig. 4. Liquid limit changes of kaolinite-sand mixture samples versus variations in their sand percentage

روش قبلی غلظت آلاینده‌ها در فاز مایع توسط دستگاه icp اندازه گیری شد. در نهایت غلظت آلاینده جذب شده توسط خاک، از تفاضل دو غلظت بالا (غلظت کل - غلظت فاز محلول) تعیین شده است.

۳- بحث و بررسی

۳-۱- تأثیر تغییر درصد ماسه بر پارامترهای مقاومتی نمونه‌های مخلوط کائولینیت-ماسه

در تحلیل مسائل مکانیک خاک برای شرایط تغییر شکل‌های کوچک، می‌توان از نظریه‌های ارتجاعی بین تنش و کرنش استفاده کرد [۱۶]. ولی در حالت تغییر شکل‌های بزرگ، پیش‌بینی رفتار خاک صرفاً با کمک نظریه‌های خمیری و یا معیارهای گسیختگی امکان‌پذیر است. از طرفی گسیختگی در خاک معمولاً به صورت برشی رخ می‌دهد. زیرا مقدار مقاومت کششی خاک (به جز در شرایط خاک مسلح) بسیار محدود بوده و گسیختگی فشاری نیز بحرانی نیست [۱۷]. از این رو آگاهی از مشخصات مقاومت برشی توده خاک از جمله ضروریات مهم در طراحی سازه‌های ژئوتکنیکی، تعیین ظرفیت فشاری و تحلیل پایداری شیب‌ها محسوب می‌شود. دو شکل ۲ و ۳ منحنی تغییر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نمونه‌های مخلوط کائولینیت-ماسه را در مقابل درصدهای مختلف ماسه نشان می‌دهد.

شکل ۲ نشان‌دهنده‌ی آن است که با افزایش درصد ماسه زاویه اصطکاک داخلی خاک نیز افزایش یافته که این امر را می‌توان ناشی از بیشتر بودن زاویه اصطکاک داخلی مصالح جایگزین شده نسبت به خاک رسی دانست. شکل ۳ نیز نشان‌دهنده‌ی آن است که با افزایش درصد ماسه، چسبندگی نمونه‌ها کاهش یافته به گونه‌ای که به ازای افزایش ۱۵٪ ماسه، چسبندگی نمونه‌ها در حدود ۷٪ کاهش یافته است. لازم به ذکر است که این رقم در مورد زاویه اصطکاک داخلی خاک در حدود ۵٪ بوده است.

بنابراین می‌توان دریافت که با توجه به آن که ماسه، دارای چسبندگی کمتر و زاویه اصطکاک داخلی بیشتری نسبت به خاک رسی کائولینیت بوده، افزایش سهم ماسه در مخلوط کائولینیت-ماسه موجب کاهش چسبندگی و افزایش زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها شده که نرخ تغییرات در دو پارامتر یکسان نبوده است.

۳-۲- تأثیر تغییر درصد ماسه بر حد روانی نمونه‌های مخلوط کائولینیت-ماسه

نتایج مربوط به تغییرات حد روانی نمونه‌ها با تغییر درصد ماسه‌ی آنها در شکل ۴ آورده شده است.

به دلیل ظرفیت جذب آب کمتر ماسه نسبت به کائولینیت، مشاهده شد که با افزایش درصد ماسه، حد روانی مخلوط کائولینیت-ماسه کاهش یافته است به گونه‌ای که این نرخ کاهش در ابتدا بیشتر و با افزایش درصد ماسه کاهش یافته است.

نتایج حاصل از بررسی میزان نگهداشت دو آلاینده فلز سنگین سرب و روی نشان‌دهنده‌ی آن است که در تمامی نمونه‌ها و در حضور هر دو آلاینده فلز سنگین، با افزایش غلظت آلاینده میزان نگهداشت نمونه‌های مخلوط کائولینیت-ماسه نیز افزایش یافته است. با افزایش غلظت آلاینده روی تا ۲۵ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک نمونه‌های مخلوط کائولینیت ماسه با درصد‌های ماسه‌ی ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درصد به ترتیب قابلیت نگهداری حدود ۲۰، ۲۲ و ۲۵ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک آلاینده فلز سنگین روی را از خود نشان می‌دهد. این در حالی است که قابلیت نگهداری آلاینده فلز سنگین سرب برای همان نمونه‌ها به ترتیب برابر ۲۴، ۲۶ و ۲۹ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک است.

بر اساس مطالعه پژوهشگران، قابلیت نگهداری آلاینده توسط خاک به سه عامل اصلی ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) مساحت سطح مخصوص و میزان کربنات وابسته است، که نقش کربنات از دو عامل دیگر بیشتر است [۱۸].

همان‌گونه که اشاره شد در نمونه مخلوط ۹۰٪ کائولینیت-۱۰٪ ماسه در غلظت ۲۵ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک آلاینده سرب، حدود ۲۴ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک توسط نمونه نگهداری شده است. به عبارت دیگر در صورتی که کلیه سایت‌های تبادلی در فرایند نگهداری آلاینده شرکت کرده باشند، حدود ۱۳ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک توسط فازهای دیگر از جمله کربنات، مواد آلی و هیدروکسیدها نگهداری شده است. با توجه به نقش کم دو فاز مواد آلی و هیدروکسیدها در pHهای کم، عامل اصلی نگهداری حدود ۱۳ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک آلاینده فلز سنگین بخش کربناتی خاک می‌باشد.

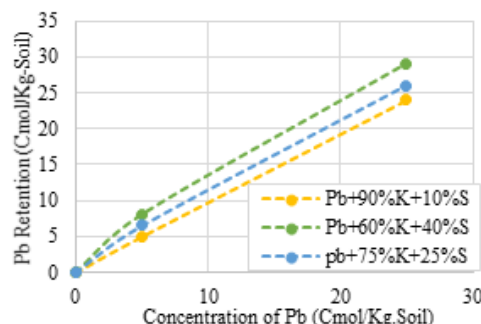
نکته‌ی قابل توجه دیگری که با مشاهده‌ی دو شکل ۵ و ۶ می‌توان دریافت، افزایش میزان آلاینده نگهداری شده توسط نمونه‌های مخلوط کائولینیت-ماسه با افزایش درصد ماسه آن‌هاست. به عبارت دیگر افزایش سهم ماسه در مخلوط کائولینیت-ماسه موجب افزایش میزان آلاینده نگهداری شده توسط خاک شده که در برخی موارد مقدار آلاینده جذب شده از مقدار آلاینده ورودی (غلظت آلاینده ورودی که بر اساس جرم کل مخلوط کائولینیت-ماسه بوده) نیز بیشتر بوده است. دلیل این امر را می‌توان عدم نقش‌پذیری ماسه در فرایند جذب آلاینده دانست. به عبارت دیگر، افزایش سهم کمی ماسه (با توجه به عدم شرکت آن در فرایند جذب آلاینده‌ها) موجب آن گشته که در غلظت ثابت آلاینده ورودی (که بر اساس جرم کل مخلوط کائولینیت-ماسه محاسبه شده) حجم کمتری از خاک رسی (کائولینیت) در معرض آلاینده فلز سنگین قرار گیرد که همین امر نیز موجب افزایش میزان جذب خاک گردیده است.

۳-۴- تأثیر حضور آلاینده‌های فلز سنگین بر پارامترهای مقاومتی نمونه‌های مخلوط کائولینیت-ماسه

آزمایش برش مستقیم به منظور تعیین پارامترهای مقاومت برشی بر روی نمونه‌ها در دستگاه برش مستقیم انجام شد و نیروهای قائم، برشی و

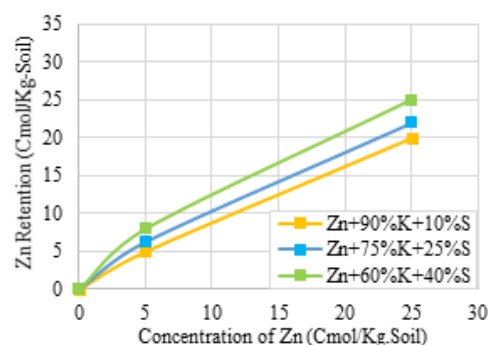
۳-۳- بررسی میزان نگهداشت آلاینده فلز سنگین توسط نمونه‌های مخلوط کائولینیت-ماسه

یکی از واکنش‌های سطحی کانی‌های رسی، جذب سطحی و مبادله کاتیون‌های فلزی است. نوع و کمیت هر کانی در خاک‌های رسی تأثیر قابل‌توجهی در اندرکنش خاک و آلودگی دارد [۵]. قابلیت نگهداشت آلاینده‌های فلز سنگین سرب و روی توسط نمونه‌های مخلوط کائولینیت-ماسه در شکل ۵ و ۶ ارائه شده است.



شکل ۵: منحنی قابلیت نگهداری آلاینده فلز سنگین سرب توسط نمونه‌های مخلوط کائولینیت-ماسه

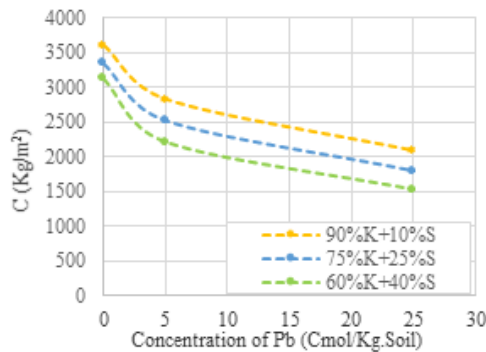
Fig. 5. The graph of the ability of retaining Pb heavy-metal contaminant by the kaolinite-sand mixture samples



شکل ۶: منحنی قابلیت نگهداری آلاینده فلز سنگین روی توسط نمونه‌های مخلوط کائولینیت-ماسه

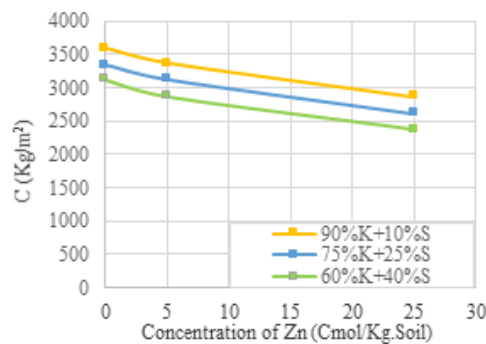
Fig. 6. The graph of the ability of retaining Zn heavy-metal contaminant by the kaolinite-sand mixture samples

غلظت و به‌طور مستقیم باریشه دوم ثابت دی‌الکتریک و دما رابطه دارد. به‌عبارت‌دیگر با حضور آلاینده‌های فلز سنگین سرب و روی، ضخامت لایه دوگانه در اطراف پولک رسی کاهش می‌یابد. همچنین، همان‌طور که گفته شد افزایش غلظت این آلاینده‌ها نیز موجب کاهش ضخامت لایه‌ی دوگانه در اطراف پولک رسی می‌شود. در این صورت با توجه به کاهش ضخامت لایه دوگانه در اطراف پولک رسی پتانسیل سطحی موجود بر روی پولک‌های رسی نیز کاهش یافته و این امر موجب کاهش چسبندگی نمونه‌ها در حضور آلاینده‌های فلز سنگین گردیده است.



شکل ۹: تغییرات چسبندگی نمونه‌های مخلوط کائولینیت-ماسه با درصد‌های مختلف ماسه در حضور آلاینده‌ی سرب

Fig. 9. The changes in the cohesion of kaolinite-sand mixture samples with different sand percentages at the presence of Pb

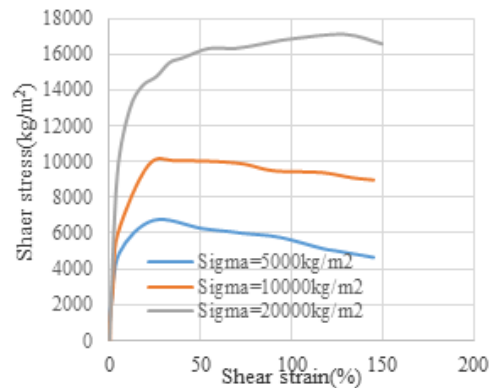


شکل ۱۰: تغییرات چسبندگی نمونه‌های مخلوط کائولینیت-ماسه با درصد‌های مختلف ماسه در حضور آلاینده‌ی فلز روی

Fig. 10. The changes in the cohesion of kaolinite-sand mixture samples with different sand percentages at the presence of Zn

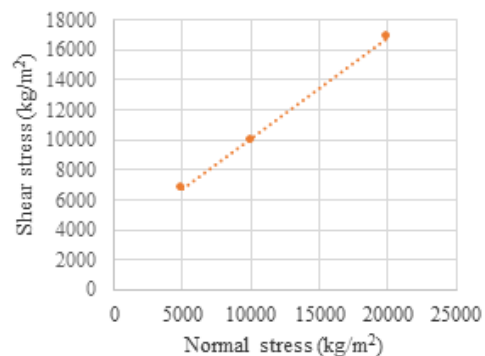
همچنین شکل‌های ۱۱ و ۱۲ تغییرات زاویه اصطکاک مخلوط کائولینیت-ماسه با درصد‌های مختلف ماسه را در حضور غلظت‌های مختلف دو آلاینده سرب و روی نشان می‌دهند. نتایج حاصل از دو شکل ۱۱ و ۱۲ حاکی از آن است که حضور هر دو آلاینده فلز سنگین تأثیر بسیار جزئی بر زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها

تغییر مکان برشی اندازه‌گیری گردید. بر اساس نتایج بدست‌آمده از آزمایش و ابعاد نمونه، تنش‌های قائم، برشی و کرنش برشی مورد محاسبه قرار گرفت. با رسم نمودارهای تنش برشی بر حسب تنش قائم پارامترهای مقاومت برشی تعیین شدند. نمونه‌ای از این نتایج در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است.



شکل ۷: تغییرات تنش برشی با کرنش برشی در نمونه ۷۵ درصد کائولینیت با ۲۵ درصد ماسه بدون آلاینده

Fig. 7. Shear stress changes versus shear strain in sample with 75% clay and 25 % sand in non-contaminated mixture



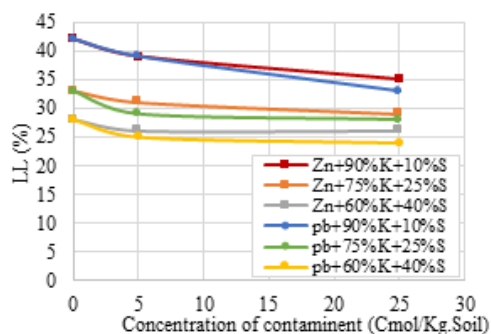
شکل ۸: تغییرات تنش قائم با تنش برشی در نمونه ۷۵ درصد کائولینیت با ۲۵ درصد ماسه بدون آلاینده

Fig. 8. Normal stress changes versus shear strain in sample with 75% clay and 25 % sand in non-contaminated mixture

شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان‌دهنده‌ی آن هستند که در هر سه نوع خاک (نمونه‌های مخلوط کائولینیت-ماسه با درصد‌های مختلف ماسه) با افزایش غلظت هر دو آلاینده چسبندگی خاک نیز کاهش یافته است. بر اساس معادله‌ی ۱ ضخامت لایه‌ی دوگانه به‌طور معکوس با والانس و ریشه دوم

۳-۵- تأثیر حضور آلاینده‌های فلز سنگین بر حد روانی مخلوط کائولینیت- ماسه

یکی از بارزترین مشخصات مهندسی رس‌ها، رفتار پلاستیک و تابع زمان آن‌ها است. مفهوم پلاستیسیته نشان‌گر توانایی شکل‌پذیری خاک بدون جدا شدن ذرات و گسیختگی است. به نحوی که عامل اصلی پلاستیسیته خاک، ناشی از باردار بودن ذرات مسطح رسی می‌باشد. شکل ۱۳ تغییرات حد روانی نمونه‌های مخلوط کائولینیت- ماسه را در مقابل غلظت‌های مختلف دو آلاینده‌ی روی و سرب را نشان می‌دهند.



شکل ۱۳: تغییرات حد روانی نمونه‌های مخلوط کائولینیت- ماسه را در مقابل غلظت‌های مختلف آلاینده‌ی سرب و روی

Fig. 13. The changes in the liquid limit of kaolinite-sand mixture samples versus different concentrations of Pb and Zn

نتایج ارائه‌شده در شکل ۱۳ بیانگر آن است که به‌طور کلی حد روانی نمونه‌ها در حضور هر دو آلاینده‌ی سرب و روی و با افزایش غلظت آن‌ها کاهش یافته است.

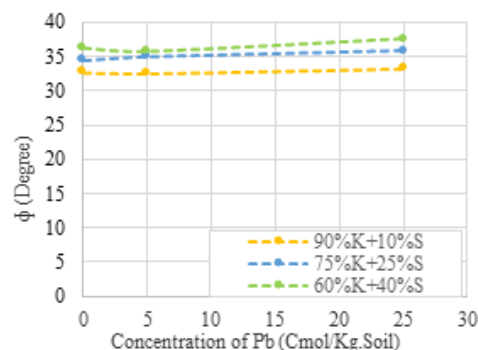
در حضور آلاینده‌ی فلز سنگین روی و در غلظت ۵ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک حد روانی نمونه‌های مخلوط کائولینیت- ماسه با نسبت‌های ۱۰٪، ۲۵٪ و ۴۰ درصد ماسه به‌طور تقریباً یکسان و حدود ۳٪ کاهش یافته در حالی با افزایش غلظت آلاینده تا ۲۵ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک میزان تغییرات به ترتیب برابر ۱۰٪، ۶٪ و ۱٪ بوده است.

در مورد حضور آلاینده‌ی فلز سنگین سرب نیز، در غلظت ۵ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک حد روانی نمونه‌های مخلوط کائولینیت- ماسه با نسبت‌های ۱۰٪، ۲۵٪ و ۴۰ درصد ماسه به ترتیب ۷٪، ۱۱٪ و ۱۲٪ کاهش یافته در حالی با افزایش غلظت آلاینده تا ۲۵ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک میزان تغییرات به ترتیب برابر ۱۵٪، ۴٪ و ۳٪ بوده است.

کاهش حد روانی نمونه‌ها در حضور آلاینده‌های سرب و روی را می‌توان ناشی از دو مکانیسم دانست:

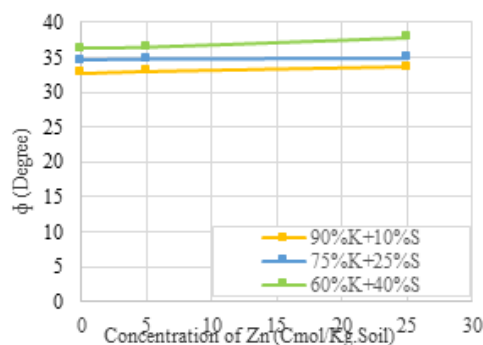
مکانیسم اول آنکه، حضور فلزهای سنگین در سیستم آب‌و خاک سبب می‌شود که pH سیستم آب‌و خاک به دلیل واکنش هیدرولیز فلزهای سنگین، کاهش قابل توجهی یابد [۱]. کاهش pH خاک با کاهش ضخامت لایه دوگانه‌ی موجود در اطراف پولک‌های رسی و همچنین ایجاد ساختار درهم

داشته، به‌گونه‌ای که به ازای افزودن ۲۵ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک آلاینده‌ی سرب و روی در نمونه‌ی مخلوط ۹۰٪ کائولینیت- ۱۰٪ ماسه، زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها به ترتیب تنها ۲ و ۳ درصد رشد داشته است. این موضوع به‌گونه‌ی دلالت بر عدم تأثیرگذاری آلاینده‌های فلز سنگین بر زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های مخلوط کائولینیت- ماسه دارد. به‌عبارت‌دیگر، با توجه به آن‌که زاویه اصطکاک داخلی مخلوط کائولینیت- ماسه، پارامتری وابسته به نسبت ماسه بوده و حضور آلاینده‌های فلز سنگین تأثیری بر ماسه نداشته، در مجموع زاویه اصطکاک داخلی مخلوط کائولینیت- ماسه تحت تأثیر حضور آلاینده‌های فلز سنگین نبوده و این افزایش بسیار جزئی زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها را می‌توان ناشی از فلوکوله شدن ساختار بخش رسی، ناشی از حضور این آلاینده‌ها دانست.



شکل ۱۱: تغییرات زاویه اصطکاک مخلوط کائولینیت- ماسه با درصد‌های مختلف ماسه را در حضور غلظت‌های مختلف آلاینده سرب

Fig. 11. Internal friction angle of kaolinite-sand mixture samples versus different sand percentages of Pb



شکل ۱۲: تغییرات زاویه اصطکاک مخلوط کائولینیت- ماسه با درصد‌های مختلف ماسه را در حضور غلظت‌های مختلف آلاینده روی

Fig. 11. Internal friction angle of kaolinite-sand mixture samples versus different sand percentages of Zn

ج) نتایج حاصل انجام آزمایش برش مستقیم نشان‌دهنده‌ی آن است که در هر سه نوع خاک (نمونه‌های مخلوط کائولینیت- ماسه با درصد‌های مختلف ماسه) با افزایش غلظت هر دو آلاینده چسبندگی خاک نیز کاهش یافته است. تفاوت نرخ کاهش در چسبندگی مخلوط کائولینیت - ماسه، در حضور دو آلاینده‌ی سرب و روی را می‌توان به فرآیند جذب انتخابی و رسوب‌پذیری در اندرکنش خاک و آلودگی نسبت داد. همچنین با توجه به آن که زاویه اصطکاک داخلی مخلوط کائولینیت- ماسه، پارامتری وابسته به نسبت ماسه بوده و حضور آلاینده‌های فلز سنگین تأثیری بر ماسه نداشته، در مجموع زاویه اصطکاک داخلی مخلوط کائولینیت- ماسه تحت تأثیر حضور آلاینده‌های فلز سنگین نبوده است.

د) به‌طور کلی با توجه به مکانیسم‌های ذکر شده حد روانی نمونه‌ها در حضور هر دو آلاینده‌ی سرب و روی و با افزایش غلظت آن‌ها کاهش یافته است. همچنین نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های بیان‌گر آن است که نرخ کاهش حد روانی نمونه‌ها به ازای افزایش درصد ماسه با افزایش غلظت آلاینده‌ها کاهش می‌یابد. به‌عبارت‌دیگر در حضور آلاینده‌ای با غلظت بیشتر میزان تأثیرگذاری تغییر درصد ماسه بر حد روانی نمونه‌ها نیز کاهش یافته است.

در خاک، سطح در معرض آب پولک‌های رسی را کاهش داده و این امر موجب کاهش میزان جذب آب پولک‌های رسی و کاهش حد روانی نمونه‌ها شده است.

مکانیسم دوم را نیز می‌توان با توجه به تئوری لایه‌ی دوگانه گوی-چپمن و معادله ارائه‌شده‌ی ۱ برای آن، کاهش ضخامت لایه‌ی دوگانه‌ی پولک‌های رسی ناشی از حضور آلاینده‌های فلز سنگین دانست. بنابراین با افزایش غلظت آلاینده‌های فلز سنگین، ضخامت لایه دوگانه در اطراف پولک رسی کاهش یافته که این امر به معنای تجمع مولکول‌های آب و یون‌ها در نزدیکی سطح کانی رسی و کاهش تعداد مولکول‌های آب موجود در لایه دوگانه است. در این صورت با توجه به کاهش تمایل کائولینیت برای جذب آب، حد روانی نمونه‌های مخلوط کائولینیت- ماسه نیز با افزایش غلظت آلاینده‌های فلز سنگین کاهش می‌یابد.

در مورد مقایسه تأثیرگذاری دو آلاینده‌ی فلز سنگین سرب و روی بر حد روانی نمونه‌ها نیز شکل ۱۳ نشان‌دهنده‌ی آن است که آلاینده فلز سنگین سرب در غلظت‌های مشخص دارای تأثیرگذاری بیشتری نسبت به آلاینده فلز سنگین روی بوده که دلیل این امر را نیز به تمایل بیشتر کائولینیت به جذب سرب نسبت به روی نسبت داد.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به‌شرح ذیل خلاصه نمود.

الف) با توجه به آن که ماسه، دارای چسبندگی کمتر و زاویه اصطکاک داخلی بیشتری نسبت به خاک رسی کائولینیت بوده، افزایش سهم ماسه در مخلوط کائولینیت- ماسه موجب کاهش چسبندگی و افزایش زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها شده که نرخ تغییرات در دو پارامتر یکسان نبوده. همچنین به‌دلیل ظرفیت جذب آب کمتر ماسه نسبت به کائولینیت، مشاهده شد که با افزایش درصد ماسه، حد روانی مخلوط کائولینیت- ماسه کاهش یافته است به‌گونه‌ای که این نرخ کاهش در ابتدا بیشتر و با افزایش درصد ماسه کاهش یافته است.

ب) نتایج حاصل از بررسی میزان نگهداشت دو آلاینده فلز سنگین سرب و روی نشان‌دهنده‌ی آن است که در تمامی نمونه‌ها و در حضور هر دو آلاینده فلز سنگین، با افزایش غلظت آلاینده میزان نگهداشت نمونه‌های مخلوط کائولینیت- ماسه نیز افزایش یافته است. با افزایش غلظت آلاینده روی تا ۲۵ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک نمونه‌های مخلوط کائولینیت ماسه با درصد‌های ماسه‌ی ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درصد به ترتیب قابلیت نگهداری حدود ۲۰، ۲۲ و ۲۵ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک آلاینده فلز سنگین روی را از خود نشان می‌دهد. این در حالی است که قابلیت نگهداری آلاینده فلز سنگین سرب برای همان نمونه‌ها به‌ترتیب برابر ۲۴، ۲۶ و ۲۹ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک است. همچنین افزایش سهم ماسه در مخلوط کائولینیت- ماسه موجب افزایش میزان آلاینده نگهداری شده توسط خاک شده که دلیل این امر را می‌توان عدم نقش‌پذیری ماسه در فرایند جذب آلاینده دانست.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

D	ثابت دی‌الکتریک سیال (m^2)
T	دما (K)
e	بار الکتریکی الکترون ($1.6 \times 10^{-19} c$)
k	ثابت بولتزمن ($1.38 \times 10^{-23} jk^{-1}$)
LL	حد روانی (%)
PL	حد خمیری (%)
PI	شاخص خمیری
C	چسبندگی (kg/m^2)
CEC	ظرفیت تبادل کاتیونی

علائم یونانی

ϵ	ثابت دی‌الکتریک خلأ
ϕ	زاویه اصطکاک داخلی (degree)
n_0	غلظت الکتروولیت (ion/m^3)
v	ظرفیت یونی

- [11] E. Polidori, Relationship between the Atterberg limits and clay content, *Soils and foundations*, 47(5) (2007) 887-896.
- [12] H. Novais-Ferreira, THE CLAY CONTENT AND THE SHEAR STRENGTH IN SAND CLAY MIXTURES, in: *Soil Mech & Fdn Eng Proc, South Africa*, (1971).
- [13] E. Bayoglu, Shear strength and compressibility behavior of sand-clay mixtures, M. Sc. thesis, Department of Civil Engineering, Middle-East Technical, (1995).
- [14] V. Ouhadi, R. Yong, M. Sedighi, Influence of heavy metal contaminants at variable pH regimes on rheological behaviour of bentonite, *Applied Clay Science*, 32(3) (2006) 217-231.
- [15] W.R. Roy, Technical Resource Document: Batch-type procedures for estimating soil adsorption of chemicals, Office of Solid Waste and Emergency Response, US Environmental Protection Agency, (1992).
- [16] M. Banimahd, S. Yasrobi, P. Woodward, Artificial neural network for stress-strain behavior of sandy soils: Knowledge based verification, *Computers and Geotechnics*, 32(5) (2005) 377-386.
- [17] G. Obuzor, J. Kinuthia, R. Robinson, Soil stabilisation with lime-activated-GGBS—A mitigation to flooding effects on road structural layers/embankments constructed on floodplains, *Engineering Geology*, 151 (2012) 112-119.
- [18] V. Ouhadi, M. Amiri, A. Goodarzi, The special potential of nano-clays for heavy metal contaminant retention in geo-environmental projects, *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 45(6) (2012) 631-642. (In persian)
- [1] R.N. Yong, *Geoenvironmental engineering: Contaminated soils, pollutant fate, and mitigation*, CRC press, (2000).
- [2] K. Mitchell James, *Fundamentals of soil behavior*, (1993).
- [3] K. Soga, J. Mitchell, *Fundamentals of soil Behavior*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, (2005).
- [4] J.C. Miranda-Trevino, C.A. Coles, Kaolinite properties, structure and influence of metal retention on pH, *Applied Clay Science*, 23(1-4) (2003) 133-139.
- [5] R.N. Yong, A.-M.O. Mohamed, B.P. Warkentin, *Principles of contaminant transport in soils*, Elsevier Science Publishers, (1992).
- [6] P.V. Sivapullaiah, Kaolinite-alkali interaction and effects on basic properties, *Geotechnical & Geological Engineering*, 23(5) (2005) 601-614.
- [7] J. Jang, J. Bae, E. Park, Selective Fabrication of Poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) Nanocapsules and Mesocellular Foams Using Surfactant-Mediated Interfacial Polymerization, *Advanced Materials*, 18(3) (2006) 354-358.
- [8] V. Ouhadi, Z. Sharifian, Compare the effect of alkali metal contaminants and heavy metals on the plastic properties of kaolinite and bentonite clay, in: *First Natinal Conference on geotechnical engineering*, Mohaghegh Ardabili University, Technical Faculty, Iran, 2015. (In persian)
- [9] H.-Y. Fang, J.L. Daniels, *Introductory geotechnical engineering: an environmental perspective*, CRC Press, (2006).
- [10] V. Ouhadi, A. Haghayegh, H. Bayeste, The effect of heavy metal contamination on performance of sand-bentonite mixture (SEB) in landfill, *Modares technical and engineering journal*, 33 (2008). (In persian)

Please cite this article using:

A. Negahdar, M. R. Shabaniyan, M. Nikghalbpor, The effect of heavy metal contaminants on the strength parameters of sandy clay, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(5) (2018) 835-844.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12869.5287

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



