



## بررسی تاثیر نیترات سرب بر رفتار و مقاومت برشی ماسه‌ی رُس‌دار

محمود حسنلوراد\*، محمد حسین زاده، سید ابوالحسن نائینی

گروه عمران دانشکده فنی، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۲۷

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۳/۲۹

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۳۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۴/۱۳

### کلمات کلیدی:

نیترات سرب

کائولینیت

بنتونیت

آزمایش سه محوری

پارامترهای مقاومتی

**خلاصه:** با گسترش مناطق صنعتی، فلزات سنگین از طریق پساب‌های صنعتی و یا نشت از مخازن ذخیره وارد محیط زیست گردیده، که پیامد آن آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی به این ترکیب‌های سمی شده‌است. نشت فلزات سنگین از قبیل سرب، روی، کادمیم و... علاوه بر این که یکی از بحرآن‌های محیط زیستی می باشد، منجر به تغییرات پارامترهای مقاومتی خاک نیز می‌گردد. جنس خاک و میزان غلظت آلاینده از پارامترهای تاثیر گذار بر روی رفتار خاک‌های آلوده می‌باشد. در این تحقیق به کمک آزمایش‌های سه محوری به بررسی رفتار خاک‌های ماسه‌ای با درصد‌های مختلف کائولینیت در دو حالت آلوده و غیرآلوده با فلز سنگین سرب پرداخته شده‌است. نتایج نشان می‌دهد افزایش غلظت سرب باعث کاهش پیوند هیدروژنی بین ذرات کائولینیت و کاهش مقاومت خاک آلوده گردیده است. به طوریکه با افزایش غلظت آلاینده تا ۲۰۰۰۰ ppm مقاومت خاک ماسه رُس‌دار با ۱۵٪ و ۲۵٪ کائولینیت به ترتیب ۱۸٪ و ۲۴٪ کاهش یافت. در ادامه به منظور بررسی اثر نوع کانی رُس در خاک‌های آلوده، پارامترهای مقاومتی خاک‌های حاوی کائولینیت و بنتونیت با یکدیگر مقایسه شده‌است. نتایج نشان می‌دهد با تغییر در نوع کانی رُس در خاک‌های آلوده با فلز سنگین، پارامترهای مقاومتی روند متفاوتی خواهند داشت. افزایش غلظت آلاینده سرب در خاک حاوی بنتونیت، منجر به ایجاد ساختار فلوکولهای و افزایش مقاومت برشی شده‌است. همچنین افزایش غلظت نیترات سرب در خاک‌های بنتونیت‌دار سبب افزایش ۲۰٪ تا ۳۰٪ مقاومت خاک آلوده گردید.

### ۱- مقدمه

شامل ریزدانه رُسی می باشد، صورت گرفته است. [۱] بنابراین وجود ریزدانه های رُسی تاثیر مهمتری در تغییر رفتار خاک های آلوده دارد. از طرفی با تغییر در نوع کانی رُسی، قابلیت جذب و واکنش آن با فلزات سنگین تغییر می یابد [۲].

اوحدی و همکاران در تحقیقات خود نشان دادند اگرچه تئوری لایه‌ی دوگانه قادر به توصیف کامل تغییر رفتار خاک های رُسی نمی باشد، با این وجود رابطه ای موثر در تفسیر رفتار خاک های آلوده به فلزات سنگین و نمک ها و آلاینده های آلی می باشد. مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در زمینه بررسی رفتار خمیری و نفوذپذیری بنتونیت آلوده با آلاینده های آلی و فلزات سنگین نشان می دهد که با ورود آلاینده های مختلف، تغییر رفتار بنتونیت توسط

پیشرفت سریع بشر در احداث کارخانه ها و به تبعه آن تشکیل شهرک های صنعتی و تولید پساب ها، یا شیرابه های صنعتی باعث ایجاد آلودگی های خطرناک زیست محیطی شده‌است. آلاینده ها علاوه بر تاثیر زیست محیطی بر روی خواص ژئوتکنیکی خاک نیز اثر گذار هستند. یکی از مهم ترین آلودگی ها، آلودگی فلزات سنگین بخصوص سرب می باشد.

با وجود این که برخی از مطالعات نشان دهنده تاثیر آلاینده های فلزات سنگین بر روی رفتار خاک های دان‌های می باشد، ولی بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه تاثیر فلزات سنگین بر روی ترکیباتی که

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hassanlou@eng.ikiu.ac.ir



نشان می دهد که با افزایش غلظت آلاینده ها مقاومت الکتریکی کاهش می یابد [۷]. بی یان و همکاران<sup>۴</sup> تغییرات زاویه اصطکاک داخلی بین دانه ها در خاک های آلوده را وابسته به چیدمان و شکل اولیه دانه های خاک می دانند. همچنین بیان می کنند که تغییر در زاویه اصطکاک داخلی تا حد معینی در خاک های آلوده بوجود می آید و این امر ناشی از تغییر در اندازه ذرات می باشد [۸]. پارک<sup>۵</sup> به بررسی تاثیر ژئولیت طبیعی بر روی خاک آلوده با فلز سنگین روی پرداخت. به همین منظور، ابتدا ژئولیت طبیعی در درصد های متفاوت به خاک هوازده اضافه شده، سپس پارامترهای مقاومتی ترکیب خاک-ژئولیت و همچنین قابلیت جذب عنصر سنگین روی بررسی گردید. نتایج نشان می دهد با افزایش درصد ژئولیت زاویه اصطکاک داخلی کاهش و ظرفیت جذب افزایش می یابد [۹]. ابیدوی و همکاران<sup>۶</sup> در مطالعاتشان به بررسی اثر نیترات سرب بر روی لایه های راهسازی پرداختند. بررسی دوره عمل آوری و غلظت آلاینده بر روی برخی پارامترهای فیزیکی ماسه رُس دار از اهداف اصلی در این تحقیق بوده است. نتایج نشان می دهد، افزایش غلظت نیترات سرب و دوره عمل آوری باعث کاهش دانسیته ماکزیمم و افزایش ظرفیت باربری کالیفرنیا در نمونه های آلوده می شود. همچنین افزایش دوره عمل آوری و غلظت نیترات سرب به ترتیب باعث افزایش و کاهش رطوبت بهینه گردیده است [۱۰]. در مطالعات کرکوش و طاهر<sup>۷</sup> تاثیر غلظتهای مختلف آلاینده های هیدروکربنی بر روی رفتار سیلت رُس و رُس سیلنتی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد تغییر پارامترهایی از قبیل غلظت آلاینده و نوع خاک بیشترین اثر را بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی خاک دارد. آلودگی خاک با آلاینده های هیدروکربنی سبب افزایش اندازه ذرات خاک و ضریب تحکیم می گردد. همچنین افزایش غلظت آلاینده موجب کاهش ضریب نفوذ پذیری، وزن مخصوص دانه ها، حد روانی، حد خمیری و رطوبت بهینه می گردد. این در حالی می باشد که افزایش غلظت تاثیر چندانی بر روی دانسیته ماکزیمم نمی گذارد. از دیگر نتایج به دست آمده می توان به کاهش میزان چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی با افزایش غلظت آلاینده های هیدروکربنی اشاره کرد [۱۱].

پارامترهایی از قبیل ثابت دی الکتریک، لزجت سینماتیکی و اندازه مولکولی کنترل می گردد. همچنین نفوذ آلاینده های آلی و فلزات سنگین به محیط خاکی منجر به کاهش قابل توجه در خواص خمیری و افزایش نفوذپذیری خاک های رُسی می شود، زیرا کاهش ثابت دی الکتریک و افزایش اندازه مولکول ها موجب کاهش دامنه خمیری و افزایش نفوذ پذیری می گردد [۳]. اوحدی و شریفیان در مطالعات خود، تاثیر سرب و روی را بر حد روانی مخلوط ماسه و بنتونیت در مراکز دفن مهندسی زباله مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات آن ها نشان می داد که به طور کلی با افزایش غلظت آلاینده ها حد روانی خاک کاهش یافته است. همچنین افزایش غلظت آلاینده ها باعث کاهش حد روانی می گردد که این امر ناشی از فشرده شدن لایه آب دوگانه و در نتیجه کاهش دافعه بین ذرات می باشد [۴]. بررسی های انجام شده توسط فانگ و دنیلز<sup>۱</sup> نشان می دهد که جذب آلاینده های فلز سنگین توسط خاک رُسی موجب کاهش pH خاک می گردد. اسیدی شدن محیط خاک باعث افزایش بار مثبت در لبه های ذره رُس شده که این امر موجب کاهش خاصیت خمیری و افزایش نفوذپذیری می گردد [۵]. با توجه به گستردگی فلزات سنگین از قبیل سرب و روی در اکثر مناطق چین، لی و همکاران<sup>۲</sup> به بررسی رفتار خاک های آلوده با سرب در این مناطق پرداختند. غلظت های نیترات سرب ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ ppm انتخاب گردیده است. نمونه ها در رطوبت بهینه و تراکم حداکثر ساخته شده و به مدت دو روز تحت عمل آوری قرار گرفته اند. نتایج نشان می دهد که حد روانی و نشانه خمیری با افزایش غلظت آلاینده کاهش یافته است. همچنین افزایش غلظت آلاینده سبب کاهش ضخامت آب لایه دوگانه و کاهش حد روانی می گردد [۶]. چو و همکاران<sup>۳</sup> به بررسی تخمین پارامترهای مقاومت برشی در خاک های آلوده با استفاده از ضریب هدایت الکتریکی پرداختند. برای این منظور خاک با سه فلز سنگین سرب، روی و کادمیم آلوده شده و نمونه های آلوده به مدت ۴۸ ساعت در دمای اتاق قرار گرفته اند. نتایج نشان می دهد فلزات سنگین باعث افزایش مقاومت برشی و چسبندگی در خاک می شود. همچنین با افزایش غلظت آلاینده ها تغییرات بیشتری در پارامترهای مقاومتی حاصل می شود. نتایج آزمایش های مقاومت الکتریکی نیز

4 Bian et al.

5 Park

6 Abidoeye et al.

7 Karkush and Taher

1 Fang and Daniels

2 Li et al.

3 Chu et al.

ریزدانه بر روی رفتار و پارامترهای مقاومتی خاک های آلوده به کمک آزمایش های سه محوری و اتربرگ، بررسی شده است. تغییر در نوع کانی رُسی یکی از پارامترهای مهم می باشد که در مطالعات گذشته مورد بحث قرار نگرفته است، بنابراین در بخش دوم از این تحقیق با ثابت در نظر گرفتن مقدار ریزدانه و تغییر در نوع کانی رُسی، رفتار خاک های آلوده با فلزات سنگین مورد مطالعه قرار گرفته است. کانی های رُسی مورد استفاده در این تحقیق کائولینیت (خاصیت خمیری کم) و بنتونیت (خاصیت خمیری زیاد) می باشد.

## ۲- مواد مصرفی و روش تحقیق

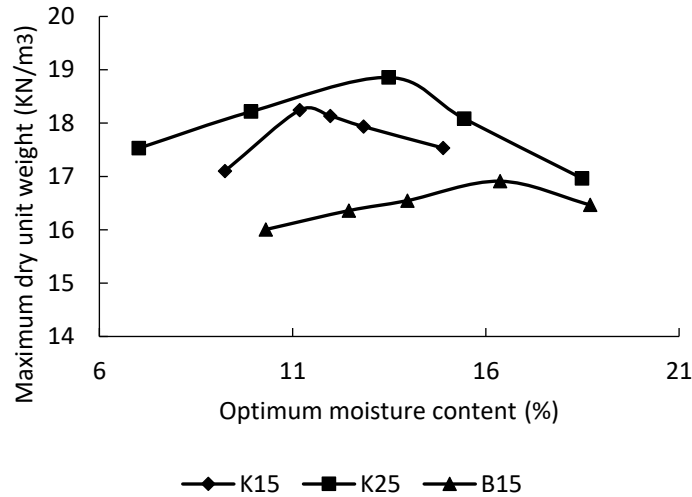
در این تحقیق از ترکیب ماسه با دو نوع کانی رُسی برای ساخت نمونه ها استفاده شد. لازم بذکر می باشد، در اکثر کارهای تحقیقاتی از خاک های رُسی با کائولینیت استفاده گردیده است [۷-۱۶] و [۶]. در این مطالعه اثر آلاینده فلز سنگین بر روی کانی های رُسی کائولینیت و بنتونیت سدیم دار بررسی می شود. زیرا تغییر در خواص خمیری رُس ها یا به عبارت دیگر تغییر در نوع کانی های تشکیل دهنده بخش ریزدانه، می تواند موجب تغییر در نتایج و پارامترهای مقاومتی خاک آلوده گردد. سطح ویژه کائولینیت کمتر از دیگر کانی های رُسی بوده و به همین علت قابلیت جذب آب در آن کمتر است. از طرفی خاصیت خمیری رُس ها تابعی از ضخامت آب لایه دوگانه آن هاست و با توجه به خاصیت خمیری بالای بنتونیت، لایه آب مضاعف عاملی تاثیر گذار در رفتار بنتونیت آلوده با فلزات سنگین است [۱۷]. با توجه به گستردگی کاربرد کائولینیت در تحقیقات علمی انجام شده، از دو درصد وزنی ۱۵٪ و ۲۵٪ کائولینیت در خاک، استفاده شده است. همچنین یکی دیگر از دلایل انتخاب این دو درصد (۱۵٪ و ۲۵٪) تاثیر ریزدانه در حالت حدی بوده است [۱۸]. به منظور ساخت نمونه های آلوده با فلزات سنگین، غلظت های مختلف نترات سرب ( $Pb(NO_3)_2$ ) به خاک اضافه گردید. در همین راستا ابتدا نترات سرب به مقدار مناسب با آب حل شده و محلول هایی با غلظت های ۱۰۰۰۰ ppm و ۲۰۰۰۰ ppm تهیه و با خاک ترکیب گردیده است. نمونه سازی به روش تراکم مرطوب انجام شده و تراکم نمونه ها ۹۵٪ تراکم بهینه است. در شکل ۱ تغییرات دانسیته خشک در مقابل درصد رطوبت بهینه برای ترکیبات مختلف نشان داده شده است. همان طور که نتایج نشان می دهد با افزایش درصد کائولینیت از ۱۵٪

ییلماز و همکاران<sup>۱</sup> نشان می دهد حضور برخی از نمک های محلول در خاک های رُسی مانند نمک طبیعی و نمک فلزات سنگین، سبب بوجود آمدن رفتار متفاوتی در خاک های رُسی با خاصیت خمیری زیاد و خاصیت خمیری کم می شود. نتایج نشان می دهد حضور نمک ها در خاک های رُسی با خاصیت خمیری کم سبب کاهش ضریب نفوذ پذیری و افزایش حد روانی می گردد [۱۲]. با توجه به رشد مراکز صنعتی در ایران، وجود فلزات سنگین در خاک بسیاری از این مناطق گزارش گردیده است. نتایج بررسی های انجام شده توسط سید و صیادی<sup>۲</sup> بر روی ۷۰ نمونه از خاک منطقه چیتگر (واقع در غرب استان تهران) نشان می دهد به دلیل وسعت ناحیه صنعتی نسبت به مسکونی در این منطقه، غلظت فلزات سنگین در خاک بالاتر از حد مجاز می باشد. همچنین نتایج نشان می دهد غلظت سرب در خاک این منطقه بالاتر از دیگر آلاینده های موجود در خاک می باشد. این مسئله خود اهمیت مطالعه تاثیر فلزات سنگین در خاک را نشان می دهد [۱۳]. برخی از محققان مقادیر آلاینده سرب در نزدیکی مناطق صنعتی و پالایشگاه ها را بین ۱۰۰ تا ۱۱۰۰۰ ppm گزارش کرده اند [۱۴].

تغییر در نوع کانی رُسی، باعث تفاوت های قابل توجهی در رفتار خاک های حاوی ریزدانه های رُسی می گردد. از تفاوت های مهم در بین کانی های رُسی می توان به ترکیب صفحات تشکیل دهنده آن، نوع پیوند بین واحدها (هیدروژنی یا واندروالسی)، آب جذب شده و آب لایه مضاعف اشاره کرد. بنابراین بررسی رفتار خاک های آلوده شده و نشده با کانی های مختلفی رُسی، می تواند مهم باشد. به طور کلی می توان گفت ساختار فلوکوله در رُس هایی که کانی های تشکیل دهنده آن تمایل به تشکیل لایه آب مضاعف بیشتری را دارند، محتمل تر می باشد و با کاهش قابلیت رُس در جذب آب و یا کاهش آب لایه مضاعف، ساختار رُس پراکنده تر می گردد [۱۵]. به طور خلاصه می توان گفت، بررسی نشت آلاینده ها از مخازن ذخیره و لوله های انتقال دهنده آن و تخمین پارامترهای مقاومتی خاک آلوده از فاکتورهای اساسی در طراحی سازه ها در مناطق صنعتی می باشد. همچنین تحقیقات اندک صورت گرفته بر روی پارامترهای مقاومتی خاک های آلوده با فلزات سنگین نشان دهنده ضرورت مطالعه بیشتر در این زمینه می باشد. در بخش اول این تحقیق، تاثیر درصد

1 Yilmaz et al.

2 Sayyed and Sayadi



شکل ۱. تغییرات دانسیته ماکزیمم در مقابل رطوبت بهینه برای ترکیبات مختلف

Fig. 1. The changes of maximum dry density and optimum water content in different blend

جدول ۱. مشخصات خاک رُس مصرفی

Table 1. Physical properties of clay

	کائولینیت	بنتونیت
Gs	۲/۵۹	۲/۶
LL (%)	۴۳/۸	۱۳۵/۵
PL (%)	۳۲	۵۱/۹
PI (%)	۱۱/۸	۸۳/۶
USCS	CL	CH

از عبور آب تمامی نمونه ها تا پس فشار ۲۰۰kPa به درجه اشباع بالای ۹۵٪ رسیده و سپس آزمایش سه محوری زهکشی نشده-تحکیم یافته بر روی نمونه ها انجام گردیده است. مشخصات کائولینیت و بنتونیت مصرفی که به ترتیب از محصولات شرکت خاک چینی ایران و ایران باریت تهیه گردیده، در جدول ۱ آورده شده است. طبق روش طبقه بندی متحد خاک کائولینیت و بنتونیت به ترتیب CL و CH نام گذاری شدند. ماسه مصرفی نیز ماسه ۱۶۱ فیروزکوه می باشد که مشخصات آن در جدول ۲ آمده است.

### ۳- آزمایش های انجام شده

با توجه به جدول ۳ تعداد ۲۷ آزمایش سه محوری تحکیم یافته-زهکشی نشده بر روی مخلوط خاک ماسه ای با درصد متغیر و نوع کانی رُسی متفاوت و همچنین غلظت های مختلف نیترات سرب

به ۲۵٪، درصد رطوبت بهینه و حداکثر دانسیته خشک افزایش یافته است. افزایش بخش ریزدانه موجب کاهش بیشتر تخلخل خاک گردیده است، بنابراین حداکثر دانسیته خشک افزایش یافته است. نتایج نشان می دهد که درصد رطوبت بهینه برای ترکیبات ۱۵٪ و ۲۵٪ کائولینیت به ترتیب ۱۱/۱٪ و ۱۳/۸٪ بوده و حداکثر دانسیته خشک نیز برای ترکیبات مورد نظر به ترتیب ۱۸/۱ و ۱۹/۰۵ kN/m<sup>۳</sup> است. با تغییر در نوع کانی رُسی از کائولینیت به بنتونیت تمایل به جذب آب افزایش یافته و همان طور که ملاحظه می گردد، برای ترکیب ماسه با ۱۵٪ بنتونیت، رطوبت بهینه برابر ۱۶/۵٪ و حداکثر دانسیته خشک نیز ۱۷ kN/m<sup>۳</sup> است. افزایش سطح مخصوص بنتونیت نسبت به کائولینیت، باعث افزایش درصد رطوبت بهینه در ترکیبی با درصد یکسان گردیده است. پس از ساخت نمونه ها، یک دوره عمل آوری ۷ روزه برای نمونه ها در نظر گرفته شده است [۶]. همچنین کلیه نمونه ها در پنج لایه با ارتفاع و وزن مساوی ساخته شده اند. پس از ساخت نمونه ها (به قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتیمتر)، ابتدا به مدت ۶۰ دقیقه گاز CO<sub>۲</sub> با نرخ کم از درون نمونه عبور داده شده و پس از جایگزینی هوای داخل نمونه با گاز CO<sub>۲</sub>، آب بدون هوا وارد نمونه گردید. لازم بذکر می باشد آب هواگیری شده با فشار بسیار کم، (در حدود ۳kPa) وارد نمونه شده است. با توجه به متغیر بودن مقدار رُس در ترکیبات خاکی و همچنین تغییر در نوع کانی رُسی، زمان عبور آب متفاوت می باشد. به منظور یکسان سازی شرایط آزمایش، پس

جدول ۲. مشخصات خاک ماسه ای مصرفی  
Table 2. Physical properties of sand

پارامتر	مقدار
Gs	۲/۶۴
اندازه دانه‌ها (mm)	۰/۱۷
ضریب یکنواختی	۱/۵۹
وزن خشک حداکثر (kN/m <sup>3</sup> )	۱۶
USCS	SP

جدول ۳. نام گذاری و تعداد آزمایش های سه محوری  
Table 3. Abbreviation and number of triaxial tests

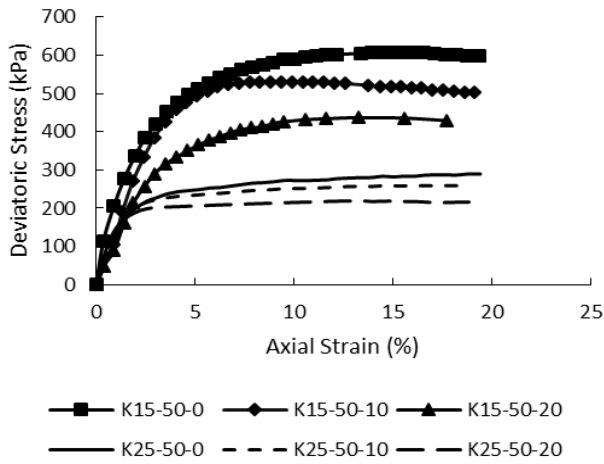
ردیف	تنش همه جانبه (Kpa)	غلظت (ppm)	درصد کائولن/بنتونیت	نام نمونه	ردیف	تنش همه جانبه (Kpa)	غلظت (ppm)	درصد کائولن/بنتونیت	نام نمونه
۱	۵۰	۰	۱۵٪	K15-50-0	۱۶	۱۵۰	۰	۲۵٪	K25-150-0
۲		۱۰۰۰۰		K15-50-10	۱۷		۱۰۰۰۰		K25-150-10
۳		۲۰۰۰۰		K15-50-20	۱۸		۲۰۰۰۰		K25-150-20
۴	۱۰۰	۰	۱۵٪	K15-100-0	۱۹	۵۰	۰	۱۵٪	B15-50-0
۵		۱۰۰۰۰		K15-100-10	۲۰		۱۰۰۰۰		B15-50-10
۶		۲۰۰۰۰		K15-100-20	۲۱		۲۰۰۰۰		B15-50-20
۷	۱۵۰	۰	۱۵٪	K15-150-0	۲۲	۱۰۰	۰	۱۵٪	B15-100-0
۸		۱۰۰۰۰		K15-150-10	۲۳		۱۰۰۰۰		B15-100-10
۹		۲۰۰۰۰		K15-150-20	۲۴		۲۰۰۰۰		B15-100-20
۱۰	۵۰	۰	۲۵٪	K25-50-0	۲۵	۱۵۰	۰	۱۵٪	B15-150-0
۱۱		۱۰۰۰۰		K25-50-10	۲۶		۱۰۰۰۰		B15-150-10
۱۲		۲۰۰۰۰		K25-50-20	۲۷		۲۰۰۰۰		B15-150-20
۱۳	۱۰۰	۰	۲۵٪	K25-100-0					
۱۴		۱۰۰۰۰		K25-100-10					
۱۵		۲۰۰۰۰		K25-100-20					

#### ۴- نتایج آزمایش ها

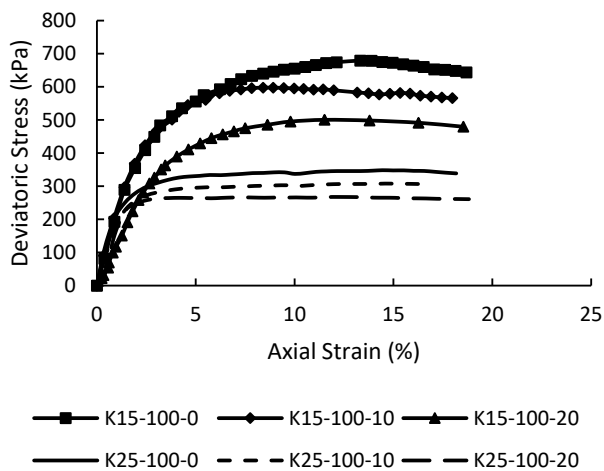
۴-۱- تاثیر درصد رُس بر روی پارامترهای مقاومتی خاک آلوده شده و نشده

تغییر مقاومت خاک‌های آلوده با نیترات سرب برای درصدهای مختلف کائولینیت و تنش‌های همه جانبه متفاوت، در شکل ۲ نشان داده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد در خاک های غیر آلوده با افزایش مقدار کائولینیت از ۱۵٪ به ۲۵٪، مقاومت خاک به شکل محسوسی کاهش یافته، به طوری که مقاومت نهایی در حدود ۴۸٪ در تنش های

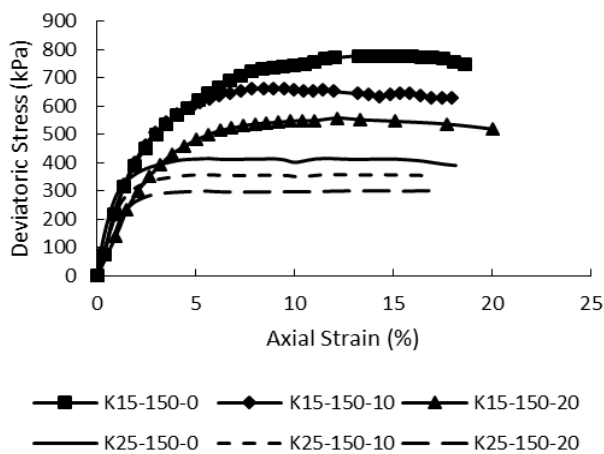
انجام شد. حرف اول بیانگر نوع کانی رُسی (K برای کائولینیت و B برای بنتونیت)، عدد اول و دوم نیز به ترتیب نشان دهنده ی درصد رُس و فشار همه جانبه می باشد. عدد سوم در جدول ۳ بیان کننده غلظت آلاینده می باشد. به منظور نمایش مختصر مقادیر آلودگی، غلظت های ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ ppm به ترتیب در راهنمای شکل ها با ۱۰ و ۲۰ نشان داده شده‌است. به عنوان مثال ۱۰-۱۰۰-۲۵ K نشان دهنده نمونه ای با ۲۵٪ کائولینیت تحت تنش همه جانبه ۱۰۰ kPa و مقدار غلظت نیترات سرب ۱۰۰۰۰ ppm می باشد.



(الف)



(ب)



(پ)

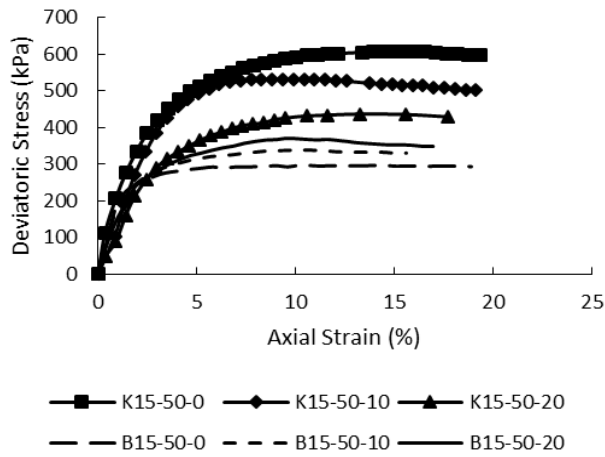
شکل ۲. رفتار تنش-کرنش برای نمونه های با ۱۵٪ و ۲۵٪ کائولینیت در حالات آلوده شده و نشده در تنش همه جانبه (الف) ۵۰kPa، (ب) ۱۰۰kPa و (پ) ۱۵۰kPa

Fig. 2. Stress-strain behavior for samples with %15 and %25 kaolinite in two cases of contaminated an uncontaminated at different confining pressure of (a)50 KPa, (b)100 KPa and (c)150 KPa

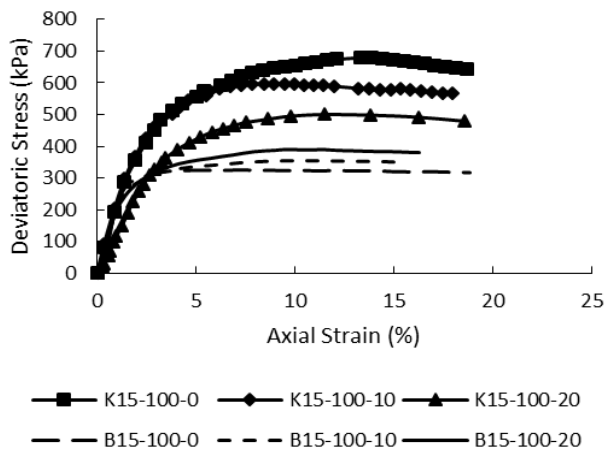
همه جانبه متفاوت کاهش یافته است. دلیل این کاهش مقاومت، ارتباط کمتر دانه های ماسه با یکدیگر در درصد بالاتر رس بوده و این امر موجب کاهش زاویه اصطکاک داخلی و افزایش چسبندگی گردیده است. مطابق نتایج به دست آمده، در حالت کلی مقاومت نهایی کاهش یافته است.

همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است در تمامی نمونه ها، با افزایش غلظت نیترات سرب کاهش مقاومت بوجود آمده است. مطابق نتایج، در تنش همه جانبه ۵۰kPa برای ترکیب ماسه با ۱۵٪ وزنی رس، با اضافه کردن آلاینده به خاک به غلظت ۱۰۰۰۰ ppm مقاومت نهایی در حدود ۱۴٪ کاهش یافته و با افزایش بیشتر آلاینده به میزان ۲۰۰۰۰ ppm مقدار مقاومت در حدود ۲۳٪ کاهش یافت. با افزایش تنش همه جانبه به ۱۰۰ و ۱۵۰kPa مقاومت خاک آلوده شده نسبت به حالت آلوده نشده با نیترات سرب در غلظت های ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ ppm است. با افزایش مقدار کائولینیت در ترکیب، نفوذپذیری خاک کمتر شده و همچنین قابلیت جذب آلاینده نیز بیشتر گردیده است. نتایج نشان می دهد برای ترکیب ماسه با ۲۵٪ کائولینیت، مقدار مقاومت نهایی برای تنش همه جانبه ۵۰kPa با افزایش غلظت آلاینده از ۰ به ۱۰۰۰۰ ppm از ۲۹۰kPa به ۲۵۰kPa کاهش یافته و همچنین با افزایش بیشتر غلظت آلاینده از ۱۰۰۰۰ به ۲۰۰۰۰ ppm مقاومت نهایی از ۲۵۰kPa به ۲۰۵kPa کاهش یافته است. به طور کلی در ترکیبات ۲۵٪ کائولینیت، در تنش های همه جانبه مختلف مقاومت نهایی در خاک آلوده شده با ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ ppm نیترات سرب نسبت به خاک آلوده نشده، به ترتیب در حدود ۱۲٪ و ۲۴٪ کاهش یافته است.

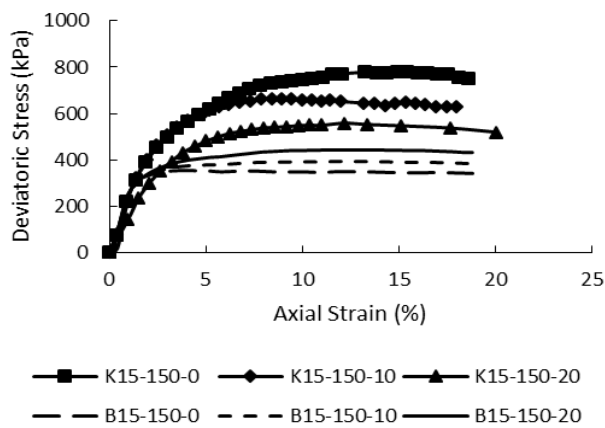
در خاک های رسی با خاصیت خمیری کم، عامل تاثیرگذار پیوند بین ذرات می باشد و لایه آب دوگانه نقش کمتری در رفتار خاک های آلوده شده و نشده دارد. در کائولینیت نیروی بین ذرات از نوع پیوند قوی هیدروژنی می باشد. این پیوند در مقایسه با پیوند واندروالسی موجود در بنتونیت بسیار قوی تر بوده و به بیانی دیگر عامل اصلی در تغییر رفتار کائولینیت، پیوند هیدروژنی می باشد. پیوند هیدروژنی سبب ایجاد یک کمر بند برشی دور دانه ها گردیده که با افزایش غلظت آب حفره ای در خاک توسط آلاینده فلز سنگین (سرب، روی و غیره)



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۳. رفتار تنش-کرنش برای نمونه های ۱۵٪ کائولینیت و بنتونیت در حالات آلوده شده و نشده در تنش همه جانبه (الف) ۵۰kPa، (ب) ۱۰۰kPa و (پ) ۱۵۰kPa

Fig. 3. Stress-strain behavior for samples with 15% kaolinite and bentonite in two cases of contaminated an uncontaminated at different confining pressure of (a) 50 KPa, (b) 100 KPa and (c) 150 KPa

محیط خاک اسیدی می گردد و همین امر سبب تخریب این کمر بند برشی گردیده و موجب کاهش مقاومت می گردد. از طرفی دیگر ورود آلاینده به داخل ترکیب کائولینیت موجب می شود که تبادل کاتیونی بین کاتیون های آزاد ( $H^+$ ) و ( $Pb^{2+}$ ) انجام شود [۱۹] و در نتیجه این تبادل کاتیونی، پیوند هیدروژنی بین ذرات کائولن تا حدودی کمتر می گردد و همین امر سبب می شود تا ذرات از یکدیگر کمی فاصله بگیرند و به سمت ساختار پراکنده میل کنند. همان طور که پیشتر بیان گردید، در این تحقیق از نسبت های مختلف ماسه و رُس استفاده شده و هر کدام از این حالات در تراکم بهینه مربوط به همان ترکیب ساخته شده است. همچنین به منظور ساخت نمونه های آلوده نیز از رطوبت بهینه و دانسیته ماکزیمم خاک غیر آلوده استفاده گردید. اگرچه برخی از مراجع نسبت تغییرات دانسیته ماکزیمم خاک های آلوده به غیر آلوده را ناچیز گزارش کرده اند [۶]، ولی به طور خلاصه می توان گفت، با وجود این که تبادل کاتیونی (به واسطه حضور فلزات سنگین) باعث تغییر در ساختار خاک شده، و سهم عمده ای را در تغییر پارامترهای مقاومتی در خاک های آلوده دارد، ولی با این وجود، تغییر در تراکم خاک های آلوده به فلزات سنگین نیز می تواند پارامترهای مقاومت برشی را تحت تاثیر قرار بدهد.

#### ۴-۲- تاثیر نوع کانی رُسی

در شکل ۳ رفتار تنش-کرنش برای نمونه های غیر آلوده و آلوده به نیترات سرب برای دو نوع خاک ماسه با ۱۵٪ کائولینیت و بنتونیت در تنش های همه جانبه متفاوت، نشان داده شده است. نتایج مقاومتی در حالت غیر آلوده برای دو نوع ترکیب مورد نظر نشان می دهد، با تغییر در نوع کانی رُسی از کائولینیت به بنتونیت مقاومت برشی کاهش یافته است. دلیل این رفتار، تفاوت در ساختار و نیروی های بین ذره ای دو نوع رُس می باشد. ذرات بنتونیت سطح ویژه بسیار بیشتری نسبت به کائولینیت داشته و به همین دلیل قابلیت جذب آب بالایی را دارد. بنابراین مقاومت حاصل از بنتونیت وابسته به لایه آب دوگانه می باشد. این در حالی می باشد که در کائولینیت عامل تعیین کننده در مقاومت آن پیوند هیدروژنی بین ذرات می باشد، در صورتی که در بنتونیت پیوند میان دانه ها از نوع ضعیف واندروالسی بوده که این پیوند عامل اصلی تغییرات مقاومتی نمی باشد و تغییرات مقاومت برشی را بایستی وابسته به تغییر ضخامت لایه آب مضاعف

نشان دهنده همسویی نتایج این تحقیق با نتایج محققین می باشد.

#### ۳-۴- پارامترهای مقاومت برشی

تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی موثر با افزایش غلظت نیترات سرب برای ترکیبات ۱۵٪ و ۲۵٪ کائولینیت در شکل ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است این پارامترها با ترسیم پوش بر دواير موهر تعیین شده اند.

شکل ۴ (الف) نشان می دهد برای ترکیب ۱۵٪ کائولینیت در حالت غیر آلوده، چسبندگی  $13 \text{ kPa}$  می باشد و با نفوذ فلز سنگین سرب به داخل محیط خاکی مقدار چسبندگی در غلظت های  $10000$  و  $20000 \text{ ppm}$  به ترتیب در حدود  $16 \text{ kPa}$  و  $19 \text{ kPa}$  گردیده است. همچنین مطابق شکل ۴ (ب)، با افزایش مقدار کائولینیت به ۲۵٪، مقدار چسبندگی برای غلظت های  $10000$  و  $20000 \text{ ppm}$  نیترات سرب به ترتیب در حدود  $22$ ،  $31$  و  $37 \text{ kPa}$  شد. همچنین نتایج نشان می دهد با افزایش مقدار درصد کائولینیت تغییرات بوجود آمده در چسبندگی بیشتر شده است.

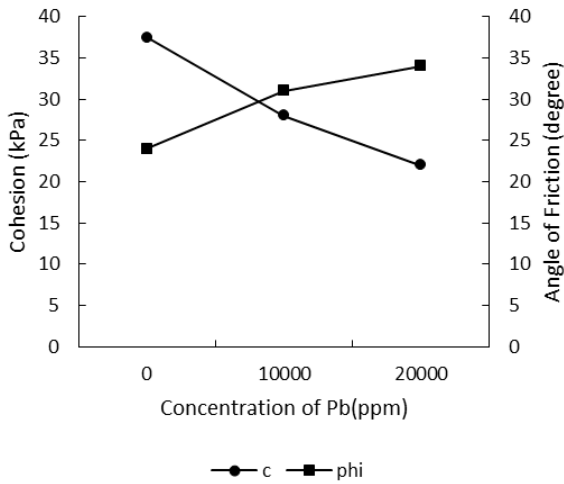
لازم بذکر می باشد اگرچه افزایش غلظت نیترات سرب باعث افزایش چسبندگی در خاک های حاوی کائولینیت گردیده ولی زاویه اصطکاک داخلی به دلیل تغییر در آرایش دانه ها، کاهش یافته است. به طوری که برای ۱۵٪ کائولینیت زاویه اصطکاک داخلی در حالت آلوده نشده در حدود  $33$  درجه بوده که این مقدار با افزایش غلظت آلاینده تا  $20000 \text{ ppm}$  به  $29$  درجه رسیده است. با افزایش مقدار کائولینیت به ۲۵٪، زاویه اصطکاک داخلی در دو حالت آلوده نشده و آلوده شده با  $20000 \text{ ppm}$  نیترات سرب، به ترتیب در حدود  $27$  و  $22$  درجه می باشد. همان طور که ملاحظه می گردد درصد تغییرات کاهشی بوجود آمده در زاویه اصطکاک داخلی در حالت آلوده شده نسبت به خاک غیر آلوده کمتر از میزان افزایش بوجود آمده در تغییرات چسبندگی می باشد.

در شکل ۵ تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی ماسه حاوی ۱۵٪ بنتونیت در برابر غلظت نیترات سرب نشان داده شده است. تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در خاک های آلوده به فلزات سنگین، با تغییر در نوع کانی رُسی متفاوت می باشد. نتایج نشان می دهد با افزایش غلظت آلاینده سرب در خاک های بنتونیت دار بر خلاف خاک های حاوی کائولینیت مقدار زاویه

دانست. با توجه به جذب بیشتر آب در بنتونیت، بخش زیادی از ذرات تشکیل دهنده تا حدودی ساختار پراکنده داشته، در حالی که با توجه به پیوند هیدروژنی در کائولن، تا حدودی ساختار فلوکوله ای می باشد. همین امر باعث شده است، مقاومت خاک های غیر آلوده کائولینیت دار از بنتونیت دار بیشتر گردد.

مطابق شکل ۳، با تغییر در نوع کانی رُسی، اثر فلز سنگین سرب متفاوت می باشد. در نمونه های حاوی کائولینیت، با افزایش غلظت نیترات سرب، مقدار مقاومت خاک کاهش یافته است و این در حالی می باشد که در نمونه های حاوی بنتونیت، افزایش غلظت آلاینده فلزات سنگین سبب افزایش مقاومت گردیده است. یکی از دلایل اصلی در تغییر در رفتار بنتونیت آلوده شده به فلزات سنگین نسبت به کائولینیت آلوده، وابستگی این کانی به حجم لایه آب مضاعف می باشد. طبق تئوری لایه آب مضاعف، افزایش غلظت آب حفره ای، کاهش ثابت دی الکتریک آب حفره ای و افزایش ظرفیت یونی سبب می شود، ضخامت لایه آب مضاعف کاهش یابد. [۲۰] از سوی دیگر کاهش ضخامت این لایه باعث تماس بیشتر دانه ها به یکدیگر شده و با ایجاد یک ساختار فلوکوله موجب تداخل بیشتر دانه ها با یکدیگر گردید. در نتیجه می توان گفت کاهش ضخامت آب لایه مضاعف موجب افزایش مقاومت برشی در خاک های رُسی با خاصیت خمیری زیاد (مانند بنتونیت) شده است. مطابق نتایج به دست آمده، در تنش همه جانبه  $50 \text{ kPa}$  با افزایش غلظت نیترات سرب در خاک ترکیبی با ۱۵٪ بنتونیت، مقاومت نهایی در حالت بدون آلودگی نسبت به حالت آلوده شده با  $10000 \text{ ppm}$  نیترات سرب از  $300 \text{ kPa}$  به  $340 \text{ kPa}$  افزایش یافته است. با افزایش بیشتر غلظت فلز سنگین به  $20000 \text{ ppm}$ ، مقاومت نهایی به  $370 \text{ kPa}$  تغییر یافت. همچنین بیشترین تغییرات در مقاومت برشی خاک آلوده بنتونیت دار برای تنش همه جانبه  $150 \text{ kPa}$  بوجود آمده، به طوری که مقاومت نهایی در حالت آلوده نشده و آلوده شده با  $10000$  و  $20000 \text{ ppm}$  نیترات سرب به ترتیب در حدود  $345$ ،  $400$  و  $450 \text{ kPa}$  شد. لازم بذکر می باشد در برخی از مطالعات محدود انجام گرفته بر روی رفتار خاک های آلوده با فلزات سنگین از ترکیباتی شامل ریز دانه های رُسی با خاصیت خمیری زیاد استفاده شده است. افزایش مقاومت برشی و کاهش ضخامت آب لایه مضاعف، یکی از دلایل اصلی در تغییر رفتار خاک های آلوده در تحقیقات پیشین عنوان گردیده است. این امر





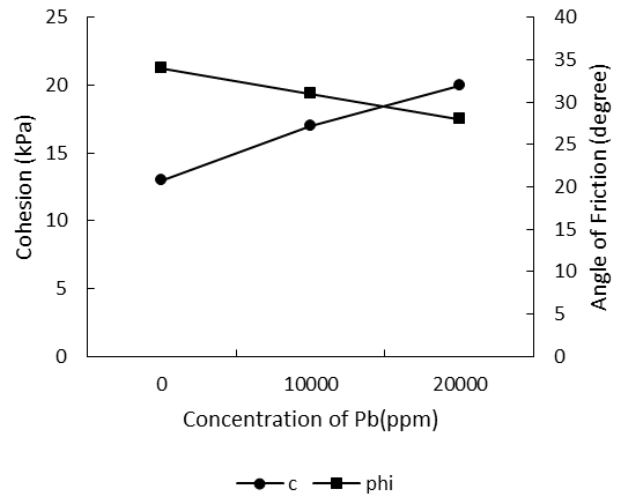
شکل ۵. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی برای نمونه های ۱۵٪ بنتونیت

Fig. 5. The changes in the internal friction angel and cohesion for samples with %15 bentonite

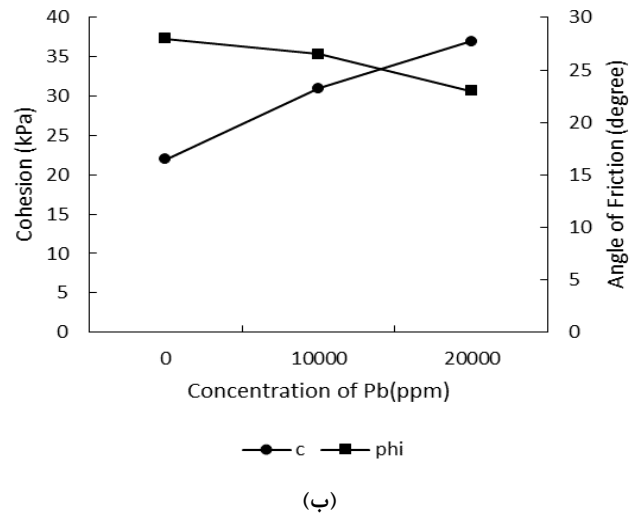
به پوش دوایر موهر می باشد. همچنین دوایر موهر براساس تغییرات نمودار تنش - کرنش و فشار آب حفره ای حاصل می شوند. بنابراین می توان گفت پارامترهایی که در رسم دوایر موهر (تنش ماکزیمم و فشار آب حفره ای) نقش اساسی دارند، از اهمیت بیشتری برای تفسیر تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برخوردار هستند.

#### ۴-۴- تاثیر نیترات سرب بر روی مدول الاستیسیته

در شکل ۶ تغییرات مدول الاستیسیته برای ترکیبات مختلف ماسه با کائولینیت و بنتونیت نشان داده شده است. ملاحظه گردید که با افزایش مقدار کائولینیت در خاک های غیر آلوده از ۱۵٪ به ۲۵٪ و کاهش تماس بین ذرات، سختی خاک از ۲۵/۸MPa به ۱۹/۸۲MPa کاهش یافته است. همچنین برای ترکیب ۱۵٪ کائولینیت، با ورود آلودگی فلز سنگین سرب به خاک، مقدار مدول الاستیسیته خاک برای غلظت های ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ ppm در حدود ۲۴/۳ و ۲۲/۱MPa شده است. با افزایش مقدار کائولینیت به ۲۵٪، مدول الاستیسیته برای خاک های آلوده شده با غلظت های ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ ppm نسبت به خاک آلوده نشده به ترتیب در حدود ۹/۸٪ و ۱۳/۸٪ درصد کاهش یافته است. بر خلاف کائولینیت، فلز سنگین سرب باعث افزایش کمی در سختی خاک های حاوی بنتونیت گردید. نتایج نشان می دهد مقدار مدول الاستیسیته برای نمونه های حاوی



(الف)

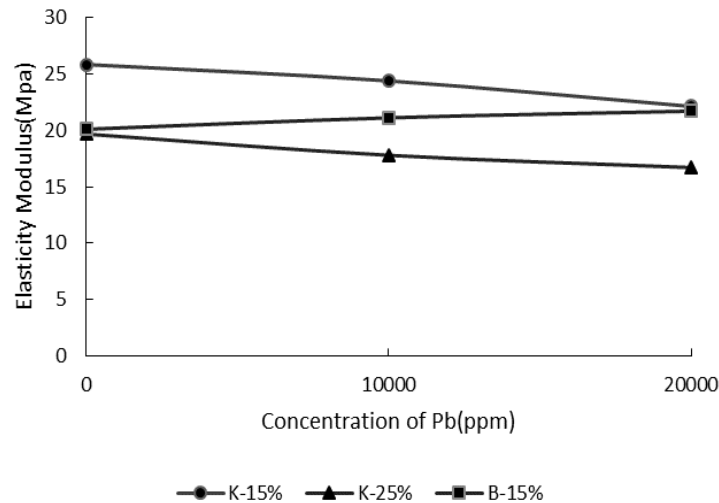


(ب)

شکل ۴. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی برای نمونه های ۱۵٪ کائولینیت و ۲۵٪ کائولینیت

Fig. 4. The changes in the internal friction angel and cohesion for samples with (a)%15 kaolinite (b)%25 kaolinite

اصطکاک داخلی تا حدودی افزایش یافته و مقدار چسبندگی نیز کاهش یافته است. همان طور که ملاحظه می گردد در ترکیب ۱۵٪ بنتونیت، مقدار چسبندگی در حالت آلوده نشده در حدود ۳۷ kPa بوده و با افزایش غلظت به ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ ppm مقدار چسبندگی به ترتیب به ۲۹ و ۲۳ kPa کاهش یافته است. این در حالی است که مقدار زاویه اصطکاک داخلی از ۲۴ درجه در حالت غیر آلوده به ۲۸ و ۳۲ درجه به ترتیب در غلظت های ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ ppm، تغییر کرده است. پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی وابسته



شکل ۶. تغییرات مدول الاستیسیته برای نمونه های آلوده شده و نشده

Fig. 6. The changes in the elasticity modulus for contaminated and uncontaminated samples

جدول ۵. تغییرات حدود اتربرگ در نمونه های آلوده شده و نشده

Table 5. Atterberg limits changes for contaminated and uncontaminated samples

حدود اتربرگ		غلظت نیترات سرب (ppm)		
		۰	۱۰۰۰۰	۲۰۰۰۰
LL (%)	کائولینیت	۴۳/۸	۴۵/۴	۴۶/۶
	بنتونیت	۱۳۵/۵	۱۰۲/۴	۹۲/۳
PL (%)	کائولینیت	۳۲	۳۳/۳	۳۴/۱
	بنتونیت	۵۱/۹	۴۸/۹	۴۶/۶
PI (%)	کائولینیت	۱۱/۸	۱۲/۱	۱۲/۵
	بنتونیت	۸۳/۶	۵۳/۴	۴۵/۷

سبب کاهش حجم آب لایه مضاعف گردیده و همین امر منجر به کاهش مقدار چسبندگی و افزایش کمی در زاویه اصطکاک شده است. همچنین با کاهش ضخامت لایه آب مضاعف، مقدار حد روانی و حد خمیری کاهش یافته است [۲۰].

در جدول ۵ تغییرات حد روانی و حد خمیری برای کائولینیت و بنتونیت آلوده شده و نشده نشان داده شده است. در کائولینیت با افزایش غلظت آلاینده و جایگزینی کاتیونی با  $H^+$ ، موجب تضعیف پیوند هیدروژنی گردیده و همین امر سبب شده تا حدود خمیری خاک به مقدار کمی افزایش یابد. تغییرات کم حدود خمیری در کائولینیت به این دلیل می باشد که در این نوع کانی تغییرات حدود خمیری خاک وابسته به تبادیل بیشتر کاتیون های آلاینده با هیدروژن

جدول ۴. تغییرات pH نمونه های آلوده شده و نشده

Table 4. Variation of pH for contaminated and uncontaminated samples

نوع ترکیب	غلظت نیترات سرب (ppm)		
	۰	۱۰۰۰۰	۲۰۰۰۰
K15	۷	۶/۵	۵/۹۳
K25	۶/۸	۶/۲	۵/۷۱
B15	۶/۷	۵/۹	۵

۱۵٪ بنتونیت در حالت غیر آلوده در حدود ۲۰/۱ MPa بوده و با افزایش غلظت فلزات سنگین به ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ ppm مقدار مدول الاستیسیته به ۲۱/۱۲ و ۲۱/۹۵ MPa افزایش یافته است.

#### ۵- تاثیر نیترات سرب بر روی pH و خواص خمیری خاک

تغییرات pH در ترکیبات مختلف بنتونیت و کائولینیت در هر دو حالت آلوده شده و نشده در جدول ۴ نشان داده شده است. آزمایش pH مطابق استاندارد ASTM D4972-01 انجام شده است. [۲۱] همان طور که در جدول ۴ نشان داده شده، با افزایش غلظت آلاینده در هر دو نمونه حاوی کائولینیت و بنتونیت مقدار pH خاک کاهش یافته است. در خاک هایی با خصوصیات خمیری بالا (بنتونیت) افزایش غلظت نیترات سرب سبب کاهش مقدار pH و اسیدی شدن محیط خاک از یک سو و همچنین تبادیل کاتیونی از سوی دیگر

برشی نهایی در حالت آلوده شده با ppm ۲۰۰۰۰ نیترا ت سرب نسبت به حالت غیرآلوده در حدود ۲۴٪ کاهش یافت. در این ترکیب چسبندگی خاک در حالت آلوده شده با غلظت‌های ۱۰۰۰۰ و ppm ۲۰۰۰۰ نیترا ت سرب به ترتیب ۴۲٪ و ۵۸٪ افزایش داشته است. همچنین زاویه اصطکاک داخلی در حالتی که غلظت آلاینده ppm ۲۰۰۰۰ باشد، نسبت به حالت غیرآلوده در حدود ۱۵٪ کاهش یافته است.

۴- تغییر در نوع کانی رُسی، باعث تغییر در رفتار خاک های آلوده با فلز سنگین شد. به طوری که ورود آلودگی سرب به خاک های حاوی ریزدانه با خاصیت خمیری بالا (بنتونیت) سبب افزایش مقاومت برشی خاک گردید. همچنین با افزایش غلظت نیترا ت سرب در این نمونه ها، مقاومت برشی روند افزایشی داشت. همچنین افزایش در مقاومت خاک بنتونیت دار با افزایش تنش همه جانبه ارتباط مستقیم دارد. به طوری که در تنش همه جانبه ۱۵۰ kPa با افزایش غلظت نیترا ت سرب به ppm ۲۰۰۰۰ مقاومت خاک آلوده نسبت به حالت غیرآلوده در حدود ۳۰٪ افزایش یافته است. در ماسه حاوی ۱۵٪ بنتونیت، با افزایش غلظت نیترا ت سرب به ۱۰۰۰۰ ppm و ۲۰۰۰۰ چسبندگی خاک نسبت به حالت آلوده نشده به ترتیب در حدود ۲۰٪ و ۳۵٪ کاهش، و زاویه اصطکاک داخلی نیز به ترتیب در حدود ۱۶٪ و ۲۶٪ افزایش یافت.

۵- در خاک ماسه ای رُسی دار، افزایش مقدار رُسی باعث کاهش مدول الاستیسیته آن شده است. همچنین در حالتی که خاک حاوی ریزدانه کائولینیتی باشد افزایش غلظت آلاینده فلز سرب منجر به کاهش مقدار مدول الاستیسیته خواهد شد، در حالی که در خاک حاوی ریزدانه بنتونیتی، افزایش غلظت آلاینده سرب، اثر چندانی بر روی مدول الاستیسیته آن ندارد.

۶- در هر دو نمونه خاک ماسه ای رُسی دار با کانی کائولینیت و بنتونیت، آلودگی با سرب باعث تبادل کاتیون‌هایی با ظرفیت بالاتر در محیط خاک گردیده، که این امر منجر به افزایش کمی در درجه اسیدی خاک شده است.

۷- در خاک ماسه ای حاوی کائولینیت، آلودگی خاک با سرب و افزایش غلظت آن باعث تخریب باندهای برشی شده است، که این امر منجر به پراکنده تر شدن ذرات و افزایش اندک حدود اتربرگ و شاخص خمیری آن گردید. در حالی که آلوده شدن خاک ماسه‌ای

می باشد و با توجه به این که هیدروژن ظرفیت تبدالی کمی دارد، لذا تغییرات حدود خمیری در کائولینیت کم می باشد. با تغییر در نوع کانی رُسی از کائولینیت به بنتونیت، با افزایش غلظت آلاینده فلزات سنگین، به علت تبادل کاتیونی زیاد در بنتونیت و جایگزینی کاتیون‌هایی با ظرفیت بالاتر ( $Pb^{2+}$ ) با کاتیون‌هایی با ظرفیت پایین تر، سبب کاهش ضخامت آب لایه مضاعف و کاهش حدود خمیری گردیده است.

## ۶- نتیجه گیری

وجود فلزات سنگین در خاک ها علاوه بر تغییر در پارامترهای مقاومتی باعث ایجاد تغییرات قابل توجهی در ساختار خاک های مختلف می شود. با تغییر مقدار ریزدانه و نوع کانی تشکیل دهنده آن در خاک های آلوده با فلزات سنگین، تغییرات ساختاری نیز متفاوت می باشد. در این تحقیق به بررسی رفتار خاک ماسه ای رُسی دار با دو نوع ریزدانه کائولینیت و بنتونیت (با خصوصیات خمیری متفاوت) که تحت تاثیر آلودگی نیترا ت سرب قرار گرفته اند، پرداخته شده و نتایجی به شرح زیر به دست آمده است:

۱- در صورتی که درصد رُسی در مخلوط ماسه و رُسی افزایش یابد، به دلیل پوشش بیشتر سطح دانه های ماسه ای توسط ریزدانه رُسی، دانه های ماسه از هم جدا شده و در نهایت سبب کاهش مقاومت شده است. افزایش مقدار کائولینیت از ۱۵٪ به ۲۵٪ سبب کاهش مقاومت در حدود ۴۸٪ شد. همچنین مقدار چسبندگی با افزایش مقدار کائولینیت از ۱۵٪ به ۲۵٪، در حدود ۶۰٪ افزایش و زاویه اصطکاک داخلی ۲۰٪ کاهش یافته است.

۲- با افزایش غلظت آلاینده نیترا ت سرب تا ppm ۱۰۰۰۰ به خاک حاوی ۱۵٪ کائولینیت، مقاومت برشی خاک آلوده نسبت به خاک غیرآلوده (به طور متوسط در تنش های همه جانبه مختلف) در حدود ۱۲/۵٪ درصد کاهش می یابد و با افزایش غلظت نیترا ت سرب به ppm ۲۰۰۰۰ مقاومت برشی در حدود ۲۱/۵٪ درصد نسبت به خاک غیرآلوده کاهش می یابد. افزایش غلظت نیترا ت سرب تا ppm ۲۰۰۰۰ موجب افزایش ۳۰٪ درصدی در چسبندگی و کاهش ۱۰٪ درصدی زاویه اصطکاک داخلی در ترکیب ماسه با ۱۵٪ کائولینیت شد.

۳- در نمونه خاک با کائولینیت به میزان ۲۵٪ وزنی، مقاومت

and zinc adsorption capacities of zeolite-amended soils for adsorptive fill materials, Department of Civil and Environmental Engineering for the Degree of Master of Science in Civil Engineering, Seoul National University, (2017).

حاوی بنتونیت با فلز سرب، باعث کاهش ضخامت آب لایه مضاعف و فلوکوله شدن و در نتیجه کاهش محسوس حدود آتربرگ و دامنه خمیری شده است.

## مراجع

- [10] O.Abidoye , D. Afolayan, I. Akinwumi, Effects of lead nitrate on the geotechnical properties of lateritic soils: International Journal of Civil Engineering and Technology, 530-522 (2018) (7)9.
- [11] M.O. Karkush, T.Taher, Geotechnical evaluation of clayey soil contaminated with industrial wastewater, Archives of civil engineering, 2017) (1)13).
- [12] G. Yilmaz, T. Yetimoglu, S. Arasan, Hydraulic conductivity of compacted clay liners permeated with inorganic salt solutions, Waste Management & Research, (2008) (5)26 473-464.
- [13] M.Sayyed, M.H.Sayadi, Variations in the heavy metal accumulations within the surface soils from the Chitgar industrial area of Tehran, Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences, (1)1 46-36 (2013).
- [14] G.Resmi, S.Thampi, S.Chandrakaran, Impact of lead contamination on the engineering properties of clayey soil, Journal Geological Society of India, 46-42 (2011) ,77.
- [15] R.E. Olson, Shearing strengths of kaolinite, illite, and montmorillonite, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, (102 (1976(GT2).
- [16] Y. Chu, S. y. Liu, G. j. Cai, H.l. Bian, A study in the micro-characteristic and electricity properties of silt clay contaminated by heavy metal zinc, Japanese Geotechnical Society Special Publication, 559-556 (2016) (14)2.
- [17] S. Arasan, Effect of chemicals on geotechnical properties of clay liners: a review, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, -765 (2010) (8)2 775.
- [18] J.A.H. Carraro, M. Prezzi, R. Salgado, Shear strength and stiffness of sands containing plastic or nonplastic fines, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 1178-1167 (2009) (9)135.
- [19] J.C. Miranda-Trevino, C.A. Coles, Kaolinite properties, [1] D. Grasso, M.A. Butkus, D. O'Sullivan, N.P. Nikolaidis, Soil-washing design methodology for a lead-contaminated sandy-soil, Water research, 3056-3045 (1997) (12)31.
- [2] S. Arasan, T. YETİMOĞLU, Effect of inorganic salt solutions on the consistency limits of two clays, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 115-107 (2008) (2)32.
- [3] V.Ouhadi, M.Fakhimjoo, T.Naeini, The Comparison of Plastic and Permeability Behavior of Bentonite in the Presence of Organic and Heavy Metal Contaminants, Journal of Civil and Environmental Engineering, (85)46 36-25 (2017).(In persian).
- [4] V.Ouhadi, Z.Sharifian, Compare the effect of alkali metal contaminants and heavy metals on the plastic properties of kaolinite and bentonite clay, in: in: First Natinal Conference on geotechnical engineering, Mohaghegh Ardabili University, Technical Faculty, Iran, 2015.(In persian).
- [5] H. Y. Fang, J.L. Daniels, Introductory geotechnical engineering: an environmental perspective, CRC Press, (2006).
- [6] J. S. Li, Q. Xue, P. Wang, Z. Z. Li, Effect of lead (II) on the mechanical behavior and microstructure development of a Chinese clay, Applied Clay Science, 199-192 (2015) 105.
- [7] Y. Chu, S. Liu, F. Wang, G. Cai, H. Bian, Estimation of heavy metal-contaminated soils' mechanical characteristics using electrical resistivity, Environmental Science and Pollution Research, 13575-13561 (2017) (15)24.
- [8] C.Y. Bian .H , Liu .S, Cai .G, A study in the microcharacteristic and electricity properties of silt clay contaminated by heavy metal zinc, in: The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Fukuoka, (178-162 (2015).
- [9] J. Park, Assessment of shear strength characteristics

- philosophical magazine and journal of science, (148)25  
481-475 (1913).
- [21] ASTM. D01-4972, Standard test method for pH of soils,  
Annual book of ASTM Standards, 3-1 (2001) (08)4.
- structure and influence of metal retention on pH, Applied  
Clay Science, 139-133 (2003) (4-1)23.
- [20] D.L. Chapman, LI, A contribution to the theory of  
electrocapillarity, The London, Edinburgh, and Dublin

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Hossein Zade, M. Hassanlourad, S.A. Naeini, Effect of Lead Nitrate on the Behavior and Shear Strength Parameters of clayey sand, Amirkabir J. Civil Eng., 53(2) (2021) 575-588.*

DOI: [10.22060/ceej.2019.16146.6142](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16146.6142)



