

بررسی اثر جایگزینی زئولیت و خاکستر سبوس برنج با کانی‌های مختلف رسی بر رفتار خاک‌های آلوده

سیدعلیرضا نصرتی^۱، علیرضا نگهدار*^۲، حسن نگهدار^۳، مهدی سیاوش‌نیا^۳

^۱ دانشجوی دکترای دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

^۲ دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

^۳ استادیار دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی تهران

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷، بازنگری: ۱۴۰۱/۵/۱۵، پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۵، نشر آنلاین: ۱۴۰۱/۶/۵

چکیده

نشت فلزات سنگین و سمی، یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد آلودگی در خاک‌ها است. عناصر سنگین توسط فاضلاب‌های آلوده به این فلزات و یا از طریق نشت از مخازن ذخیره و خطوط لوله انتقال آن‌ها وارد محیط‌زیست می‌گردد، که پیامد آن آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی به این ترکیبات سمی می‌باشد. حضور فلزات سنگین در خاک باعث تغییر در ساختار و معادلات رفتاری خاک می‌شود که این امر موجب تغییر در پارامترهای مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی خاک می‌گردد. با توجه به این که ملاحظات اقتصادی همواره به‌عنوان یکی از اصول اساسی در طرح‌ها مطرح می‌گردد، استفاده از جاذب‌های طبیعی و ارزان‌قیمتی که دارای فراوانی کافی در طبیعت نیز باشند، به‌عنوان یکی از راهکارهای بهسازی در خاک‌هایی که در معرض آلوده قرار دارند، مورد توجه پژوهشگران است. در این تحقیق از دو رویکرد به رفتار خاک‌های آلوده پرداخته شده است. در رویکرد اول، رفتار کانی‌های مختلف رسی در حالت آلوده با فلز سنگین نیترات روی، مورد بررسی قرار گرفته و برای این منظور ترکیب ماسه با ۲۰٪ ریزدانه رسی انتخاب و تأثیر تغییر نوع کانی رسی بر پارامترهای مقاومتی در دو حالت آلوده و غیرآلوده با یکدیگر مقایسه شده است. در رویکرد دوم، ۱۰٪ از ریزدانه‌های رسی حذف و جاذب فلزات سنگین (زئولیت و خاکستر سبوس برنج) جایگزین ریزدانه‌های رسی شده و تغییرات مقاومتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. ورود فلزات سنگین به خاک‌های رسی با خاصیت خمیری کم، سبب کاهش مقاومت نهایی نسبت شده است ولیکن مقاومت نهایی در ترکیب خاک کائولینیت‌دار به‌همراه جاذب زئولیت در حدود ۵۰٪ درصد نسبت به مقاومت خاک کائولینیت‌دار بدون جاذب در هر دو حالت آلوده و غیرآلوده افزایش یافته است. اگرچه جایگزینی جاذب‌های زئولیت و خاکستر سبوس برنج با هر دو نوع ریزدانه رسی (کائولینیت و بنتونیت) سبب افزایش حدوداً ۵۰٪ تا ۶۰٪ در مقاومت نهایی شده است، ولیکن با توجه به این که ظرفیت جذب زئولیت در حدود ۳۴٪ درصد نسبت به خاکستر سبوس برنج بیشتر است. بر همین اساس می‌توان گفت استفاده از جاذب زئولیت در ترکیب، سبب افزایش عملکرد ژئوتکنیکی و زیست‌محیطی ترکیب می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: فلزات سنگین، مقاومت نهایی، خاکستر سبوس برنج، نیترات روی، زئولیت.

۱- مقدمه

طبق گزارش آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا، آلودگی سرب بیشترین غلظت را در میان سایر فلزات سنگین در خاک دارد (Zhang و همکاران، ۲۰۱۹).

راهکارهای گوناگونی توسط محققان برای کاهش اثرات منفی آلودگی خاک ارائه گردیده است که از جمله آن‌ها استفاده از ساقه و ریشه‌های گیاهان، ذوب کردن به‌وسیله تزریق حرارت و همچنین روش‌های الکتروکینتیک می‌باشد. یکی دیگر از روش‌های بهسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، استفاده از موادی چون سبوس

آلودگی‌های خاک یکی از مسائلی است که امروزه با پدیدار شدن صنایع، مورد توجه قرار گرفته است. خاک جزو عوامل اصلی در مؤلفه‌های زیست‌محیطی بوده و از این جهت می‌بایست تمامی مواردی که می‌تواند بر روی خاک تأثیر منفی داشته باشد را حذف و یا به حداقل ممکن کاهش داد. فلزات سنگین از مهم‌ترین و خطرناک‌ترین آلاینده‌هایی می‌باشند که مطالعه آن‌ها هم از نظر زیست‌محیطی و هم از جهت ژئوتکنیکی، حائز اهمیت می‌باشد.

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۲۲۳۴۴۲۸۰

آدرس ایمیل: ali.nosrati.eng@iauctb.ac.ir (ع. نصرتی)، negahdar@uma.ac.ir (ع. نگهدار)، h.negahdar@iauctb.ac.ir (ح. نگهدار)،

meh.siaoshnia@iauctb.ac.ir (م. سیاوش‌نیا).

Muththalib و Baudet در سال ۲۰۱۹ نشان دادند که کاتیون‌های موجود در فلزات سنگین سبب رفتار متضاد در خاک-های کائولینیت‌دار نسبت به خاک‌های بنتونیت‌دار می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد، آلاینده‌های فلزات سنگین باعث کاهش خاصیت خمیری در خاک‌های بنتونیت‌دار شده، در حالی که افزایش غلظت فلزات سنگین سبب افزایش خاصیت خمیری در کائولینیت شده است.

با توجه به ظرفیت محدود برخی خاک‌ها در جذب آلاینده‌ها، استفاده از جاذب‌های فلزات سنگین در خاک‌ها گسترش یافته است. زئولیت و خاکستر سیوس برنج با توجه به سطح جانبی و قدرت تبادل کاتیونی بالا، یکی از جاذب‌های اقتصادی می‌باشد. خصوصیات خمیری برخی از زئولیت‌ها تا حدودی نزدیک به کائولینیت می‌باشد (Katsou و Malamis، ۲۰۱۳).

Singh و Oste در سال ۲۰۰۱ به بررسی تأثیر افزودن خاک اره و خاکستر سیوس برنج به خاک‌های آلوده در اطراف مناطق صنعتی پرداختند. نتایج نشان می‌داد که افزودن ۵٪ خاکستر سیوس برنج به خاک طبیعی محل (ماسه رس‌دار با ۱۰ تا ۱۵٪ بنتونیت) باعث کاهش چسبندگی زهکشی نشده در حالت آلوده می‌گردد. همچنین جذب فلز سنگین سرب برای این ترکیب خاک که در محدوده pH بازی قرار دارد، بیشتر از سایر فلزات سنگین (مس و کادمیوم) می‌باشد.

Chen و همکاران (۲۰۲۱) پس از بررسی جذب فلزات سنگین سرب و روی توسط پوسته برنج در فاضلاب‌های شهری به این نتیجه دست یافتند که عواملی نظیر مقدار جاذب (سیوس برنج)، زمان تماس جاذب با فلزات سنگین و pH فاضلاب در جذب فلزات سنگین مؤثر می‌باشد. در این تحقیق مقدار جاذب در حدود ۳ گرم، زمان تماس ۵ تا ۷۰ دقیقه و pH در محدوده ۲ تا ۹ می‌باشد. مطابق نتایج آزمایش‌ها، میزان جذب سرب و روی با افزایش زمان تماس و نیز مقدار جاذب (سیوس برنج)، افزایش می‌یابد.

به‌طور خلاصه می‌توان گفت، کانی‌های مختلف رسی دارای ویژگی‌های متفاوتی می‌باشند و همین امر سبب تفاوت رفتاری آن‌ها در حالت آلوده با فلزات سنگین می‌باشد. از تفاوت‌های مهم در بین کانی‌های رسی می‌توان به ترکیب صفحات تشکیل‌دهنده آن، نوع پیوند بین واحدها، شکل کانی‌ها و آب جذب شده اشاره کرد. با توجه این‌که جذب فلزات سنگین وابسته به نوع کانی ریزدانه در ترکیب می‌باشد، بر همین اساس در این تحقیق، ابتدا به تأثیر فلز سنگین بر روی پارامترهای مقاومتی کانی رسی کائولینیت و بنتونیت پرداخته شده است. لازم به‌ذکر می‌باشد با توجه به گستردگی کانی‌های رسی از نوع کائولینیت و بنتونیت، لزوم مطالعه این دو نوع کانی امری ضروری می‌باشد (Pan و همکاران، ۲۰۱۳).

برنج و زئولیت معدنی می‌باشد (Zang و همکاران، ۲۰۲۰). حضور ریزدانه‌های رسی و جذب فلزات سنگین به‌واسطه این ریزدانه‌ها، باعث ارتقاء عملکرد خاک از جنبه‌های زیست‌محیطی می‌شود، ولیکن تغییرات ساختاری به‌وجود آمده در اثر جذب فلزات سنگین لزوم بررسی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده را نشان می‌دهد. نتایج تحقیقات Hassanlourad و همکاران نشان داد، تغییر در نوع کانی رسی، باعث تغییر در روند پارامترهای مقاومتی در حالت آلوده با فلزات سنگین شده است (Hassanlourad و همکاران، ۲۰۱۹).

Patel (۲۰۱۴) بر روی خاک نباتی آلوده به فلزات سنگین باریم، کروم، روی، مس، نیکل، کبالت و وانادیم، آزمایش‌های پایه ژئوتکنیکی همچون حدود اتربرگ و تراکم را انجام داد. نتایج نشان داد که میزان چگالی ویژه و نیز درصد رطوبت بهینه خاک آلوده نسبت به خاک غیرآلوده کاهش یافته است. همچنین حدود روانی و خمیری و نیز حداکثر وزن مخصوص خشک با ورود آلودگی کاهش می‌یابد.

Chu و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی اثر تخلخل خاک بر روی مقاومت نهایی دریافتند که رفتار خاک‌های آلوده شده با فلزات سنگین روی، کادمیوم و سرب تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشد. مطابق نتایج به‌دست آمده، در تخلخل‌های پایین مقاومت برشی بالاتری نسبت به تخلخل‌های بالاتر حاصل شده است، بر همین اساس می‌توان گفت، تراکم و مقاومت در خاک‌های آلوده رابطه مستقیم با یکدیگر دارد.

بر طبق نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم در مطالعات Taheri و همکاران (۲۰۱۸) افزودن فلزات سنگین موجب کاهش ضخامت آب لایه مضاعف شده و در نتیجه چسبندگی رس افزایش می‌یابد. لازم به‌ذکر می‌باشد، تغییر در ضخامت آب لایه مضاعف نقشی مؤثر و حائز اهمیت در شکل‌گیری کانی‌های رسی آلوده با فلزات سنگین دارد.

Abdeh و Nikkhah Nasab (۲۰۲۰) در پژوهشی که بر روی مخلوط ماسه و رس آلوده به فلز سنگین سرب، دریافتند که مقاومت برشی نمونه‌های آلوده شده در مقایسه با نمونه‌های غیرآلوده وابسته به عواملی نظیر درصد و نوع ریزدانه، غلظت آلاینده و همچنین pH مخلوط، می‌باشد. همچنین آن‌ها دریافتند که نوع آلاینده بر رفتار مخلوط خاک مؤثر می‌باشد به‌طوری‌که کاهش مقاومت برشی نهایی در نمونه‌های آلوده به‌روزی بیشتر از حالت آلوده به سرب گزارش شده است.

بر طبق نتایج Zhang و همکاران (۲۰۱۹) مقاومت تک‌محوری در نمونه‌های رس متورم شونده و آلوده با غلظت‌های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ ppm نترات سرب و روی، با افزایش غلظت فلزات سنگین کاهش یافته است.

این منبع می‌تواند به‌طور گسترده‌ای در حذف آلاینده‌های زیست-محیطی از جمله فلزات سنگین مورد استفاده قرار گرفته شود. زئولیت‌ها گروهی از آلومینوسیلیکات‌های هیدراته متبلور با خلل و فرج‌های ریز هستند که حاوی کاتیون‌های قابل تعادلی از گروه فلزات قلیایی و قلیایی خاکی یعنی (K^+ ، Na^+ و Mg^{+2} و Ca^{+2}) بوده و به‌طور برگشت‌پذیر آب را جذب و آزاد می‌کنند (Zheng و همکاران، ۲۰۲۱).

خاکستر پوسته برنج از سوزاندن پوسته برنج یا همان شلتوک برنج به‌دست می‌آید. این خاکستر در صنایع مختلف از جمله فولاد و بتن کاربرد بسیاری دارد. این خاکستر جایگزین بسیار ارزانی با دیگر مواد در صنایع می‌باشد (Chiu و همکاران، ۲۰۱۹). با سوختن پوسته برنج (RHA)، خاکستری تولید می‌شود که دارای سلیس است که بسته به درجه دمای سوختن پوسته برنج به شکل‌های-کوارتز، کرسیتوبالیت تردیمیت تولید می‌شود. برای تهیه یک خاکستر مناسب با حداکثر فعالیت پوزولانی و با کیفیت عالی از پوسته برنج، آن را در دمای ۵۰۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت دو ساعت می‌سوزانند. در این دما اکسیژن کافی برای سوختن تأمین گردد و دی‌اکسیدکربن و گازهای مزاحم هم خارج شده و خاکستر سفید رنگ و روشن به‌دست می‌آید. در سوزاندن پوسته برنج باید هوای کافی به جای دی‌اکسیدکربن حاصله از سوختن RHA وارد کوره شود تا نحوه رسوب سلیس و بلوری شدن آن به‌صورت مطلوبی تنظیم شود (Chiu و همکاران، ۲۰۱۹).

به‌منظور ساخت نمونه‌های آلوده با فلزات سنگین، پس از ساخت ترکیب مورد نظر (ترکیب بدون جاذب و یا ترکیب جاذب-دار) غلظت‌های مختلف نیترات روی به آن اضافه گردید. در همین راستا ابتدا نیترات روی به مقدار مناسب با آب حل شده و محلول-هایی با غلظت‌های ۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ppm تهیه و با خاک ترکیب گردیده است. نمونه‌سازی به روش تراکم مرطوب انجام شده و تراکم نمونه‌ها ۹۵٪ تراکم بهینه است. همان‌طور که پیشتر بیان گردید، افزودن درصد جاذب با کاهش درصد بخش ریزدانه رسی همراه خواهد بود. به این ترتیب که در صورت استفاده از جاذب زئولیت و خاکستر سبوس برنج، ۱۰٪ درصد از مقدار ریزدانه رسی کاسته و معادل آن جاذب افزوده می‌شود. پس از ساخت نمونه‌ها، یک دوره عمل‌آوری ۷ روزه برای نمونه‌ها در نظر گرفته شده است (Li و همکاران، ۲۰۱۵).

همچنین کلیه نمونه‌ها در پنج لایه با ارتفاع و وزن مساوی ساخته شده‌اند. پس از ساخت نمونه‌ها (به قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر)، ابتدا به‌مدت ۱۲۰ دقیقه گاز CO_2 با نرخ کم از درون نمونه عبور داده شده و پس از جایگزینی هوای داخل نمونه با گاز CO_2 ، آب بدون هوا وارد نمونه گردید. لازم به‌ذکر می‌باشد آب

خاک پایه در این تحقیق ترکیب ماسه با ۲۰٪ کائولینیت و خاک ماسه با ۲۰٪ بنتونیت می‌باشد. در ادامه با توجه به اهمیت و نقش جاذب‌های فلزات سنگین از دو نوع جاذب زئولیت و خاکستر سبوس برنج استفاده شده است. در این تحقیق از روش جایگزینی استفاده شده است، به این‌صورت که با جایگزین کردن ۱۰٪ زئولیت و خاکستر سبوس برنج با بخش ریزدانه خاک‌های پایه، مقاومتی خاک به‌همراه جاذب در دو حالت غیرآلوده و آلوده با نیترات روی مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. مقدار کل ریزدانه مورد نظر در این تحقیق ثابت بوده و روند جایگزینی به این صورت می‌باشد که از درصد کائولینیت و یا بنتونیت کاسته شده و به همان نسبت زئولیت جایگزین آن می‌گردد. در این تحقیق با استفاده از آزمایش سه‌محوری استاتیکی، علاوه بر بررسی مقاومتی نهایی خاک‌های آلوده و غیرآلوده تغییرات پارامترهایی از قبیل چسبندگی و زاویه اصطکاک نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- مواد مصرفی و روش تحقیق

در این تحقیق به بررسی تأثیر فلز سنگین روی در خاک‌های ماسه رس دار به‌همراه جاذب پرداخته می‌شود. روش مورد نظر در استفاده از جاذب، روش جایگزینی می‌باشد و این امر با کاهش درصد ریزدانه رسی و افزودن همان مقدار جاذب صورت گرفته است. لازم به‌ذکر می‌باشد که یکی از دلایل استفاده از کانی‌های رسی کائولینیت و بنتونیت و همچنین جاذب‌های زئولیت و خاکستر سبوس برنج در این تحقیق، گستردگی آن‌ها در کارهای تحقیقاتی و همچنین قابلیت آن‌ها در جذب فلزات سنگین می‌باشد (Li و همکاران، ۲۰۱۵).

لازم به‌ذکر می‌باشد یکی دیگر از دلایل استفاده از دو نوع کانی رسی بررسی تأثیر کانی‌های رسی بر روی رفتار مقاومتی خاک‌های آلوده با فلزات سنگین می‌باشد. با توجه به همین امر از دو نوع کانی کائولینیت و بنتونیت در این تحقیق استفاده شده است. سطح ویژه کائولینیت کمتر از دیگر کانی‌های رسی بوده و با توجه به قابلیت جذب آب آن، کانی‌ها تشکیل دهنده آن ساختاری فلوکوله-ای را شکل می‌دهند. ورود فلزات سنگین باعث تغییر در ساختار بین‌کانی‌ها شده و همین امر بر روی پارامترهای مقاومتی و رفتاری خاک‌های کائولینیت‌دار تأثیر می‌گذارد (Pan و همکاران، ۲۰۱۳). علاوه بر تغییر در نوع کانی رسی، دو نوع جاذب زئولیت و خاکستر سبوس برنج نیز در ترکیب خاک استفاده شده است. زئولیت‌ها از جمله موادی هستند که به‌دلیل خصوصیات جذب سطحی و تعویض یونی در حذف فلزات سنگین از پساب‌ها، مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به وجود منابع عظیم زئولیت در ایران و بهره‌برداری از این منابع در مناطق مختلف (مانند سمنان)،

استفاده می‌شود. قرارگیری عبارت K و یا M در ابتدا هر اسم نشان-دهنده حضور کائولینیت و یا بنتونیت در ترکیب می‌باشد و همچنین عددی که پس از آن قرار می‌گیرد معرف درصد کائولینیت و یا بنتونیت می‌باشد. در صورتی که از جایگزینی زئولیت و یا سیوس برنج استفاده شود، ۱۰٪ از ریزدانه‌های کائولینیت و یا بنتونیت کاسته شده و زئولیت و یا خاکستر سیوس برنج که با حروف Z و R نمایش داده شده‌اند، استفاده می‌شود. اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده غلظت‌های مختلف نیترا روی، بر حسب ppm می‌باشند و همچنین عدد انتهایی در نام هر ترکیب نشان‌دهنده تنش همه جانبه بر حسب کیلوپاسکال می‌باشد. لازم به ذکر است تنش‌های همه جانبه مورد نظر در این تحقیق ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال می‌باشند.

۴- بحث و بررسی

۴-۱- جایگزینی زئولیت با کائولینیت

همان‌طور که پیشتر بیان گردید، یکی از اهداف این تحقیق بررسی جایگزینی جاذب‌های مختلف با کانی‌های مختلف رسی در خاک‌های ماسه رس‌دار می‌باشد. در ابتدا رفتار ماسه رس‌دار بدون جاذب مطالعه شده و سپس تأثیر جایگزینی جاذب مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل (۱) به‌عنوان نمونه تغییرات تنش- کرنش برای ماسه با ۲۰٪ کائولینیت در حالت آلوده با غلظت‌های مختلف نیترا روی در تنش همه جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت نهایی در حالت غیرآلوده در حدود ۴۷۰ کیلوپاسکال است. با ورود ۱۰۰۰ ppm آلودگی روی به ترکیب ماسه کائولینیت‌دار، مقدار مقاومت نهایی در حدود ۱۱٪ کاهش می‌یابد و به حدود ۴۲۰ کیلوپاسکال می‌رسد. افزایش بیشتر غلظت نیترا روی به ۲۰۰۰ ppm باعث می‌شود که مقاومت نهایی نسبت به حالت غیرآلوده در حدود ۲۰٪ کاهش یابد و به حدود ۳۸۰ کیلوپاسکال برسد. افزایش بیشتر غلظت به ۵۰۰۰ ppm باعث کاهش بیشتر مقاومت نهایی به ۳۰۰ کیلوپاسکال کاهش یافته است. در شکل (۲) مقاومت نهایی برای تمامی تنش‌های همه جانبه در ترکیب ماسه با ۲۰٪ کائولینیت در غلظت‌های مختلف نیترا روی نشان داده شده است. به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد که در تنش‌های همه‌جانبه مختلف به‌طور متوسط با ورود ۱۰۰۰ ppm نیترا روی به ماسه رس‌دار (ماسه با ۲۰٪ کائولینیت) مقدار مقاومت نهایی نسبت به حالت غیرآلوده به‌طور متوسط در حدود ۱۳٪ کاهش می‌یابد، همچنین افزایش بیشتر غلظت نیترا روی به ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ ppm سبب می‌گردد مقاومت نهایی در حالت آلوده نسبت به حالت غیرآلوده به‌طور متوسط به‌ترتیب در حدود ۲۳٪ و ۳۰٪ کاهش یابد.

هواگیری شده با فشار بسیار کم، (در حدود ۵kPa) وارد نمونه شده است. به‌منظور یکسان‌سازی شرایط آزمایش، پس از عبور آب تمامی نمونه‌ها تا پس‌فشار ۲۰۰kPa به درجه اشباع بالای ۹۵٪ رسیده و سپس آزمایش سه‌محوری زهکشی نشده- تحکیم یافته بر روی نمونه‌ها انجام گردیده است مشخصات کائولینیت، بنتونیت و زئولیت مصرفی که به‌ترتیب از محصولات شرکت خاک چینی ایران، ایران باریت و کارخانه نگین سمنان می‌باشد. در جدول (۱) آورده شده است. طبق روش طبقه‌بندی متحد خاک کائولینیت، زئولیت و خاکستر سیوس برنج CL و بنتونیت CH نام‌گذاری شدند. مشخصات خاکستر سیوس برنج که محصول شرکت گیلان کشت بوده و همچنین ماسه مصرفی (۱۶۱ فیروزکوه) به‌ترتیب در جدول‌های (۲) و (۳) آمده است.

جدول ۱- مشخصات ریزدانه مصرفی

دامنه	حد خمیری، PL (%)	حد روانی LL (%)	چگالی	طبقه-بندی
خاک خمیری، PI (%)			جامد G_s	خاک کائولینیت
۱۱/۱	۲۹/۸	۴۰/۹		CL
۸۶/۱	۵۴/۲	۱۴۰/۳		CH
۱۷/۳	۳۱/۵	۴۸/۸		CL

جدول ۲- مشخصات خاکستر سیوس برنج

(%)	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₄
خاکستر سیوس پوخته برنج	۰/۶۷	۸۸/۳۲	۰/۴۴	۰/۴۶	۰/۶۷	-

جدول ۳- مشخصات ماسه مصرفی

ویژگی	نماد	مقدار
ضریب یکنواختی	C_u	۱/۹
چگالی ویژه	G_s	۲/۶۸
متوسط اندازه دانه‌ها	D50 (mm)	۰/۲
نسبت تخلخل ماکزیمم	e_{max}	۰/۹۱
نسبت تخلخل مینیمم	e_{min}	۰/۵۹
رده‌بندی خاک	USCS	SP

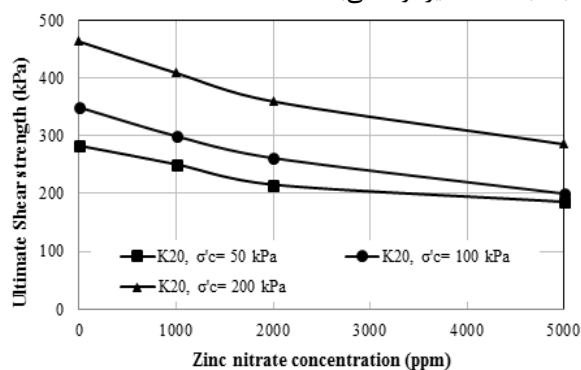
۳- آزمایش‌های انجام شده

با توجه به جدول (۴) تعداد ۷۲ آزمایش سه‌محوری تحکیم-یافته- زهکشی نشده بر روی مخلوط خاک ماسه‌ای با درصدهای مختلفی از کائولینیت، بنتونیت، زئولیت و خاکستر سیوس برنج در غلظت‌های مختلف نیترا روی انجام شده است. به‌منظور مختصرسازی در جدول (۳)، هر سطر نشان‌دهنده چهار آزمایش (حالت غیرآلوده و آلوده به نیترا روی در سه غلظت ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ ppm) در ترکیبی خاص می‌باشد. در معرفی نمونه‌های مورد نظر در این تحقیق از حروفی که در ادامه بیان می‌شوند،

جدول ۴- نام‌گذاری و تعداد آزمایش‌های سه‌محوری

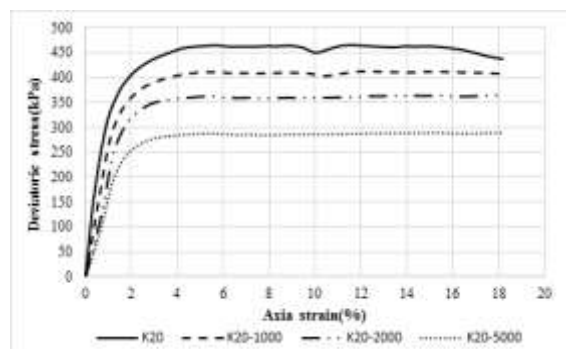
ردیف	نمونه	کائولینیت (%)		بنتونیت (%)		زئولیت (%)		خاکستر سبوس برنج (%)		غلظت (ppm)	
		۱۰	۲۰	۱۰	۲۰	۱۰	۲۰	۱۰	۲۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰
۱	K20-(0,1000,2000,5000)-50	x								x	x
۲	K20-(0,1000,2000,5000)-100	x								x	x
۳	K20-(0,1000,2000,5000)-200	x								x	x
۴	M20-(0,1000,2000,5000)-50			x						x	x
۵	M20-(0,1000,2000,5000)-100			x						x	x
۶	M20-(0,1000,2000,5000)-200			x						x	x
۷	K10-Z10-(0,1000,2000,5000)-50	x				x				x	x
۸	K10-Z10-(0,1000,2000,5000)-100	x				x				x	x
۹	K10-Z10-(0,1000,2000,5000)-200	x				x				x	x
۱۰	K10-R10-(0,1000,2000,5000)-50	x						x		x	x
۱۱	K10-R10-(0,1000,2000,5000)-100	x						x		x	x
۱۲	K10-R10-(0,1000,2000,5000)-200	x						x		x	x
۱۳	M10-Z10-(0,1000,2000,5000)-50			x	x					x	x
۱۴	M10-Z10-(0,1000,2000,5000)-100			x	x					x	x
۱۵	M10-Z10-(0,1000,2000,5000)-200			x	x					x	x
۱۶	M10-R10-(0,1000,2000,5000)-50			x				x		x	x
۱۷	M10-R10-(0,1000,2000,5000)-100			x				x		x	x
۱۸	M10-R10-(0,1000,2000,5000)-200			x				x		x	x

این امر معادل افزایش حداکثر ۳۰٪ درصدی در مقدار چسبندگی نسبت به حالت غیر آلوده می‌باشد.



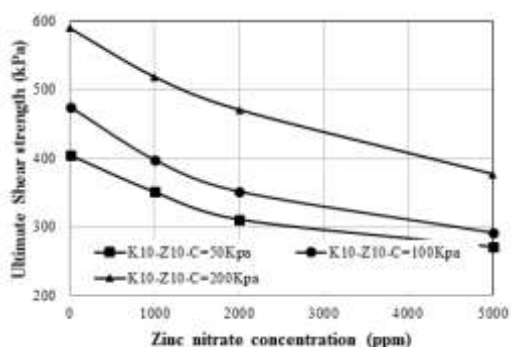
شکل ۲- تغییرات تنش نهایی برای ترکیب ماسه با ۲۰٪ کائولینیت در حالات مختلف آلوده با نیترات روی

لازم به ذکر می‌باشد که تغییرات زاویه اصطکاک داخلی برعکس چسبندگی بوده و با افزایش غلظت کاهش می‌یابد. روند تغییرات ایجاد شده در زاویه اصطکاک داخلی به مراتب کمتر از تغییرات چسبندگی است. افزایش غلظت آلاینده به ۱۰۰۰، ۲۰۰۰

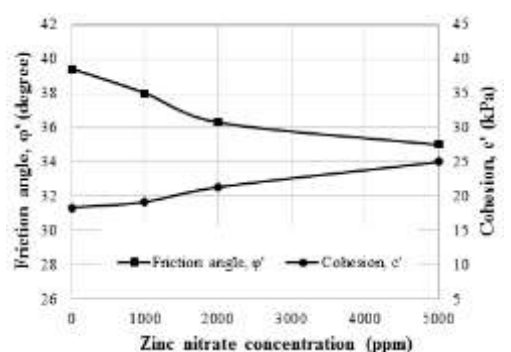


شکل ۱- تأثیر نیترات روی بر رفتار تنش- کرنش ماسه با ۲۰٪ کائولینیت در تنش همه‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال

تغییرات پارامترهای مقاومت برشی از جمله مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مؤثر برای نمونه‌های غیر آلوده و آلوده شده ماسه با ۲۰٪ کائولینیت در شکل (۳) نشان داده شده است. افزایش غلظت نیترات روی سبب افزایش چسبندگی شده است. به‌عنوان نمونه، افزایش غلظت نیترات روی تا ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ ppm سبب می‌شود که چسبندگی به ۲۰ و ۲۳ کیلوپاسکال افزایش یافته، که



شکل ۴- تغییرات تنش نهایی برای ترکیب ماسه با ۱۰٪ کائولینیت و ۱۰٪ زئولیت در حالات مختلف آلوده با نیترات روی

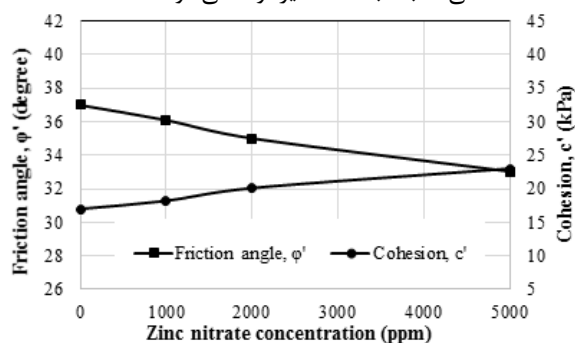


شکل ۵- تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در ترکیب ماسه با ۱۰٪ کائولینیت و ۱۰٪ زئولیت در حالت آلوده با نیترات روی

۴-۲- جایگزینی زئولیت با بنتونیت

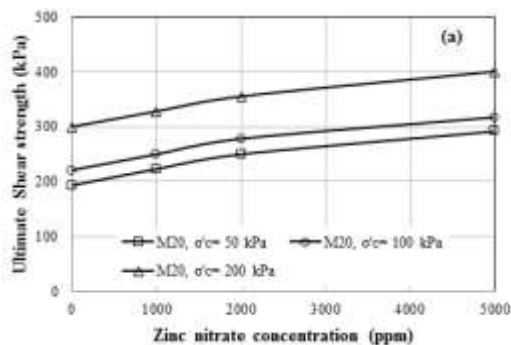
ظرفیت تبادل کاتیونی و جذب زیاد آلاینده‌های غیرآلی از ویژگی‌های بنتونیت است (Ling و همکاران، ۲۰۰۷). بر همین اساس در این تحقیق دو هدف برای استفاده از بنتونیت مدنظر می‌باشد. هدف اول بررسی تأثیر آلاینده فلز سنگین بر روی ریزدانه‌های رسی با قابلیت جذب بیشتر و هدف دوم، مقایسه تأثیر خاصیت خمیری رس بر رفتار آن در حالت آلوده با فلزات سنگین است. برای همین منظور در ابتدای این بخش رفتار ماسه با ۲۰٪ بنتونیت در دو حالت غیرآلوده و آلوده مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌طور کلی می‌توان گفت ورود فلزات سنگین به ترکیباتی که خاصیت خمیری بخش ریزدانه آن زیاد باشد، سبب افزایش مقاومت نهایی خاک می‌شود. از جمله دلایل تغییر در پارامترهای مقاومتی و تنش نهایی را می‌توان به شکل‌گیری ساختارهای متفاوت در کانی‌های تشکیل‌دهنده قسمت ریزدانه، در حالت آلوده‌شده با فلزات سنگین نسبت داد. شکل (۶) روند تغییر در مقاومت نهایی ماسه با ۲۰٪ بنتونیت را نشان می‌دهد. در تنش‌های همه‌جانبه مختلف، مقاومت نهایی با افزایش غلظت نیترات روی از

۵۰۰۰ ppm و باعث کاهش ۲٪، ۵٪ و ۱۳٪ درصدی در زاویه اصطکاک داخلی نسبت به حالت غیرآلوده می‌شود.

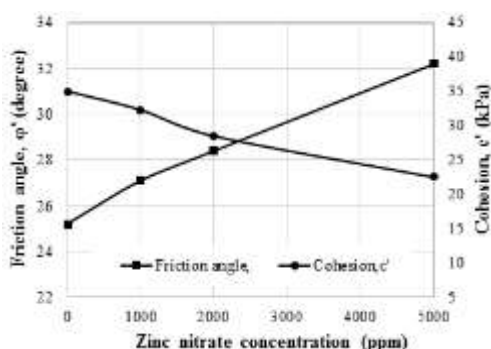


شکل ۳- تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در ترکیب ماسه با ۲۰٪ کائولینیت در دو حالت آلوده با نیترات روی و غیرآلوده

در شکل (۴) تغییرات مقاومت نهایی برای حالت جایگزینی ۱۰٪ کائولینیت با ۱۰٪ زئولیت در ترکیب ماسه کائولینیت‌دار در دو حالت آلوده و غیرآلوده نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که جایگزینی زئولیت با کائولینیت سبب افزایش مقاومت نهایی در هر دو حالت آلوده و غیرآلوده نسبت به خاک بدون جاذب شده است. بر همین اساس می‌توان گفت افزودن زئولیت علاوه بر افزایش ظرفیت جذب، سبب افزایش مقاومت نهایی نیز می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد به‌طور متوسط مقدار مقاومت در ترکیب خاک کائولینیت‌دار به‌همراه جاذب زئولیت در حدود ۵۰ درصد نسبت به مقاومت خاک کائولینیت‌دار بدون جاذب در هر دو حالت آلوده و غیرآلوده افزایش یافته است. این در حالی می‌باشد که در روند تغییر مقاومت نهایی در ترکیب جاذب‌دار نیز مشابه ماسه کائولینیت‌دار بوده و با ورود آلودگی با غلظت ۱۰۰۰ ppm به ترکیب خاک-جاذب، مقاومت نهایی در حدود ۱۸٪ درصد کاهش می‌یابد. همچنین افزایش غلظت به ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ ppm سبب کاهش ۲۸٪ و ۳۸٪ درصدی در مقاومت نهایی نسبت به حالت غیرآلوده شده است. تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای ترکیب ماسه به‌همراه کائولینیت و زئولیت در شکل (۵) نشان داده شده است. مطابق نتایج، در ترکیب کائولینیت‌دار به‌همراه جاذب زئولیت، چسبندگی افزایش و زاویه اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد. مقدار چسبندگی در حالت آلوده با غلظت‌های ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ ppm به ترتیب در حدود ۱۹/۱، ۲۲ و ۲۵ کیلوپاسکال بوده و این در حالی می‌باشد که زاویه اصطکاک داخلی نیز در غلظت‌های یاد شده به ترتیب به ۳۸، ۳۶ و ۳۴ درجه می‌رسند. روند نتایج نشان می‌دهد الگوی رفتاری برای هر دو ترکیب کائولینیت‌دار و زئولیت‌دار یکسان می‌باشد، که این امر به دلیل نوع خاصیت خمیری یکسان این دو خاک می‌باشد.



شکل ۶- تغییرات تنش نهایی برای ترکیب ماسه با ۲۰٪ بنتونیت در حالات مختلف آلوده با نیترات روی



شکل ۷- تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در ترکیب ماسه با ۲۰٪ بنتونیت در دو حالت آلوده با نیترات روی و غیرآلوده

مشابه قسمت قبل، در شکل (۸) تغییرات مقاومت نهایی در دو حالت آلوده و غیرآلوده با جایگزینی زئولیت با بنتونیت در ترکیب ماسه بنتونیت‌دار، نشان داده شده است. نتایج نشان‌دهنده افزایش مقاومت در حدود ۵۰ تا ۶۰٪ در حالت غیرآلوده در ترکیبات بنتونیت‌دار با جذب زئولیت نسبت به ترکیبات صرفاً بنتونیت‌دار می‌باشد. یکی از دلایل این امر تغییر نوع کانی در ترکیب می‌باشد، زیرا نیروی تشکیل‌دهنده در کانی‌های مونت مورونیومی که اساس تشکیل دهنده بنتونیت می‌باشند، از نوع ضعیف و واندروالسی بوده و این در حالی می‌باشد که در ترکیب زئولیت، پیوند قوی هیدروژنی اساس تشکیل و ارتباط بین کانی‌ها می‌باشد (Sunil و همکاران، ۲۰۰۹).

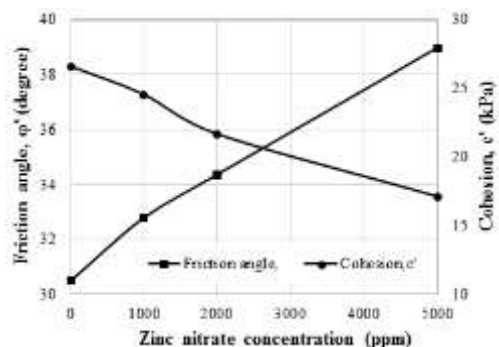
بر همین اساس مقاومت در حالت غیرآلوده در ترکیب حاوی بنتونیت و زئولیت بالاتر از ترکیب صرفاً بنتونیت‌دار می‌باشد. لازم به ذکر می‌باشد، با توجه به ظرفیت جذب مناسب زئولیت، ترکیب زئولیت و بنتونیت علاوه بر تأمین ترکیبی با خصوصیات زیست-محیطی مناسب، پارامترهای مقاومتی نیز مطلوب، لذا این ترکیب از هر دو جنبه زیست‌محیطی و ژئوتکنیکی مناسب می‌باشد. با توجه به این که خاصیت خمیری زئولیت و کائولینیت، تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشد، ورود آلودگی سبب کاهش مقاومت شده، در حالی

۰ به ۱۰۰۰ ppm، به طور متوسط در حدود ۱۱٪ درصد افزایش یافته و همچنین افزایش غلظت به ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ ppm نیز به- ترتیب باعث افزایش ۲۲٪ و ۴۰٪ درصدی در مقاومت نهایی، نسبت به حالات غیرآلوده شده است. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی برای نمونه‌های بنتونیت‌دار در دو حالت آلوده و غیرآلوده در شکل (۷) نشان داده شده است. با ورود آلاینده روی به غلظت ۱۰۰۰ ppm، چسبندگی در حدود ۱۴٪ کاهش می‌یابد. افزایش بیشتر غلظت نیترات روی باعث جذب بیشتر فلز سنگین و تغییرات بیشتر در ساختار کانی‌های تشکیل‌دهنده بنتونیت می-گردد، بنابراین مقدار چسبندگی بیشتر کاهش می‌یابد. اگرچه افزایش غلظت فلزات سنگین در ترکیبات بنتونیت‌دار باعث کاهش مقدار چسبندگی می‌گردد، ولیکن افزایش غلظت آلاینده نیترات روی با سبب تغییر ساختار قرارگیری ذرات از پراکنده به فلوکوله شده و همین امر باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی می‌گردد (Chu و همکاران، ۲۰۱۶).

افزایش غلظت نیترات روی به ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ ppm موجب می‌گردد که زاویه اصطکاک داخلی نسبت به حالت غیرآلوده در حدود ۱۵٪ و ۲۵٪ افزایش یابد. به منظور مقایسه نتایج به دست آمده با برخی از تحقیقات انجام شده، روند تغییر پارامترهای خاک آلوده در مطالعات Taheri و همکاران مورد بررسی قرار می‌گیرد. در تحقیقات Taheri و همکاران تأثیر حضور هم‌زمان آلاینده نیترات سرب و گازوئیل بر روی پارامترهایی از قبیل نفوذپذیری، حدود روانی و پارامترهای مقاومت برشی براساس نتایج آزمایش برش مستقیم بررسی شد. نتایج نشان می‌داد در افزایش غلظت فلز سنگین باعث کاهش چسبندگی می‌گردد و همچنین تغییرات زاویه اصطکاک داخلی برای ماسه بنتونیت‌دار آلوده نیز در ابتدا افزایش یافته است. نتایج به دست آمده منطبق با نتایج حاصل از این تحقیق می‌باشد (Taheri و همکاران، ۲۰۱۸).

همچنین همان‌طور که پیشتر بیان گردید، در تحقیقات Chu و همکاران (۲۰۱۷) تأثیر فلزات سنگینی از قبیل سرب، روی و کادمیم بر روی پارامترهای مقاومت برشی خاک در مناطق صنعتی چین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان دهنده از افزایش زاویه اصطکاک داخلی با افزایش میزان آلاینده می‌باشد، که این امر منطبق با نتایج تحلیل حاضر می‌باشد.

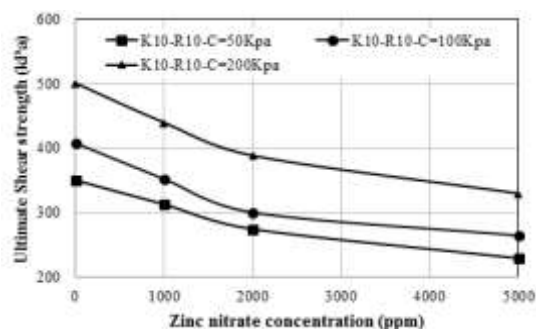
در تحقیقات Karkush و همکاران (۲۰۱۳) اثر انواع آلاینده-های آلی و غیرآلی بر روی خاک‌های رسی با خصوصیات خمیری کم و زیاد با توجه به آزمایش سه‌محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده بررسی شده است. نتایج نشان می‌داد مقاومت برشی خاک کائولینیت‌دار تحت آلودگی فلز سنگین نسبت به خاک غیرآلوده کاهش یافته است. این نتیجه همسو با نتایج به دست آمده در این تحقیق می‌باشد.



شکل ۹- تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در ترکیب ماسه با ۱۰٪ بنتونیت و ۱۰٪ زئولیت در حالت آلوده با نیترات روی

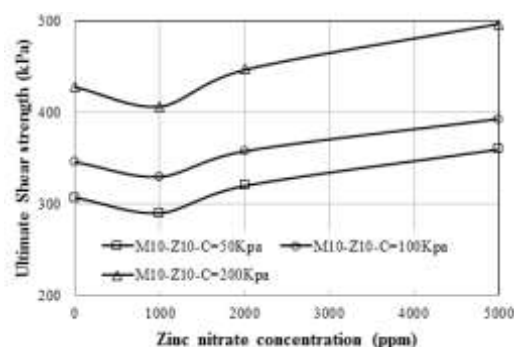
۴-۳- جایگزینی سبوس برنج با کائولینیت و بنتونیت

یکی دیگر از جاذب‌های مورد بررسی خاکستر سبوس برنج می‌باشد. مشابه قسمت قبل در ترکیب حاوی ۲۰٪ کائولینیت و یا ۲۰٪ بنتونیت، ۱۰٪ درصد از هر دو نوع ریزدانه کائولینیتی و بنتونیتی کاسته شده و معادل آن خاکستر سبوس برنج به خاک اضافه می‌گردد. با افزودن خاکستر سبوس برنج به ترکیب ماسه با کائولینیت‌دار، مقاومت نهایی در خاک غیرآلوده نسبت به ترکیب ماسه کائولینیت‌دار با جاذب زئولیت کاهش یافته است. همچنین با توجه به پایداری بیشتر سبوس برنج نسبت به کائولینیت، مقاومت در ترکیب کائولینیت-سبوس برنج نسبت به ترکیب ماسه با ۲۰٪ کائولینیت در حدود ۲۰ تا ۳۰٪ افزایش یافته است. مطابق نتایج به‌دست آمده از شکل (۱۰)، در ترکیب کائولینیت و سبوس برنج، مقاومت نهایی با ورود آلودگی کاهش می‌یابد. به‌طوری که، مقاومت نهایی در غلظت ۱۰۰۰ ppm نسبت به ترکیب غیرآلوده در حدود ۱۲٪ کاهش یافته است. همچنین افزایش بیشتر غلظت نیترات روی به ۲۰۰۰ ppm و ۵۰۰۰ ppm نیز سبب کاهش بیشتر مقاومت نهایی تا محدوده ۱۷٪ و ۲۱٪ درصد نسبت به حالت غیرآلوده شده است.



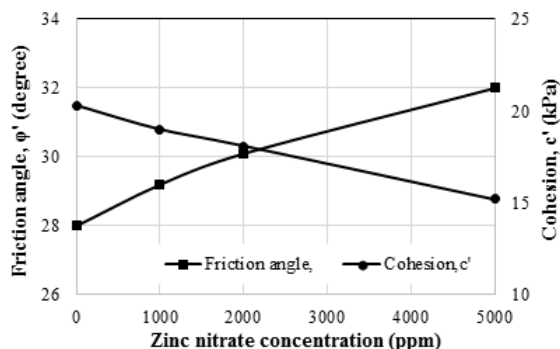
شکل ۱۰- تغییرات تنش نهایی برای ترکیب ماسه با ۱۰٪ کائولینیت و ۱۰٪ خاکستر سبوس برنج در حالات مختلف آلوده با نیترات روی

که ورود آلودگی فلزات سنگین به بنتونیت سبب افزایش مقاومت نهایی شده است. بنابراین ورود آلودگی به ترکیب زئولیت-بنتونیت، سبب ایجاد دو اثر متقابل مقاومتی در زئولیت و بنتونیت می‌گردد. در غلظت‌های کم (تا ۱۰۰۰ ppm) جایگزینی زئولیت با بنتونیت، سبب کاهش تقریباً ۷ تا ۱۰٪ درصدی در مقاومت نهایی شده است.



شکل ۸- تغییرات تنش نهایی برای ترکیب ماسه با ۱۰٪ بنتونیت و ۱۰٪ زئولیت در حالات مختلف آلوده با نیترات روی

با افزایش غلظت آلاینده میزان جذب فلزات سنگین در هر دو نوع ریزدانه زئولیتی و بنتونیتی افزایش یافته و با توجه به این که تأثیر افزایش مقاومت بنتونیت با افزایش غلظت تأثیر بیشتری نسبت به کاهش مقاومت در زئولیت آلوده دارد، لذا روند کلی با توجه به رفتار بنتونیت تعیین شده و مقاومت در ترکیب زئولیت-بنتونیت، افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد مقاومت نهایی در حالت آلوده با ۲۰۰۰ ppm نیترات روی در حدود ۸٪ درصد نسبت به حالت غیرآلوده افزایش یافته است. مطابق نتایج به‌دست آمده، با افزایش غلظت نیترات روی به ۵۰۰۰ ppm، مقاومت نهایی در حدود ۱۵ تا ۱۷٪ درصد نسبت به حالت غیرآلوده افزایش می‌یابد. تغییرات روند چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای ترکیب بنتونیت‌دار به‌همراه جاذب زئولیت در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با ورود آلودگی به ترکیب چسبندگی روند کاهشی و زاویه اصطکاک داخلی روند افزایشی داشته است. به‌طور مثال، با افزایش غلظت آلاینده از ۱۰۰۰ به ۲۰۰۰ ppm مقدار چسبندگی در حدود ۱۵٪ درصد کاهش و این در حالی می‌باشد که زاویه اصطکاک داخلی نیز از ۳۲ به ۳۴/۷ درجه افزایش یافته است. با افزایش غلظت بیشتر نیترات روی به ۵۰۰۰ ppm در ترکیب بنتونیت- زئولیت، چسبندگی به ۱۷ کیلوپاسکال کاهش، و زاویه اصطکاک داخلی به ۳۹ درجه افزایش یافته است.

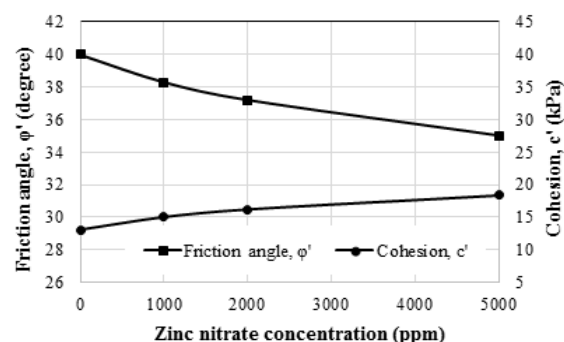


شکل ۱۳- تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در ترکیب ماسه با ۱۰٪ بنتونیت و ۱۰٪ سیوس برنج در حالت آلوده با نیترات روی

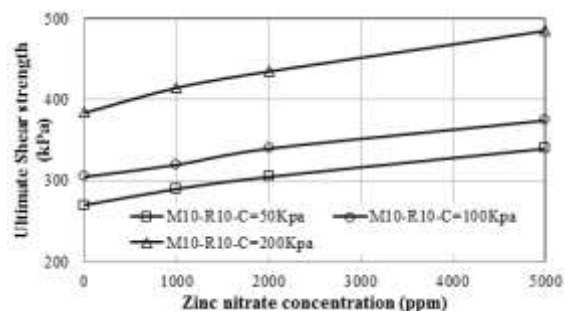
۴-۴- تعیین ظرفیت جذب در ترکیبات مختلف خاک و جاذب

اساس روش تعیین غلظت جذب شده در این تحقیق به این صورت می‌باشد که ابتدا ترکیبات مختلف شامل ریزدانه‌های رسی و یا ترکیب ریزدانه رسی با جاذب زئولیت و یا خاکستر سیوس برنج مطابق درصدهای اشاره شده، آماده گردیده است. لازم به ذکر می‌باشد با توجه به این که در بخش دانه‌ای ترکیبات (ماسه) جذب چندانی وجود ندارد (Chai و همکاران، ۲۰۲۱)، لذا جذب فلز سنگین جذب صرفاً در بخش ریزدانه و جاذب صورت گرفته است. تعیین ظرفیت جذب در ترکیبات مختلف با استفاده از دستگاه جذب اتمی انجام می‌گردد. برای این منظور غلظت‌های مورد نظر (۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ ppm) به نمونه‌ها (شامل بخش ریزدانه رسی و یا ترکیب ریزدانه رسی با جاذب) وارد شده و پس از به تعادل رسیدن مخلوط خاک و آلاینده و جذب حداکثری آلاینده به وسیله خاک یا جاذب، مقدار آلاینده باقی‌مانده و جذب نشده به وسیله دستگاه جذب اتمی تعیین می‌گردد. از تفاضل غلظت ورودی با غلظت جذب نشده، مقدار غلظت جذب شده در ترکیبات مختلف به دست می‌آید. روش ساخت نمونه‌ها برای آزمایش جذب و تعیین غلظت جذب شده به این ترتیب می‌باشد که ابتدا مقدار معینی از ترکیب مورد نظر را در ظرف تهیه کرده (معمولاً در حدود ۱۰ گرم) و پس از آن محلول آلوده با غلظت مورد نظر را به میزان ۵ تا ۱۰ برابر وزن خاک به ظرف اضافه کرده و پس از ترکیب و جذب حداکثری در نمونه غلظت باقی‌مانده با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری می‌گردد. در شکل (۱۴) تغییرات غلظت جذب شده در هر یک از غلظت‌های ورودی اولیه برای ترکیبات مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد کمترین میزان جذب فلز سنگین روی برای ترکیب ماسه با ۲۰٪ کائولینیت می‌باشد. مطابق نتایج مقدار غلظت جذب شده در این ترکیب برای حالاتی که غلظت نیترات روی به ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و

مطابق شکل (۱۱)، تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در ترکیب کائولینیت‌دار به همراه خاکستر سیوس برنج مشابه ترکیب کائولینیت‌دار بوده و این امر نشان‌دهنده همسو بودن روند تغییرات ایجاد شده در سیوس برنج آلوده با کائولینیت می‌باشد، ولیکن با توجه به پایداری نسبی بیشتر سیوس برنج نسبت به کائولینیت، زاویه اصطکاک داخلی با شدت کمتری نسبت به ترکیب ماسه با ۲۰٪ کائولینیت کاهش می‌یابد. مطابق نتایج حاصله در حالت آلوده با ۵۰۰۰ ppm نیترات روی، زاویه اصطکاک داخلی در ترکیب کائولینیت و سیوس برنج در حدود ۱۲٪ نسبت به حالت غیرآلوده کاهش یافته است. تغییرات مقاومت نهایی برای ترکیب بنتونیت با ۱۰٪ خاکستر سیوس برنج نیز در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، با افزایش غلظت نیترات روی، مقاومت نهایی افزایش می‌یابد. تغییرات پارامترهای مقاومتی نیز در شکل (۱۳) نشان داده شده است. براساس نتایج حاصله روند تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در ترکیب حاوی بنتونیت- سیوس برنج تقریباً مشابه ترکیب بنتونیت‌دار می‌باشد، با این تفاوت که روند افزایشی در زاویه اصطکاک داخلی و روند کاهشی در چسبندگی زهکشی شده با شدت کمتری نسبت به ترکیب ماسه با ۲۰٪ بنتونیت به وجود می‌آید.



شکل ۱۱- تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در ترکیب ماسه با ۱۰٪ کائولینیت و ۱۰٪ سیوس برنج در حالت آلوده با نیترات روی



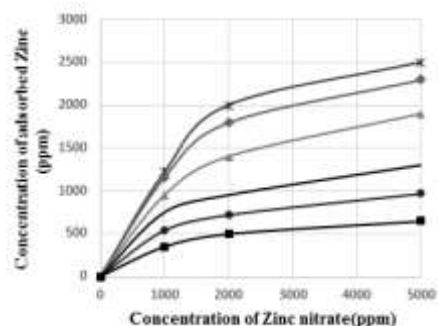
شکل ۱۲- تغییرات تنش نهایی برای ترکیب ماسه با ۱۰٪ بنتونیت و ۱۰٪ خاکستر سیوس برنج در حالات مختلف آلوده با نیترات روی

سنگین با H^+ ، انجام شده و همین امر سبب تضعیف پیوند هیدروژنی می‌گردد. با تخریب پیوند هیدروژنی و افزایش بارهای مثبت، صفحات رسی از یکدیگر فاصله گرفته و تشکیل ساختار پراکنده را می‌دهند. بنابراین می‌توان گفت که افزایش آلودگی در کائولینیت و یا ریزدانه‌هایی با خاصیت خمیری کم، باعث کاهش ساختار فلوکوله‌ای می‌شود (Sheela و Nayaka، ۲۰۱۲).

به‌طور خلاصه ساختار کائولن در حالت غیرآلوده فلوکوله‌ای می‌باشد و با افزودن نیترات روی و ورود فلز سنگین به خاک، صفحات به حالت موازی با یکدیگر تمایل پیدا کرده و ساختار خاک از فلوکوله‌ای به سمت پراکنده سوق پیدا می‌کند. با توجه به کاهش مقاومت ذرات با تغییر از حالت فلوکوله‌ای به پراکنده، ورود آلودگی فلزات سنگین سبب کاهش مقاومت ریزدانه‌هایی با خاصیت خمیری کم می‌شود. در ریزدانه‌های رسی آلوده با خاصیت خمیری زیاد، تبادل کاتیونی بین Zn^{2+} و یون‌های آزاد سدیم (Na^+) انجام و ضخامت آب لایه مضاعف کاهش می‌یابد. کاهش ضخامت آب لایه مضاعف در بنتونیت آلوده شده سبب کاهش ساختار پراکنده در خاک و افزایش ساختار فلوکوله‌ای شده است، بنابراین مقاومت نهایی افزایش می‌یابد (Arasan و Yetimoğlu، ۲۰۰۸).

جذب فلزات سنگین در ژئولیت‌ها را می‌توان ناشی از دو عامل دانست. عامل اول هندسه و ساختار منافذ ژئولیت بوده و عامل دوم کاتیون‌های آزاد قرار گرفته در داخل این منافذ می‌باشد. جذب برخی از فلزات سنگین بیشتر وابسته به هندسه حفرات ژئولیت، کاتیون‌های قرار گرفته در داخل منافذ و چگونگی اتصال بین آن‌ها می‌باشد. از طرفی، جذب برخی از فلزات سنگین مانند Pb^{2+} و Zn^{2+} بیشتر وابسته به قابلیت تبادل کاتیون‌های سطحی در ژئولیت می‌باشد. با ورود فلزات سنگین و جایگزینی آن‌ها با کاتیون‌های تک‌ظرفیتی، توازن بارهای الکتریکی در ژئولیت بر هم خورده، و با توجه به تغییر به وجود آمده در اثر تبادل کاتیونی و افزایش بارهای مثبت، نیروی دافعه بین روی جذب شده در ژئولیت باعث افزایش فاصله بین کانی‌های تشکیل دهنده آن می‌گردد. با افزایش نیروی دافعه ساختار ژئولیت از حالت فلوکوله‌ای به حالت پراکنده تغییر می‌یابد، که مشابه کائولینیت، این امر موجب کاهش مقاومت ترکیبات ژئولیت‌دار شده است (شکل ۱۵)). اگرچه با توجه به شعاع اتمی بزرگ‌تر روی نسبت به کاتیون‌های آزاد، جانشینی روی به جای کاتیون‌های آزاد درون حفرات ژئولیت مانند سدیم می‌تواند باعث تغییر سایز حفرات شود، ولیکن با توجه به پایداری نسبی ژئولیت، تغییر پارامترهای مقاومتی به‌واسطه تغییر قطر کانال‌های ژئولیت عامل اصلی در تغییر رفتار ژئولیت نمی‌باشد (Vejmelková و همکاران، ۲۰۱۵)، لذا افزایش نیروی دافعه در کانی‌های تشکیل دهنده ژئولیت که به دلیل جذب روی دو ظرفیتی به وجود می‌آید، عاملی تأثیرگذارتر می‌باشد.

۵۰۰۰ ppm باشد، مقدار غلظت جذب شده در ترکیب به ترتیب عبارت است از ۳۵۰، ۵۰۰ و ۶۵۰ ppm می‌باشد. لازم به ذکر است افزایش غلظت اولیه موجب رسوب بخشی از آن در ترکیب‌های مورد نظر شده است و به همین امر مقدار آلاینده جذب شده افزایش می‌یابد. با تغییر نوع کانی رسی از کائولینیت به بنتونیت، مقدار ظرفیت جذب ترکیب افزایش قابل توجهی یافته است و به‌طور کلی نتایج نشان‌دهنده افزایش متوسط ۲/۸ برابری در جذب فلز سنگین روی در ترکیب ماسه با ۲۰٪ بنتونیت نسبت به ترکیب ماسه کائولینیت‌دار می‌باشد. با کاهش درصد کائولینیت و جایگزینی جاذب به آن ظرفیت جذب افزایش یافته است. به‌عنوان نمونه در حالت آلوده با ۵۰۰۰ ppm نیترات روی، مقدار فلز سنگین جذب شده در ترکیب ماسه با ۱۰٪ کائولینیت و ۱۰٪ ژئولیت در حدود ۹۰٪ درصد بیشتر از ترکیب ماسه با ۲۰٪ کائولینیت و همچنین مقدار فلز سنگین جذب شده در ترکیب ماسه- کائولینیت- خاکستر سبوس برنج نیز ۵۶٪ درصد از ترکیب خاک پایه (ماسه با ۲۰٪ کائولینیت) بیشتر می‌باشد. مقایسه مقدار فلز سنگین جذب شده در غلظت‌های مختلف در دو ترکیب ماسه با ۲۰٪ بنتونیت و ترکیب ماسه با ۱۰٪ بنتونیت و ۱۰٪ جاذب ژئولیت، نشان‌دهنده نزدیکی ظرفیت جذب این دو ترکیب به یکدیگر می‌باشد. این در حالی می‌باشد که ظرفیت جذب در ترکیب ماسه با ۱۰٪ بنتونیت و ۱۰٪ خاکستر سبوس برنج در حدود ۲۳٪ درصد کمتر از ترکیب ماسه با ۲۰٪ بنتونیت می‌باشد.



شکل ۱۴- تغییرات غلظت روی جذب شده در ترکیبات مختلف خاک و جاذب

۴-۵- تأثیر فلزات سنگین بر روی پیوند ریزدانه‌ها با خاصیت خمیری مختلف

پیوند هیدروژنی بین کانی‌های رسی با خاصیت خمیری کم عامل اصلی ایجاد ساختار فلوکوله‌ای بوده و این در حالی است که پیوند ضعیف واندروالسی عامل ایجاد ساختار پراکنده در ریزدانه‌های رسی با خاصیت خمیری زیاد است. جذب نیترات روی در ترکیبات حاوی کائولینیت، از طریق جایگزینی کاتیون آزاد فلز

۵- نتیجه‌گیری

ورود آلاینده‌های فلزات سنگین علاوه بر اثرات مخرب زیست‌محیطی، بر روی پارامترهای مقاومتی و رفتاری خاک‌ها نیز تأثیر می‌گذارد. استفاده از جاذب‌های فلزات سنگین، به‌منظور جلوگیری از گسترش و انتقال آلاینده‌های فلزات سنگین در آب زیرزمینی و همچنین خاک، یکی از روش‌های متداول و اقتصادی در سال‌های اخیر می‌باشد. در همین راستا در این تحقیق به بررسی اثر جاذب‌های ژئولیت و خاکستر سبوس برنج پرداخته شده است. لازم به‌ذکر می‌باشد ترکیب خاک پایه ماسه با ۲۰٪ کائولینیت و همچنین ماسه با ۲۰٪ بنتونیت بوده و پس از تعیین عملکرد این دو نوع کانی رسی در حالات آلوده و غیرآلوده، مقادیر ۱۰٪ از بخش ریزدانه کاسته شده و معادل آن ۱۰٪ از جاذب‌های ژئولیت و یا خاکستر سبوس برنج افزوده شده است. برخی از مهم‌ترین نتایج حاصل شده در این تحقیق، براساس آزمایش‌های سه محوری، به‌شرح زیر می‌باشد:

۱) در حالت غیرآلوده مقاومت نهایی در ترکیب‌های کائولینیت-سبوس برنج در حدود ۱۵٪ نسبت به ترکیب بنتونیت-سبوس برنج بیشتر می‌باشد. این در حالی است که با افزایش غلظت نیترات روی، مقدار مقاومت نهایی در ترکیب بنتونیت-سبوس برنج افزایشی و در ترکیب کائولینیت-سبوس برنج کاهش می‌باشد.

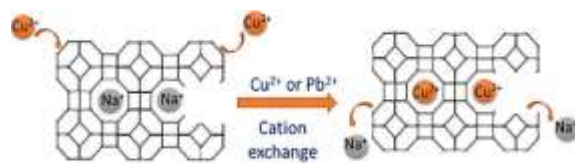
۲) مقاومت ترکیب بنتونیت به‌همراه جاذب ژئولیت از ترکیب کائولینیت-ژئولیت بیشتر بوده و با توجه به ظرفیت جذب بیشتر ترکیب بنتونیت-ژئولیت، اثر زیست‌محیطی آن نیز قوی‌تر می‌باشد.

۳) در ریزدانه‌هایی با خاصیت خمیری کم، با افزودن نیترات روی و ورود فلز سنگین به خاک، ذرات خاک از ساختار فلوکوله‌ای به‌سمت ساختار پراکنده تمایل پیدا کرده و همین امر سبب کاهش مقاومت نهایی در حالت آلوده در ترکیبات حاوی ریزدانه رسی با خاصیت خمیری کم می‌شود.

۴) کاهش ضخامت آب لایه مضاعف در بنتونیت آلوده شده سبب کاهش ساختار پراکنده در خاک و افزایش ساختار فلوکوله‌ای شده است، بنابراین مقاومت نهایی افزایش می‌یابد.

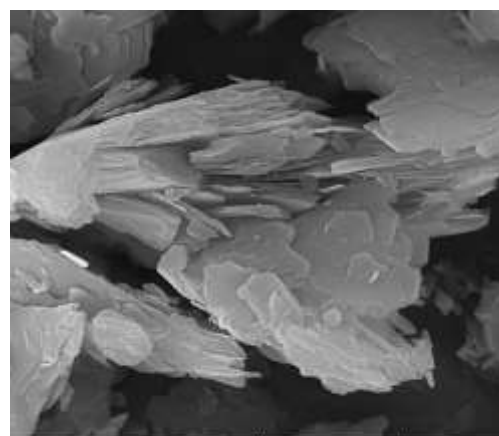
۵) جایگزینی ژئولیت با کائولینیت و یا بنتونیت سبب افزایش مقاومت نهایی شده است. نتایج در هر دو حالت آلوده و غیرآلوده نشان می‌دهد، مقاومت در ترکیب خاک (کائولینیت‌دار و یا بنتونیت‌دار) به‌همراه جاذب ژئولیت در حدود ۵۰٪ درصد نسبت به مقاومت خاک پایه بدون جاذب در هر دو حالت آلوده و غیرآلوده افزایش یافته است.

۶) با افزودن خاکستر سبوس برنج به ترکیب ماسه و ۱۰٪ کائولینیت، مقاومت نهایی در خاک غیرآلوده نسبت به ترکیب

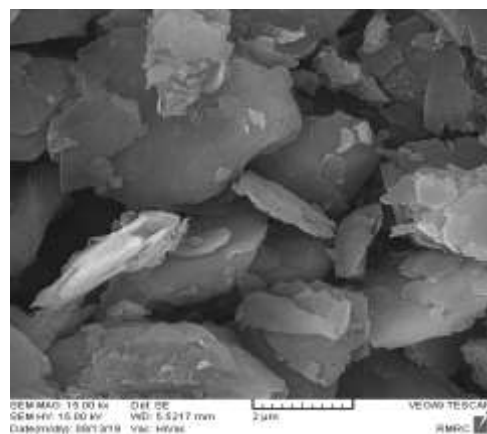


شکل ۱۵- چگونگی فرآیند جذب فلزات سنگین در جاذب ژئولیت (Vejmelková و همکاران، ۲۰۱۵)

به‌طور کلی می‌توان گفت در خاک‌های ریزدانه با خاصیت خمیری کم (مانند کائولینیت، ژئولیت و خاکستر سبوس برنج) ورود آلاینده فلزات سنگین سبب تغییر ساختار فلوکوله‌ای به ساختار پراکنده می‌شود. این در حالی می‌باشد که در خاک‌های ریزدانه با خاصیت خمیری زیاد (مانند بنتونیت) آلودگی فلزات سنگین سبب تغییر ساختار خاک ریزدانه از حالت پراکنده به فلوکوله شده است. در شکل (۱۶) تغییرات ساختاری برای ریزدانه‌ها با خاصیت خمیری مختلف در حالت آلوده با نیترات روی نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۶- تغییرات ساختاری: (الف) ریزدانه‌ها با خاصیت خمیری کم، (ب) ریزدانه‌ها با خاصیت خمیری زیاد در حالت آلوده با نیترات روی

- Bentonite and Vermiculite: Examination of Process Parameters, Kinetics and Isotherms, *Journal of Hazard. Mater*, 2013, 252-253, 428-461.
- Muththalib BA, "Baudet Effect of heavy metal contamination on the plasticity of kaolin-bentonite clay mixtures and an illite-smectite rich natural clay", In *E3S Web of Conferences*, 2019, 92, 10005.
- Nikkhah Nasab S, Hamed Abdeh K, "Physicochemical changes of lead (II) contaminated sand-clay mixture", *SN Applied Sciences* 2, 2020, 9, 1-15.
- Pan, Yize, Joseph Rossabi, Chonggen Pan, Xinyu Xie. "Stabilization/solidification characteristics of organic clay contaminated by lead when using cement", *Journal of hazardous materials*, 2019, 362, 132-139.
- Patel AV, "A study on Geotechnical properties of heavy metal contaminated soil", *Indian J Res*, 2014, 3 (6), 62-63.
- Sheela T, Arthoba Nayaka Y, "Kinetics and thermodynamics of cadmium and lead ions adsorption on NiO nanoparticles", *Chemical Engineering Journal*, 2012, 191, 123-131.
- Singh Bal Ram, Leonard Oste. "In situ immobilization of metals in contaminated or naturally metal-rich soils", *Environmental Reviews* 9, 2001, 2, 81-97.
- Sunil BM, Shrihari S, Sitaram Nayak. "Shear strength characteristics and chemical characteristics of leachate-contaminated lateritic soil", *Engineering Geology* 106, 2009, 1-2, 20-25.
- Taheri S, Ebadi T, Maknoon R, Amiri M, "Microstructural assessment of the simultaneous impact of hydrocarbon material and heavy metal on sand-bentonite mixture behavior", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2018, 48.1 (90), 35-42 (In persian).
- Taheri S, Ebadi T, Maknoon R, Amiri M, "Predicting variations in the permeability and strength parameters of a sand-bentonite mixture (SBM) contaminated simultaneously with lead (II) and diesel", *Applied Clay Science*, 2018, 157, 102-110.
- Vejmelková, Eva, Dana Koňáková, Tereza Kulovana, Martin Keppert, Jaromír Žumár, Pavla Rovnanikova, Zbyněk Keršner, Martin Sedlmajer, and Robert Černý, "Engineering properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious material: Strength, toughness, durability, and hygrothermal performance", *Cement and Concrete Composites*, 2015, 55, 259-267.
- Zang J, Wang W, Wang Z, Zheng L, Xie X, "Field test on electro-osmosis in a heavy metal contaminated soil: electrokinetic remediation and reinforcement of the soil", *Int. Journal of Electrochem. Sci*, 2020, 54, 1230-1241.
- Zang J, Wang W, Wang Z, Zheng L, Xie X, "Field test on electro-osmosis in a heavy metal contaminated soil: electrokinetic remediation and reinforcement of the soil", *Int. Journal of Electrochem. Sci*, 2020, 54, 1230-1241.
- Zhang TT, Xu J, Wang YM, Xue CH, "Health benefits of dietary marine DHA/EPA-enriched glycerophospholipids", *Progress in lipid research*, 2019, 75, 100997.
- کائولینیت و زئولیت کاهش یافته است و این در حالی می‌باشد که با توجه به پایداری بیشتر سیوس برنج نسبت به کائولینیت، مقاومت در ترکیب کائولینیت-سیوس برنج نسبت به ترکیب ماسه با ۲۰٪ کائولینیت در حدود ۲۰ تا ۳۰٪ افزایش یافته است.
- ### ۶- مراجع
- Arasan S, Yetimoğlu T, "Effect of inorganic salt solutions on the consistency limits of two clays", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 2008, 32 (2), 107-115.
- Chai WS, Cheun JY, Kumar PS, Mubashir M, Majeed Z, Banat F, Show PL, "A review on conventional and novel materials towards heavy metal adsorption in wastewater treatment application", *Journal of Cleaner Production*, 2021, 296, 126589.
- Chen, Ruifeng, Surya Sarat Chandra Congress, Guojun Cai, Wei Duan, and Songyu Liu, "Sustainable utilization of biomass waste-rice husk ash as a new solidified material of soil in geotechnical engineering: A review", *Construction and Building Materials*, 2021, 292, 123219.
- Chiu, Abraham CF, Akeseh R, Ibrahim M, Moumouni, Xiao Y, "Laboratory assessment of rice husk ash (RHA) in the solidification/stabilization of heavy metal contaminated slurry", *Journal of hazardous materials*, 2019, 371, 62-71.
- Chu Y, Liu S, Wang F, Cai G, Bian H, "Estimation of heavy metal-contaminated soils' mechanical characteristics using electrical resistivity", *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24 (15), 13561-13575.
- Chu, Ya, Song-yu Liu, Guo-jun Cai, and Han-liang Bian, "A study in the micro-characteristic and electricity properties of silt clay contaminated by heavy metal zinc", *Japanese Geotechnical Society Special Publication* 2, 2016, 14, 556-559.
- Hassanlourad M, Hossein-Zade Naeini MS, "Effect of Lead Nitrate on Behavior and Shear Strength Parameters of sandy clay", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 2019. doi:10.22060/ceej.16146.6142.
- Karkush MO, Zaboon AT, Hussien HM, "Studying the effects of contamination on the geotechnical properties of clayey soil", *Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics*, Taylor and Francis Group, London, 2013, 599-607.
- Khodaparast M, Haji H, "Effect of oil- contamination on shear strength parameters of grain soils with emphasis on the effect of dimensions of direct shear test box", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 50.1 (98), 107-118 (In persian).
- Li JS, Xue Q, Wang P, Li ZZ, "Effect of lead (II) on the mechanical behavior and microstructure development of a Chinese clay", *Applied Clay Science*, 2015, 105 192-199.
- Ling, Wanting, Qing Shen, Yanzheng Gao, Xiaohong Gu, and Zhipeng Yang, "Use of bentonite to control the release of copper from contaminated soils", *Soil Research* 45, 2007, 8, 618-623.
- Malamis S, Katsou E, "A review on zinc and nickel adsorption on natural and modified zeolite",

Zhang Y, Zheng Y, Han S, Wan SD, Yang H, Duan M, "Experimental study on deformation of heavy metal contaminated expansive soil under cyclic loading", In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 237 (2), 022026.

Zheng Renji, Xuezhen Feng, Wensong Zou, Ranhao Wang, Dazhong Yang, Wenfei Wei, Shangying Li, and Hong Chen. "Converting loess into zeolite for heavy metal polluted soil remediation based on "soil for soil-remediation strategy", Journal of Hazardous Materials, 2021, 412, 125199.