

# قابلیت‌های ویژه نانورس‌ها به منظور استفاده در پروژه‌های ژئوتکنیک زیست محیطی برای جذب آلاینده‌های فلز سنگین

وحید رضا اوحدی\*<sup>۱</sup>، محمد امیری<sup>۲</sup> و امیر رضا گودرزی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استاد گروه عمران، دانشگاه بوعلی سینا

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری عمران، دانشگاه بوعلی سینا

<sup>۳</sup> استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۶/۰۹، تاریخ دریافت اصلاح شده: ۱۳۹۰/۰۷/۲۷، تاریخ تصویب: ۱۳۹۰/۱۰/۲۴)

## چکیده

علی‌رغم تحقیقات وسیعی که در سال‌های اخیر در موضوع اندرکنش خاک و آلودگی صورت گرفته‌است در زمینه افزایش قابلیت نگهداری آلودگی توسط نانورس‌ها تحقیقات قابل توجهی انجام نشده‌است. همچنین ارزیابی تحقیقات گذشته بیانگر آن است که در پژوهش‌های انجام شده تاکنون، به قابلیت‌های ویژه نانورس‌ها در جذب و نگهداری آلاینده‌های فلزی توجه کاملی معطوف نشده‌است. بر این اساس هدف این پژوهش اثبات ویژگی خاص نانورس‌ها در جذب و نگهداری آلاینده‌های فلز سنگین است. در این راستا با انجام یک سری آزمایش‌های ژئوتکنیک زیست محیطی، رفتار ژئوتکنیک زیست محیطی چند نمونه نانورس و نیز فرآیند اندرکنش نانورس-آلاینده فلز سنگین مورد مطالعه قرار گرفته‌است. به منظور مطالعه و مقایسه رفتار ژئوتکنیک زیست محیطی نانورس با بنتونیت و اثبات قابلیت خاص نانورس‌ها در جذب و نگهداری آلاینده‌های فلز سنگین، درصدهای مختلف کربنات به نمونه‌های نانورس مورد مطالعه اضافه شد. با انجام یک سری آزمایش‌های ژئوتکنیک زیست محیطی شامل آزمایش‌های قابلیت جذب و نگهداری آلودگی بر نمونه‌های نانورس، قبل و بعد از اضافه نمودن کربنات، نشان داده شده‌است که قابلیت جذب بیشتر در نمونه بنتونیت در مقایسه با نمونه‌های نانورس صرفاً به‌واسطه درصد قابل توجه کربنات (۸٪) در این نمونه است. به‌طوری‌که نمونه‌های نانورس غنی شده با این میزان کربنات از قابلیت جذب بیشتری نسبت به نمونه بنتونیت برخوردارند. در این مقاله همچنین فرآیند اندرکنش آلاینده و نانورس به کمک انجام آزمایش‌های اشعه ایکس مطالعه شده‌است. اگرچه نتایج آزمایش‌های ظرفیت بافرینگ و میزان نگهداری فلز سنگین سرب به وسیله نانو ذرات اصلاح شده در حضور کربنات نشان می‌دهد که در مقایسه تأثیر سطح مخصوص خاک و درصد کربنات نمونه، بخش قابل توجهی از ظرفیت بافرینگ و قابلیت خاک در نگهداری آلاینده، ناشی از حضور کربنات است، لیکن بیشتر بودن ظرفیت بافرینگ نانورس‌های غنی شده در مقایسه با بنتونیت، بیانگر کارایی نمونه‌های نانورس در جذب و نگهداری آلاینده‌های فلز سنگین است که این موضوع به سطح مخصوص بسیار بزرگ نمونه‌های نانورس نسبت داده شده‌است. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که در نمونه‌های بنتونیت، کائولینیت و چهار نانورس کلوزایت، ترتیب قابلیت نگهداری آلودگی نمونه‌های بنتونیت، کائولینیت و نانورس‌های فاقد کربنات به‌صورت ذیل بوده است:

Bentonite > Cloisite®Na<sup>+</sup> > Kaolinite > Cloisite®30B > Cloisite®20A > Cloisite®15A

این در حالی است که با افزایش درصد کربنات، ترتیب قابلیت نگهداری آلاینده توسط نمونه‌های رسی فوق تغییر می‌کند. به‌نحوی که هنگامی که نمونه‌های نانورس با ۸٪ کربنات غنی می‌شوند ترتیب قابلیت نگهداری آلودگی توسط نمونه‌ها به‌صورت ذیل بوده‌است:

Cloisite®Na<sup>+</sup> > Cloisite®15A ≥ Cloisite®20A > Cloisite®30B > Bentonite

**واژه‌های کلیدی:** نانورس، کربنات، فلز سنگین، پراش اشعه ایکس، جذب آلاینده.

## مقدمه

افزایش شکل‌پذیری مواد و افزایش بسیار زیاد فعالیت شیمیایی مواد است [۱]. خاک‌های رسی به عنوان یکی از بهترین لایه‌های محافظ و جذب کننده آلاینده‌های زیست محیطی تلقی می‌شوند. وجود سطح مخصوص قابل توجه، نفوذپذیری بسیار کم، و ظرفیت تبادل کاتیونی رس‌ها سبب شده‌است که این مصالح در پروژه‌های ژئوتکنیک زیست محیطی به

علم نانومواد، یک حرکت جدید را در سیستم تولید و استفاده نوین از مواد ایجاد نموده‌است. وقتی مواد بسیار کوچک می‌شوند، خواص جدید قابل توجه‌ای پیدا می‌کنند. بعضی از این خواص که موجب کاربرد وسیع نانومواد شده است شامل افزایش در سطح مخصوص، آشکار ساختن خواص مهندسی مفید، افزایش سختی،

طور وسیع مورد استفاده قرار گیرند [۲-۴]. جذب یون‌های فلز سنگین با رس‌ها یک روند پیچیده است و به شدت به قدرت پیوندهای کووالانسی وابسته است [۵].

خاک‌های رسی به دلیل ساختمان لایه‌ای و داشتن سطح مخصوص بزرگ، قادر به اندرکنش با مواد موجود در آلاینده‌ها بوده که این ویژگی سبب می‌شود که رس‌ها قادر به جذب تمام یا قسمتی از مواد خطرناک موجود در محلول آلاینده عبوری از خاک باشند. هر کدام از بخش‌های تشکیل دهنده کانی‌های رسی، کربنات، مواد آلی، اکسیدها، مواد آمرف و فازهای باقیمانده [۲] می‌توانند در فرایند نگهداری فلزات سنگین نقش داشته باشند. در فرایند اندرکنش کانی‌های رسی و آلاینده‌های فلزی، کربنات‌ها نقش ویژه‌ای ایفا می‌کنند. تأثیر ساختار خاک در فرایند نگهداری فلز سنگین در بسیاری از مطالعات بررسی شده است [۲-۶]. از دیدگاه ژئوتکنیک زیست محیطی، کانی رسی مونت‌موریلونیت از کانی‌های رسی مورد استفاده در پروژه‌های ژئوتکنیک زیست محیطی است. در میان کانی‌های رسی، مونت‌موریلونیت بیشترین خواص جذب آلاینده را داراست. به دلیل درصد بالای جانشینی متعادل (خنثی) نشده در کانی‌های گروه اسمکتیت، این کانی‌ها ظرفیت تبادل کاتیونی بزرگی دارند. با استفاده از مواد اصلاح کننده آلی، می‌توان در خواص مهندسی مونت‌موریلونیت تغییرات اساسی ایجاد نمود. در حقیقت خواص مونت‌موریلونیت اصلاح شده مربوط به ترکیب شیمیایی اصلاح شده و پارامترهای ساختاری آن است [۷-۱۳]. حضور مواد آلی در خاک موجب پیچیدگی درک رفتار تک تک اجزای رسی در جذب فلزات سنگین می‌شود، زیرا مواد آلی بر سطوح اجزای رس می‌چسبند و اندرکنش پیچیده‌ای را ایجاد می‌کنند [۱۴-۱۵]. یکی از انواع نانومواد که در تحقیقات وسیعی انجام شده و در امور صنعتی کاربرد فراوان دارد، نانوذرات رسی است. نانورس‌ها، پودرهای رسی هستند که به مقدار زیادی تصفیه شده و به عنوان یک افزودنی برای افزایش مقاومت، مقابله در برابر اشعه فرابنفش، افزایش مقاومت حرارتی، جذب آلاینده‌های موجود در محیط زیست و در برخی موارد به واسطه خواص ضد باکتری آنها استفاده می‌شوند.

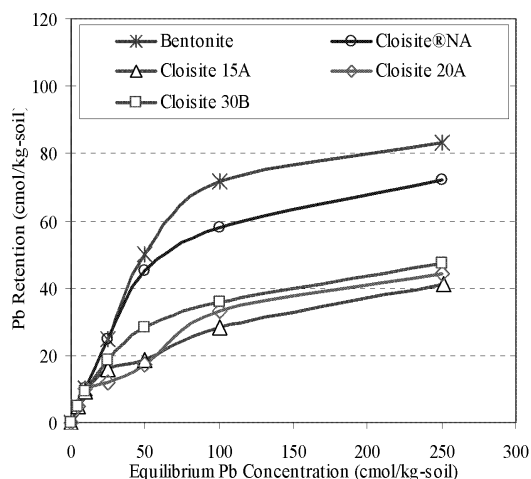
از سوی دیگر کانی‌های کربنات موجود در خاک، کربنات کلسیم یا کلسیت، با قرارگیری در میان ذرات یا با پوشش دادن سطوح خاک، بر فرایند خاک-آلودگی تأثیر می‌گذارند. کانی‌های کربناتی نقش مهمی در روند جذب و نگهداری فلزات سنگین ایفا می‌کنند [۵ و ۱۳]. یکی از شاخص‌های مهم خاک‌ها، مقاومت در برابر تغییرات سریع محیطی یا قدرت بافر آن‌ها است. یک محلول بافر وقتی اجزاء مختلفی به آن اضافه و یا از آن خارج شوند، دارای توانایی ماندن در وضعیت پایدار را دارد. میزان نگهداری فلز سنگین توسط خاک بطور مستقیم به ظرفیت بافرینگ خاک وابسته است [۱۴]. هنگامی که pH سیستم خاک به ازای افزودن اسید به سرعت کاهش یابد، می‌توان نتیجه گرفت که خاک، دارای توانایی کمی برای نگهداری آلاینده است [۱۳]. تحقیقات نشان می‌دهد ظرفیت بافرینگ خاک‌ها به مقدار زیادی از ظرفیت تبادل کاتیونی و میزان کربنات موجود در خاک تأثیر می‌پذیرد [۶].

در سال‌های اخیر، در موضوع اندرکنش خاک و آلودگی مطالعات زیادی صورت گرفته است، لیکن در زمینه فرایند اندرکنش آلاینده‌های فلز سنگین و نانورس‌ها و افزایش قابلیت نگهداری آلودگی نانورس‌ها تحقیقات قابل توجهی انجام نشده است [۲ و ۱]. همچنین ارزیابی تحقیقات گذشته بیانگر آن است که در پژوهش‌های انجام شده تاکنون، به قابلیت‌های ویژه نانورس‌ها در جذب و نگهداری آلاینده‌های فلزی و خصوصاً مقایسه آن با رفتار جذب و نگهداری مونت‌موریلونیت و بنتونیت توجه کاملی معطوف نشده است. همچنین مرور تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که در تحقیقات قبلی به تأثیر حضور کربنات بر فرایند اندرکنش نانورس و آلاینده‌های فلزی، همچنین بررسی کمی نقش کربنات در تغییرات قابلیت خاک در نگهداری آلاینده فلز سنگین توجه ویژه‌ای معطوف نشده است. بر این اساس هدف این پژوهش اثبات ویژگی خاص نانورس‌ها در جذب و نگهداری آلاینده‌های فلز سنگین و مطالعه رفتار ژئوتکنیک زیست محیطی نانورس‌ها و نانورس‌های غنی شده با کربنات از نظر قابلیت جذب آلاینده‌های فلز سنگین بوده است.

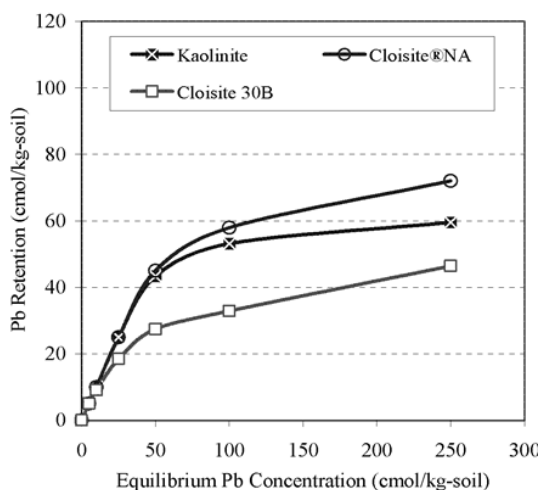
## مواد و روش‌ها

در این پژوهش، در بخش آزمایش‌های رفتاری از نانورس‌های صنعتی، نمونه‌های رسی بنتونیت و کائولینیت استفاده شده‌است. هدف از این انتخاب تعیین خصوصیات ژئوتکنیک زیست محیطی و قابلیت جذب و نگهداری آلاینده‌ها در انواع نانوذرات رسی و مقایسه آن با نمونه‌های رسی مورد مطالعه بوده‌است. شایان ذکر است نمونه کائولینیت حاوی ۴٪ و نمونه بنتونیت حاوی ۸٪ کربنات طبیعی بوده‌است. همچنین از نانومواد رسی صنعتی اصلاح شده با نام تجاری کلوزایت<sup>+</sup>Na، کلوزایت<sup>A</sup>۱۵، کلوزایت<sup>A</sup>۲۰ و کلوزایت<sup>B</sup>۳۰ استفاده شده‌است. این نانورس‌ها با نام تجاری "کلوزایت" تهیه شده از شرکت "تولید رس جنوب آمریکا" شناخته شده‌است. نمونه بنتونیت مورد استفاده در این تحقیق با نام صنعتی "بنتونیت فلات ایران" بوده و از شرکت "ایران باریت" تهیه شده و حاوی ۸ درصد کربنات است. نمونه کائولینیت نیز از منطقه زنوس تبریز تهیه شده و تحت عنوان کائولینیت سویر زنوس تبریز شناخته شده‌است. بخش اعظم آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق بر اساس استاندارد ASTM و دستورالعمل انجام آزمایش‌های ژئوتکنیک زیست محیطی دانشگاه مگ‌گیل کانادا صورت گرفته‌است. برای تعیین درصد کربنات خاک، از روش تیتراسیون استفاده شده‌است [۱۶]. اندازه‌گیری سطح مخصوص خاک (SSA) نیز با استفاده از محلول EGME انجام شد [۱۷]. برای اندازه‌گیری قابلیت تبادل کاتیونی خاک (CEC)، از محلول باریم کلراید استفاده شد [۱۸]. همچنین اندازه‌گیری ظرفیت نگهداری آلودگی خاک با انجام آزمایش تیتراسیون و با افزودن غلظت‌های مختلف اسید نیتریک (HNO<sub>3</sub>) به نمونه‌ها انجام شده‌است [۱۵-۱۸]. محلول‌های اسید در غلظت‌های مختلف با نسبت ۱:۱۰ (خاک: محلول اسید) به خاک اضافه شد. سوسپانسیون خاک-الکترولیت به مدت حداقل سه ساعت توسط لرزاننده الکتریکی هم زده شده و نمونه‌ها به مدت ۹۶ ساعت به منظور همگن شدن کامل سیستم و انجام تبادل کاتیونی لازم نگهداری شده‌است. پس از طی این مدت، مقادیر pH با استفاده از دستگاه pH متر مدل (HANNA-Hi 9321) اندازه‌گیری شد.

همچنین به منظور بررسی اندرکنش نمونه‌های نانورس و کانی‌های رسی با آلاینده فلز سنگین، از آزمایش تعادل مخلوط اشباع استفاده شد. به این منظور با انجام آزمایش تعادل سوسپانسیون اشباع خاک در غلظت‌های مختلف آلاینده فلز سنگین، قابلیت نگهداری فلز سنگین در نمونه‌ها مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفت [۱۹]. به منظور انجام این آزمایش‌ها، در ابتدا محلول‌های شامل نیترات سرب Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> و در غلظت‌های ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۵ مولار تهیه شد. یک گرم خاک خشک با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن شده و داخل تیوپ سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتر ریخته شد. سپس ۵۰ میلی‌لیتر از الکترولیت مورد نظر به خاک اضافه گردید. این سوسپانسیون الکترولیت-خاک به مدت سه ساعت توسط لرزاننده افقی کاملاً هم زده شد. آنگاه پس از نگهداری نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت با هدف ایجاد شرایط تعادل، این سوسپانسیون مجدداً به مدت سه ساعت هم زده شد. نمونه‌ها حدود ۱۲۰ ساعت دیگر نگهداری شده تا با انجام کامل تبادل کاتیونی، شرایط تعادل در سیستم خاک-الکترولیت کاملاً صورت گیرد. پس از این مرحله، با سانتریفیوژ کردن نمونه‌ها در سرعت ۳۰۰۰ rpm، فاز مایع نمونه از فاز جامد خاک جدا شده و سپس غلظت یون سرب در فاز مایع جدا شده با استفاده از دستگاه جذب اتمی (AAS) مدل (GBC 932 AB Plus) آنالیز شده‌است. به منظور بررسی وضعیت اندرکنش نانورس‌های خالص و نانورس‌های غنی شده با درصد‌های مختلف کربنات با فلز سنگین سرب و مقایسه رفتار جذب و نگهداری آنها با نمونه‌های رسی کائولینیت و بنتونیت، یک سری آزمایش جذب به روش تعادل سوسپانسیون خاک-الکترولیت، انجام گرفته‌است. در این آزمایش‌ها ابتدا نمونه‌های نانورس با نسبت‌های وزنی ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸ کربنات کلسیم به صورت خشک مخلوط شده‌است. سپس به این نمونه‌ها در نسبت ۱ به ۵۰ (خاک-محلول)، الکترولیت‌های حاوی نیترات سرب در غلظت‌های ۰، ۰/۰۵، ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۱/۰۰ و ۲۵۰ cmol/kg-soil اضافه شد. همچنین با انجام یک‌سری آزمایش‌های تعادل مخلوط اشباع، رفتار ژئوتکنیک زیست محیطی این نمونه‌ها با نمونه‌های مرجع کائولینیت و بنتونیت مورد مقایسه قرار گرفت. برای تهیه نمونه‌های اشعه ایکس (XRD)، یک گرم خاک خشک با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن شده و داخل تیوپ



شکل ۱: فرایند جذب آلاینده فلز سنگین سرب در چهار نمونه نانورس در مقایسه با نمونه بنتونیت



شکل ۲: جذب آلاینده فلز سنگین سرب در نمونه‌های کائولینیت، کلوزایت  $Na^+$  و کلوزایت ۳۰B

از سوی دیگر، بر اساس نتایج جدول ۱، نمونه کلوزایت  $Na^+$  سطح مخصوص بزرگتری نسبت به نمونه بنتونیت دارد. همچنین در مقایسه با دیگر نمونه‌های مورد مطالعه، این نمونه ظرفیت تبادل کاتیونی نسبتاً بزرگی نیز داشته است. دو مورد فوق سبب شده‌است که نمونه نانورس کلوزایت  $Na^+$  در مقایسه با کائولینیت حاوی ۴٪ کربنات از قابلیت بیشتری در نگهداری آلودگی برخوردار باشد. از مقایسه مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح مخصوص کائولینیت و نمونه نانورس کلوزایت ۳۰B می‌توان نتیجه‌گیری نمود که وجود ۴٪ کربنات در نمونه

سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتر ریخته شد. سپس بعد از اضافه نمودن ۵۰ میلی‌لیتر از الکترولیت مورد نظر به خاک، این سوسپانسیون الکترولیت-خاک به مدت سه ساعت توسط لرزاننده الکترونیکی کاملاً هم زده شد. آنگاه پس از نگهداری نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت با هدف ایجاد شرایط تعادل، این سوسپانسیون مجدداً به مدت سه ساعت توسط لرزاننده افقی کاملاً هم زده شد، و نمونه‌ها حدود ۱۲۰ ساعت دیگر نگهداری شده تا سیستم کاملاً همگن شده و تبادل کاتیونی لازم، صورت گیرد. سپس نمونه‌ها به مدت ۶۰ دقیقه توسط لرزاننده مجدداً هم زده شدند و سپس بین ۵ تا ۷ قطره از این سوسپانسیون بر روی اسلاید شیشه‌ای ریخته شده و پس از خشک شدن، با دستگاه اشعه ایکس مدل Siemens-Diffractometer D8 Advance مورد آزمایش قرار گرفتند.

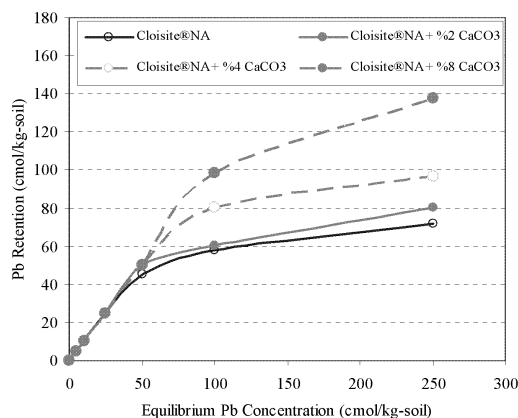
## بحث و بررسی نتایج

خصوصیات جذب و نگهداری نانورس‌های کلوزایت  $Na^+$ ، کلوزایت ۱۵A، کلوزایت ۲۰A، کلوزایت ۳۰B، نمونه‌های رسی بنتونیت و کائولینیت در اندرکنش با آلاینده فلز سنگین سرب در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده‌است. بر اساس نتایج آزمایش‌های صورت گرفته، قابلیت نگهداری آلاینده در نمونه بنتونیت بیش از دیگر نمونه‌ها است. همچنین در نمونه‌های نانورس، قابلیت نگهداری آلاینده در نمونه کلوزایت  $Na^+$  از دیگر نمونه‌ها بیشتر است. در واقع اگرچه نمونه‌های کلوزایت ۱۵A، کلوزایت ۲۰A و کلوزایت ۳۰B به واسطه اندازه ابعاد، سطح مخصوص قابل توجهی دارند لیکن به دلیل بزرگ‌تر بودن قابلیت تبادل کاتیونی نمونه کلوزایت  $Na^+$ ، این نمونه از دیگر نمونه‌های نانورس قابلیت جذب آلودگی بیشتری داشته‌است.

اصولاً، ارزیابی مطالعات انجام شده توسط دیگر محققین نشان می‌دهد که سه پارامتر درصد کربنات، ظرفیت تبادل کاتیونی<sup>۱</sup> و سطح مخصوص<sup>۲</sup> نقش قابل توجهی در قابلیت نگهداری آلودگی توسط خاک دارند [۱۷]. بر این اساس با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۱)، وجود ظرفیت تبادل کاتیونی بزرگ، حدود ۸٪ کربنات و سطح مخصوص قابل توجه در نمونه بنتونیت سبب افزایش قابلیت نگهداری آلودگی در آن نسبت به دیگر نمونه‌ها شده‌است.

آزمایش‌های این تحقیق، با افزایش کربنات کلسیم به نمونه‌های مورد مطالعه، به بررسی کیفی و کمی درصد افزایش قابلیت نگهداری نمونه‌ها نسبت به نمونه اولیه، و نیز به بررسی تغییرات جذب در نانورس‌ها در مقایسه با نمونه‌های رسی مرجع کائولینیت و بنتونیت پرداخته شده‌است. در ارزیابی نتایج این آزمایش‌ها به دو عامل ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح ویژه خاک و تأثیر آن در فرایند اندرکنش خاک-آلودگی توجه ویژه‌ای معطوف شده‌است.

در شکل (۳) تغییرات جذب فلز سنگین سرب در کلوزایت  $Na^+$  غنی شده با درصدهای متفاوت (۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸) کربنات کلسیم نشان داده شده‌است. همانطور که ملاحظه می‌شود در نمونه‌های حاوی ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸ کربنات، در غلظت‌های کمتر از  $50 \text{ cmol/kg-soil}$  تقریباً تمامی فلز سنگین سرب موجود در الکترولیت، توسط نمونه خاک، جذب و نگهداری شده‌است.



شکل ۳: میزان نگهداری فلز سنگین سرب توسط نانورس صنعتی کلوزایت  $Na^+$  در حضور کربنات آزمایشگاهی

با افزایش ۰/۴ کربنات، میزان نگهداری فلز سنگین سرب در غلظت  $100 \text{ cmol/kg-soil}$  و  $100 \text{ cmol/kg-soil}$  به ترتیب نسبت به کلوزایت  $Na^+$  خالص حدود ۰/۳۸ و ۰/۳۳ افزایش در نگهداری آلاینده فلز سنگین را نشان می‌دهد. به عبارتی به ازای افزایش هر یک درصد کربنات، قابلیت نگهداری آلاینده فلز سنگین سرب  $5 \pm 0.5 \text{ cmol/kg-soil}$  افزایش یافته‌است. از سوی دیگر در نمونه کلوزایت  $Na^+$  حاوی ۰/۴ کربنات در مقایسه با نمونه رسی کائولینیت که حاوی ۰/۴ کربنات طبیعی است، افزایش

کائولینیت عملاً سبب شده‌است که این نمونه دارای قابلیت نگهداری آلودگی بیشتری از نانورس کلوزایت ۳۰B باشد (شکل (۲)). این در حالی است که نمونه نانورس فوق دارای سطح مخصوص حدود ۱۲ برابر کائولینیت و ظرفیت تبادل کاتیونی آن نیز حدوداً ۱۲٪ بیشتر از کائولینیت بوده‌است.

جدول ۱: مقایسه CEC، SSA و درصد کربنات نمونه‌ها

نمونه خاک	CEC (cmol/kg-soil)	SSA (m <sup>2</sup> /g)	درصد کربنات
کائولینیت	۱۵،۶۲	۶۳	۴
بنتونیت	۶۵،۲۳	۴۱۶،۵	۸
کلوزایت $Na^+$	۵۱،۱۶	۵۲۴،۸	۰
کلوزایت ۱۵A	۱۰،۹۵	۸۳۵	۰
کلوزایت ۲۰A	۱۹،۷۶	۶۱۸،۵	۰
کلوزایت ۳۰B	۱۷،۴۶	۷۵۴،۵	۰

اگر همزمان به این نکته توجه شود که نمونه کلوزایت ۳۰B دارای قابلیت جذب بیشتری در مقایسه با نمونه‌های کلوزایت ۲۰A و کلوزایت ۱۵A بوده‌است با مقایسه تفاوت در مقادیر جذب آنها می‌توان نتیجه‌گیری نمود که افزایش ۲۲ درصدی سطح مخصوص کلوزایت ۳۰B در مقایسه با نمونه کلوزایت ۲۰A سبب افزایش قابلیت جذب آن شده‌است. چرا که نمونه کلوزایت ۳۰B دارای ظرفیت تبادل کاتیونی کمتری (حدود ۱۲٪) در مقایسه با نمونه کلوزایت ۲۰A بوده‌است. در عین حال افزایش ۳۵ درصدی سطح مخصوص نمونه کلوزایت ۱۵A در مقایسه با نمونه کلوزایت ۲۰A باعث افزایش قابلیت نگهداری آلودگی در نانورس کلوزایت ۱۵A نشده‌است. علت این موضوع را قطعاً می‌توان به افزایش حدود ۸۰ درصدی ظرفیت تبادل کاتیونی نمونه کلوزایت ۲۰A نسبت به نمونه کلوزایت ۱۵A نسبت داد. بر این اساس ترتیب تأثیر عوامل حضور کربنات، ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح مخصوص در قابلیت نگهداری آلودگی خاک را می‌توان به شرح ذیل نتیجه‌گیری نمود:

کربنات < سطح مخصوص < ظرفیت تبادل کاتیونی  
با توجه به مطالب بیان شده، همانگونه که نتایج دیگر محققین نیز نشان داده‌است (Yong et al. 1992)، عامل کربنات یکی از علل اصلی و موثر در نگهداری آلاینده فلز سنگین در خاک است. بر این اساس در ادامه

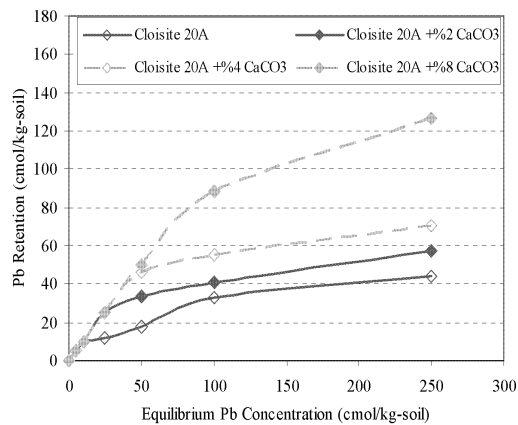
شده است. بررسی مطالب بیان شده به ایجاد این دیدگاه منجر شد که یکی از علل اصلی قابلیت نگهداری آلاینده قابل توجه در نمونه رسی بنتونیت، میزان کربنات موجود در آن است. از سوی دیگر میزان خلوص کانی رسی به مقدار زیادی بر میزان نگهداری آلاینده فلز سنگین تأثیر گذار است. ضمن آنکه عامل سطح مخصوص در نمونه‌های نانورس به افزایش قابل توجه قابلیت نگهداری آلاینده در آنها کمک شایانی می‌کند.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۱)، نانورس صنعتی کلوزایت ۱۵A در میان نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش دارای کمترین میزان نگهداری فلز سنگین سرب بوده است. به بیان دیگر، کلوزایت ۱۵A در حالی که دارای سطح مخصوص بسیار بزرگی است، به دلیل ظرفیت تبادل کاتیونی بسیار کم آن نسبت به دیگر نمونه‌ها، قابلیت نگهداری آلاینده فلز سنگین در آن به مقدار زیادی کم شده است. با غنی سازی کلوزایت ۱۵A با درصد‌های مختلف کربنات کلسیم به بررسی میزان جذب و نگهداری فلز سنگین سرب در این نانورس پرداخته شد. بر اساس منحنی جذب ارائه شده در شکل (۴)، با افزودن ۲٪ کربنات به این نمونه، میزان جذب و نگهداری فلز سنگین سرب در غلظت ۱۰۰ cmol/kg-soil به میزان ۳۰٪ افزایش یافته است. همچنین با افزایش ۲٪ کربنات به کلوزایت ۱۵A، میزان جذب آلاینده در غلظت ۱۰۰ cmol/kg-soil به مقدار قابل توجه ۸٫۶ cmol/kg-soil زیاد شده است. به عبارتی به ازای هر درصد کربنات حدود ۵ cmol/kg-soil قابلیت نگهداری آلاینده سرب افزایش یافته است. این در حالی است که میزان جذب و نگهداری کلوزایت ۱۵A با ۴٪ کربنات نسبت به نمونه رسی کائولینیت در غلظت ۱۰۰ cmol/kg-soil به میزان ۱۶٪ بیشتر شده است، که نشان‌دهنده تأثیر کربنات در میزان جذب و نگهداری کائولینیت است. افزایش ۸٪ کربنات کلسیم به نمونه کلوزایت ۱۵A در غلظت ۱۰۰ cmol/kg-soil موجب ۳ برابر شدن میزان جذب و نگهداری فلز سنگین سرب شده است. در این حالت کلوزایت ۱۵A در همین غلظت نسبت به بنتونیت بیش از ۲۲٪ افزایش در میزان جذب را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که با افزایش ۸٪ کربنات، قابلیت نگهداری آلاینده فلز سنگین سرب در این نمونه دقیقاً افزایش ۴۰ cmol/kg-soil را نشان می‌دهد، ضمن آنکه در این نمونه نیز افزایش هر

حدود ۵۱٪ و ۶۲٪ نگهداری آلاینده فلز سنگین در غلظت‌های ۱۰۰ cmol/kg-soil و ۲۵۰ cmol/kg-soil مشاهده می‌شود. به بیان دیگر ۸٫۳ برابر شدن سطح مخصوص کلوزایت  $\text{Na}^+$  نسبت به کائولینیت و افزایش ۳۲۷٪ ظرفیت تبادل کاتیونی آن علت اصلی این میزان افزایش در قابلیت نگهداری نمونه بوده است. همچنین افزایش ۱۶ درصدی میزان نگهداری فلز سنگین سرب در نمونه کلوزایت  $\text{Na}^+$  حاوی ۴٪ کربنات نسبت به بنتونیت مرجع (دارای ۸٪ کربنات طبیعی) در غلظت ۱۰۰ cmol/kg-soil قابل توجه است. عدم خلوص بنتونیت (وجود ۲۶٪ سیلت در نمونه بنتونیت)، افزایش سطح مخصوص کلوزایت  $\text{Na}^+$  نسبت به بنتونیت، و بزرگ بودن ظرفیت تبادل کاتیونی کلوزایت  $\text{Na}^+$  می‌تواند از علل این افزایش باشد.

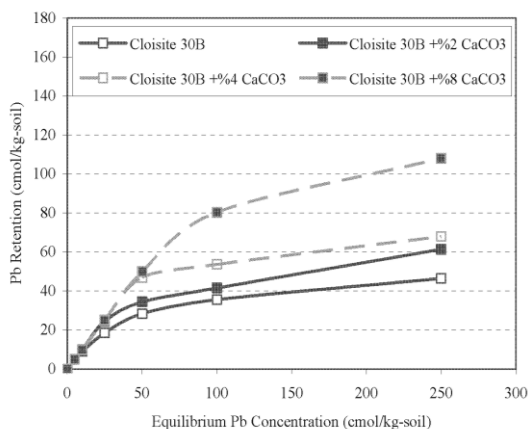
غنی‌سازی کلوزایت  $\text{Na}^+$  با ۸٪ کربنات موجب افزایش قابل توجه میزان جذب و نگهداری فلز سنگین سرب در این نمونه شده است. افزایش ۴۰٪ و ۶۶٪ در میزان نگهداری آلاینده فلز سنگین در نمونه کلوزایت  $\text{Na}^+$  حاوی ۸٪ کربنات در مقایسه با نمونه بنتونیت در غلظت‌های ۱۰۰ cmol/kg-soil و ۲۵۰ cmol/kg-soil، تأثیر حضور کربنات را در نگهداری فلز سنگین سرب و غالب بودن این تأثیر در مقایسه با تأثیر ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح مخصوص در نگهداری فلز سنگین را نشان می‌دهد. از سوی دیگر می‌توان نتیجه‌گیری نمود که نمونه نانورس کلوزایت  $\text{Na}^+$  در مقایسه با نمونه بنتونیت فاقد کربنات، از قابلیت نگهداری بیشتری معادل ۲۴٪ و ۱۴٫۵٪ در غلظت-های ۱۰۰ cmol/kg-soil و ۲۵۰ cmol/kg-soil برخوردار است. بدیهی است که بدون استناد به نتایج ارائه شده در شکل‌های ۲ و ۳ امکان اخذ این نتیجه‌گیری میسر نبوده است. این موضوع به عبارتی در اینجا نیز مشاهده می‌شود که افزایش هر یک درصد کربنات قابلیت نگهداری آلاینده فلز سنگین سرب را حدود ۵ cmol/kg-soil  $\pm 0/5$  افزایش داده است.

در مجموع می‌توان گفت، ظرفیت تبادل کاتیونی اولیه بنتونیت نسبت به کلوزایت  $\text{Na}^+$  خالص بیشتر بوده است، اما با افزودن کربنات کلسیم به کلوزایت  $\text{Na}^+$  و به تبع آن رسوب آلاینده فلزی به صورت هیدروکسید کربنات فلزی و از سوی دیگر بزرگتر بودن سطح مخصوص کلوزایت  $\text{Na}^+$  در مقایسه با بنتونیت سبب وقوع رفتار فوق



شکل ۵: میزان نگهداری فلز سنگین سرب توسط نانوس صنعتی کلوزایت ۲۰A در حضور کربنات آزمایشگاهی

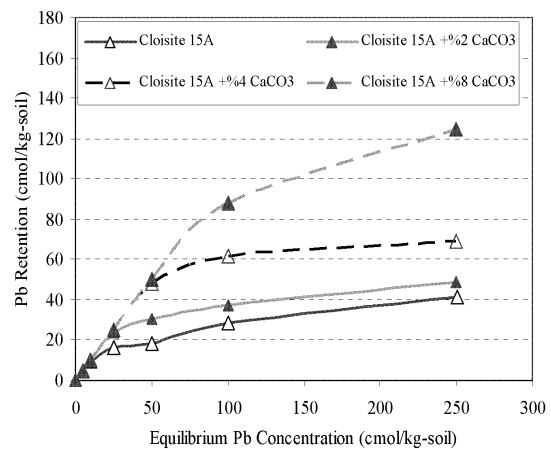
شکل (۶) قابلیت نگهداری آلاینده فلز سنگین سرب را توسط نمونه نانوس کلوزایت ۳۰B فاقد کربنات و غنی شده با درصد‌های مختلف کربنات را نشان می‌دهد. غنی‌سازی کلوزایت ۳۰B با ۴٪ کربنات، میزان نگهداری فلز سنگین سرب را در این نمونه در غلظت  $\text{cmol/kg-soil}$  ۱۰۰ تقریباً با کائولینیت برابر کرده و به میزان ۴۹٪ نسبت به نمونه خالص افزایش داده‌است. با افزایش درصد کربنات به ۸٪ در کلوزایت ۳۰B روند صعودی میزان جذب در این نمونه همچنان مشاهده می‌شود.



شکل ۶: میزان نگهداری فلز سنگین سرب توسط نانوس صنعتی کلوزایت ۳۰B در حضور کربنات آزمایشگاهی

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۱)، کلوزایت ۳۰B نسبت به نمونه‌های کلوزایت ۱۵A و کلوزایت ۲۰A به علت ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح مخصوص بزرگتر،

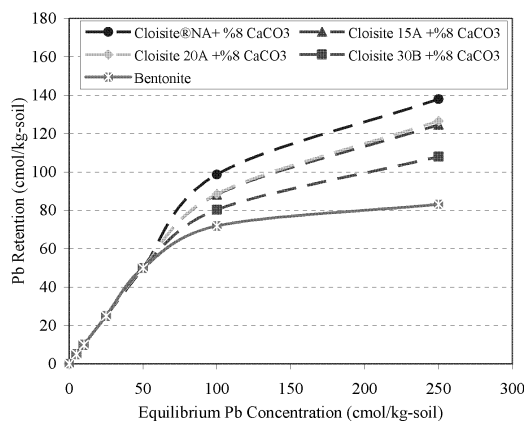
درصد کربنات قابلیت نگهداری آلاینده را حدود  $\text{cmol/kg-soil}$  ۵ افزایش داده‌است.



شکل ۴: میزان نگهداری فلز سنگین سرب توسط نانوس صنعتی کلوزایت ۱۵A در حضور کربنات آزمایشگاهی

در نانوس صنعتی کلوزایت ۲۰A نیز افزایش درصد کربنات موجب افزایش میزان جذب و نگهداری فلز سنگین سرب در نمونه‌ها شده‌است. براساس نتایج ارائه شده در شکل (۵) ملاحظه می‌شود که با افزایش ۲٪ کربنات در غلظت‌های کمتر از  $\text{cmol/kg-soil}$  ۲۵، تقریباً تمامی فلز سنگین سرب موجود در الکترولیت جذب و نگهداری شده و در واقع افزایش حدود ۱۶٪ در میزان جذب فلز سنگین را در غلظت  $\text{cmol/kg-soil}$  ۱۰۰ منجر شده‌است. هنگامی که کلوزایت ۲۰A با ۴٪ کربنات غنی شد، میزان جذب و نگهداری فلز سنگین در غلظت  $\text{cmol/kg-soil}$  ۱۰۰ به ۵۵ رسیده‌است که افزایش حدود ۵٪ را نسبت به کائولینیت نشان می‌دهد. غنی‌سازی کلوزایت ۲۰A با ۸٪ کربنات، جذب ۸۸٪ فلز سنگین سرب را در غلظت  $\text{cmol/kg-soil}$  ۱۰۰ به همراه داشته‌است. این در حالی است که نمونه اخیر در مقایسه با نمونه بنتونیت به میزان ۵۱٪ افزایش در جذب را در غلظت  $\text{cmol/kg-soil}$  ۲۵۰ نشان می‌دهد. در این نمونه نیز افزایش هر درصد کربنات، قابلیت نگهداری آلاینده را حدود  $\text{cmol/kg-soil}$  ۵ افزایش داده‌است. به عبارتی با افزایش ۸٪ کربنات به نمونه، قابلیت نگهداری آلاینده در غلظت  $\text{cmol/kg-soil}$  ۱۰۰ از ۳۳٫۲ به  $\text{cmol/kg-soil}$  ۸۷ رسیده‌است.

با دقت در نمودارهای جذب آلاینده نمونه‌های نانورس حاوی ۸٪ کربنات و نمونه بنتونیت (شکل ۸)، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که توانایی جذب قابل‌توجه در نمونه بنتونیت نیز عمدتاً بواسطه وجود کربنات بوده است به طوری که نانو رس غنی شده با کربنات، قابلیت جذب بیش از بنتونیت نشان داده‌است. این موضوع تأیید کننده قابلیت بیشتر نمونه نانورس در مقایسه با بنتونیت فاقد کربنات است. این قابلیت منحصر بفرد در نمونه‌های نانو رس عمدتاً بواسطه سطح مخصوص بزرگتر نمونه‌های نانو رس، بسیج سطح مخصوص بواسطه تأثیر یون سدیم در پراکندگی پولک‌های رسی، و بسیج و تسهیل در تبادل کاتیونی بواسطه عملکرد یون سدیم با والانس واحد در رفتار نمونه نانورس در مقایسه با نمونه بنتونیت است.



شکل ۸: میزان نگهداری فلز سنگین سرب توسط نمونه رسی بنتونیت و چهار نانورس در حضور ۸٪ کربنات

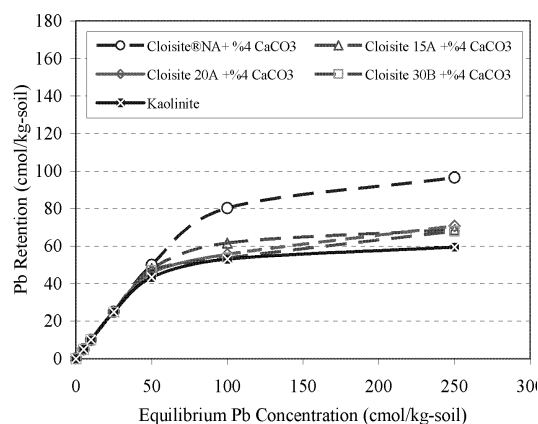
بدین ترتیب می‌توان قابلیت نگهداری آلاینده فلزسنگین سرب را در نمونه‌های غنی شده با ۸٪ کربنات به شرح ذیل خلاصه نمود:

$\text{Cloisite}^{\text{®}}\text{Na}^+ > \text{Cloisite}^{\text{®}}15\text{A} \geq \text{Cloisite}^{\text{®}}20\text{A}$   
 $> \text{Cloisite}^{\text{®}}30\text{B} > \text{Bentonite}$

به منظور حصول اطمینان از نتیجه‌گیری اخذ شده از شکل‌های (۱) تا (۸)، در قسمت بعدی آزمایش‌ها این تحقیق، pH نمونه‌های آلوده شده به غلظت‌های مختلف اسید نیتریک مورد اندازه‌گیری قرار گرفته‌شد. نتایج این آزمایش‌ها در شکل (۹) ارائه شده‌است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۹)، نمونه بنتونیت در مقایسه با دیگر

دارای قابلیت نگهداری آلاینده بیشتری است. اما با افزایش درصد کربنات این روند دیگر معتبر نیست و میزان جذب و نگهداری این نمونه در حدود یا کمتر از کلوزایت ۱۵A و کلوزایت ۲۰A است.

به منظور مطالعه تأثیر کربنات در قابلیت نگهداری آلاینده در نانورس‌های مورد مطالعه در مقایسه با نمونه کائولینیت، تعدادی آزمایش تعادل سوسپانسیون خاک-الکترولیت در درصدهای کربنات ۴ و ۸٪ برای نمونه‌های نانو رس انجام شد. منحنی جذب ارائه شده در شکل (۷) به بررسی قابلیت نگهداری آلاینده فلز سنگین سرب در کلیه نمونه‌ها حاوی ۴٪ کربنات می‌پردازد. نمونه رسی کائولینیت با ظرفیت تبادل کاتیونی  $\text{cmol/kg-soil}$  ۱۵٫۶۲ و سطح مخصوص  $\text{m}^2/\text{g}$  ۶۳ دارای کمترین میزان قابلیت نگهداری آلاینده است. در حالی که نانورس کلوزایت  $\text{Na}^+$  غنی شده با ۴٪ کربنات بیشترین قابلیت نگهداری آلاینده را دارد. به نحوی که این نمونه نانورس غنی شده، قابلیت نگهداری بیش از ۸۰٪ آلاینده فلز سنگین سرب را در غلظت  $\text{cmol/kg-soil}$  ۱۰۰ نشان داده‌است. ضمن آنکه این نمونه، در غلظت‌های کمتر از  $\text{cmol/kg-soil}$  ۵۰ تمامی آلاینده موجود در الکترولیت را نگهداری کرده‌است. منحنی جذب سه نانورس کلوزایت ۱۵A، کلوزایت ۲۰A و کلوزایت ۳۰B دقیقاً در بین منحنی جذب کائولینیت و کلوزایت  $\text{Na}^+$  قرار گرفته‌اند و قابلیت نگهداری هر سه نمونه تقریباً با هم برابر بوده‌است.



شکل ۷: میزان نگهداری فلز سنگین سرب توسط نمونه رسی کائولینیت و چهار نانورس در حضور ۴٪ کربنات



ریزساختار خاک‌های رسی می‌شود. به منظور بررسی تأثیر آلاینده سرب بر ریز ساختار نمونه‌های مورد مطالعه، طیف اشعه ایکس تعدادی از نمونه‌های آلوده شده تهیه شد. شکل (۱۲) نتایج آزمایش پراش اشعه ایکس را برای نمونه کلوزایت  $\text{Na}^+$  قبل از اندرکنش با آلودگی و نمونه نانورس حاوی غلظت  $100 \text{ cmol/kg-soil}$  آلاینده نیترات سرب را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج ارائه شده در این شکل با افزایش غلظت آلاینده سرب، شدت پیک اصلی (مونت‌موریلونیت) از  $1900 \text{ Cps}$  به  $1150 \text{ Cps}$  کاهش یافته‌است. همچنین پیک دوم مونت‌موریلونیت دچار کاهش محسوسی شده‌است. این موضوع تأیید کننده این نکته است که افزایش غلظت آلاینده فلز سنگین در سیال منفذی موجب تشکیل ساختار مجتمع در نمونه‌ها شده که در نتیجه آن شدت پیک اصلی و پیک دوم کانی کاهش یافته‌است. قابل توجه است که افزایش غلظت آلاینده فلز سنگین در سیال منفذی موجب تغییر موقعیت پیک‌ها نشده‌است

شکل (۱۳) نتایج آزمایش پراش اشعه ایکس را برای نمونه نانورس کلوزایت  $\text{Na}^+$  غنی شده با  $8\%$  کربنات کلسیم قبل از اندرکنش با آلودگی و بعد از اندرکنش با غلظت  $100 \text{ cmol/kg-soil}$  آلاینده نیترات سرب را نشان می‌دهد.

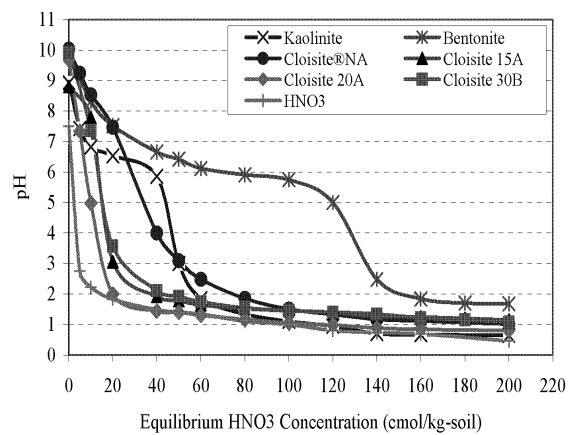
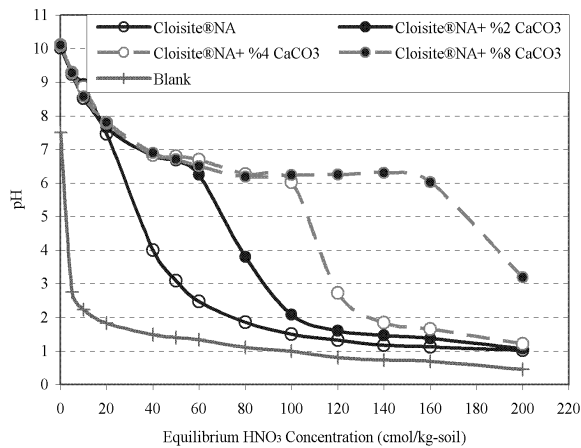
بر اساس نتایج ارائه شده در این شکل با افزایش غلظت آلاینده سرب، شدت پیک اصلی (مونت‌موریلونیت) در نمونه کلوزایت  $\text{Na}^+$  غنی شده با  $8\%$  کربنات و حاوی غلظت  $100 \text{ cmol/kg-soil}$  آلاینده نیترات سرب به مقدار  $400 \text{ Cps}$  کاهش یافته‌است. این موضوع نیز تأیید کننده نتیجه‌گیری مشاهده شده از شکل ۱۲ است که افزایش غلظت نمک سیال منفذی موجب تشکیل ساختار مجتمع در نمونه‌ها شده که در نتیجه آن شدت پیک اصلی و پیک دوم کانی کاهش یافته‌است. در این نمونه‌ها نیز افزایش غلظت نمک سیال منفذی موجب تغییر موقعیت پیک‌ها نشده‌است. همچنین در چهار نمونه نانورس صنعتی، افزایش غلظت نمک سیال منفذی موجب تغییر موقعیت پیک‌ها نشده‌است و تنها بر روی شدت پیک تأثیر ایجاد کرده‌است.

نمونه‌ها از قابلیت بسیار مناسبی در مقاومت در مقابل تغییر pH ناشی از اسید ورودی برخوردار بوده‌است. به استثنای نتایج مربوط به کائولینیت، نتایج دیگر نمونه‌ها به طور مناسبی با نتایج ارائه شده در شکل‌های (۱) و (۲) انطباق دارد. به طوری که به استثنای نمونه کائولینیت، ترتیب مقاومت در مقابل کاهش pH از ترتیب ارائه شده قبلی تبعیت می‌کند.

از سوی دیگر در شکل (۱۰) ظرفیت بافرینگ کلوزایت  $\text{Na}^+$  غنی شده با درصد‌های مختلف کربنات ارائه شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش درصد کربنات، ظرفیت بافرینگ نمونه کلوزایت  $\text{Na}^+$  به مقدار قابل توجهی افزایش نموده‌است. به عبارتی به ازای هر درصد کربنات، مقاومت نمونه در مقابل افت شدید pH به ازای اسید ورودی حدود  $20 \text{ cmol/kg-soil}$  افزایش یافته‌است. به طوری که نمونه کلوزایت  $\text{Na}^+$  حاوی  $8\%$  کربنات، تا  $160 \text{ cmol/kg-soil}$  اسید ورودی در مقابل افت pH از خود مقاومت نشان داده‌است. این افزایش ظرفیت بافرینگ با افزایش بیش از  $70\%$  قابلیت نگهداری آلاینده در غلظت‌های زیاد آلاینده سرب در این نمونه انطباق مناسبی دارد.

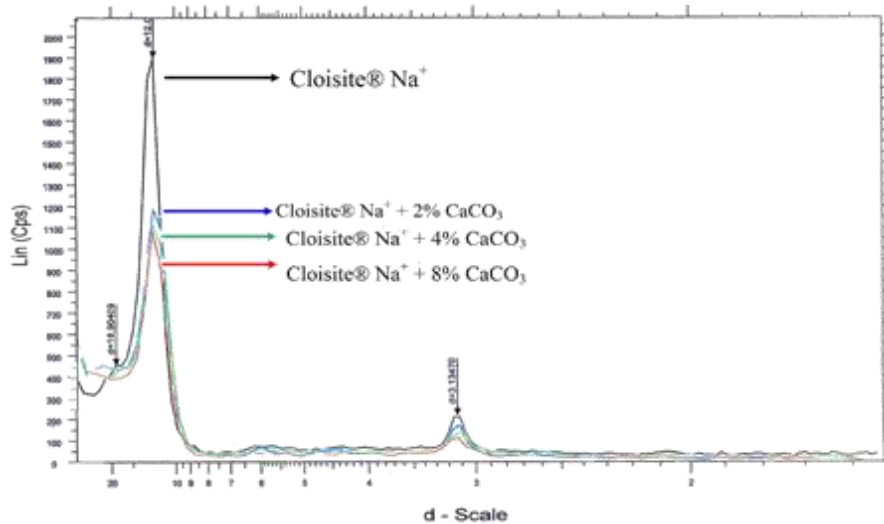
ارزیابی طیف اشعه ایکس به عنوان یک معیار در تعیین ریز ساختار خاک‌ها شناخته شده است. به منظور بررسی تأثیر افزایش کربنات بر ریز ساختار نمونه‌ها، و مطالعه اثر آلاینده سرب بر ریز ساختار نمونه‌ها طیف اشعه ایکس تعدادی از نمونه‌ها تهیه شد. شکل (۱۱) طیف پراش اشعه ایکس برای نمونه کلوزایت  $\text{Na}^+$  خالص و غنی شده با درصد‌های مختلف ۲، ۴ و ۸ درصد کربنات را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه‌های حاوی کربنات، شدت پیک اصلی مونت‌موریلونیت در نانورس کلوزایت  $\text{Na}^+$  دچار کاهش محسوسی شده‌است، این در حالی است که افزایش درصد کربنات از ۲ به ۴ و ۸ درصد تغییرات چندانی را در شدت پیک اصلی کربنات ایجاد نکرده‌است. به عبارت دیگر به علت تفاوت ضریب جذب کربنات کلسیم و کانی مونت‌موریلونیت، کاهش شدت پیک مونت‌موریلونیت به ازای درصد‌های کم کربنات مشاهده می‌شود.

از آنجا که اصولاً فرایند اندرکنش خاک-آلودگی به واسطه تأثیر نهادن بر نیروهای بین پولک‌ها سبب تغییر در

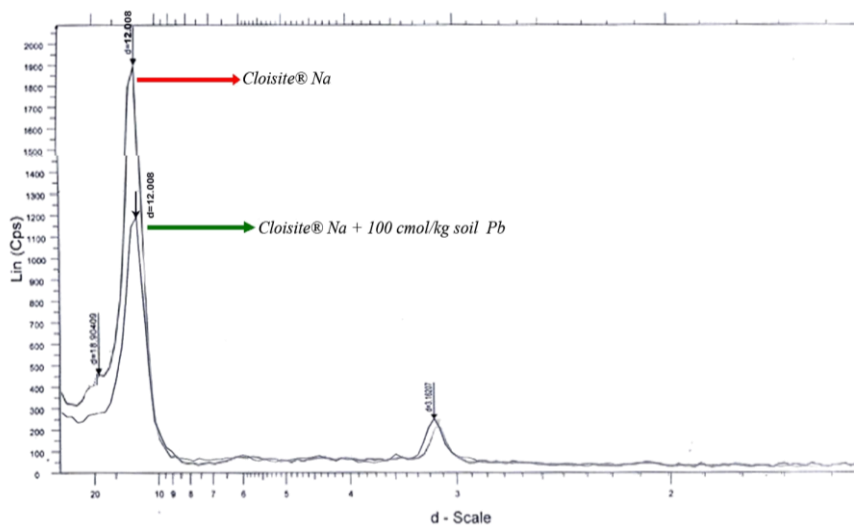


شکل ۱۰: منحنی تیتراسیون نانورس صنعتی کلوزایت Na<sup>+</sup> غنی شده با درصدهای متفاوت کربنات

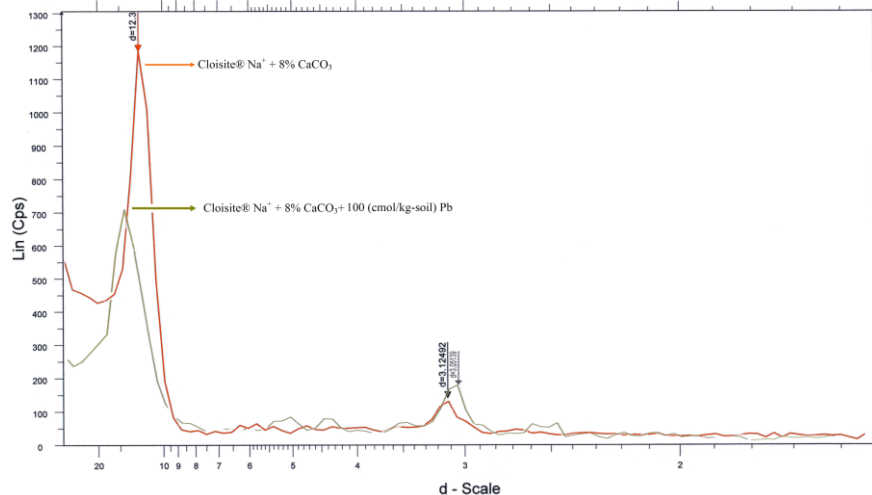
شکل ۹: مقایسه میزان ظرفیت بافرینگ در چهار نمونه نانورس و نمونه‌های رسی بنتونیت و کائولینیت



شکل ۱۱: تغییرات شدت و موقعیت پیک در نانورس کلوزایت Na<sup>+</sup> فاقد کربنات و غنی شده با درصدهای مختلف کربنات



شکل ۱۲: تغییرات شدت و موقعیت پیک در نانورس کلوزایت Na<sup>+</sup> ناشی از افزایش غلظت آلاینده سرب



شکل ۱۳: تغییرات شدت و موقعیت پیک در نانورس کلوزایت  $\text{Na}^+$  حاوی ۸٪ کربنات ناشی از افزایش غلظت آلاینده سرب

## نتیجه‌گیری

نتایج اخذ شده در این تحقیق را می‌توان به شرح ذیل خلاصه نمود:

الف) نتایج این مقاله نشان می‌دهد که نمونه‌های نانورس به واسطه داشتن سطح مخصوص بزرگتر از دیگر نمونه‌های رسی، قابلیت خاص و ویژه‌ای در جذب و نگهداری آلاینده‌های فلز سنگین دارند. به بیان دیگر، قابلیت جذب بیشتر نمونه بنتونیت از نمونه‌های نانورس صرفاً به واسطه درصد قابل توجه کربنات (۸٪) در این نمونه است. به طوری که نمونه‌های نانورس غنی شده با این میزان کربنات از قابلیت جذب بیشتری نسبت به نمونه بنتونیت برخوردار بوده‌اند.

ب) اگرچه نتایج آزمایش‌های ظرفیت بافرینگ و میزان نگهداری فلز سنگین سرب به وسیله نانوذرات اصلاح شده در حضور کربنات نشان می‌دهد که در مقایسه تأثیر سطح مخصوص خاک و درصد کربنات نمونه، بخش قابل توجهی از ظرفیت بافرینگ و قابلیت خاک در نگهداری آلاینده، ناشی از حضور کربنات است، لیکن بیشتر بودن ظرفیت بافرینگ نانورس‌های غنی شده در مقایسه با بنتونیت بیانگر کارایی نمونه‌های نانورس در جذب و نگهداری آلاینده‌های فلز سنگین است.

ج) نمونه‌های نانورس بواسطه داشتن سطح مخصوص بزرگ، و تسهیل در تبادل کاتیونی بواسطه وجود یون سدیم در نمونه‌های نانورس  $\text{Na}^+$ ، قابلیت نگهداری آلودگی قابل توجهی دارند. از سوی دیگر وجود درصد‌های

کربنات تا ۴٪ می‌تواند مقدار قابلیت نگهداری آلودگی توسط خاک را به میزان چشمگیری افزایش دهد. در نتیجه در نمونه کائولینیت که اصولاً دارای سطح مخصوص و ظرفیت تبادل کاتیونی کوچکی است، به واسطه داشتن ۴٪ کربنات از نمونه‌های کلوزایت B ۳۰، کلوزایت A ۲۰ و کلوزایت A ۱۵۵ قابلیت نگهداری آلودگی بیشتری داشته‌است. در عین حال میزان قابلیت نگهداری نمونه نانورس کلوزایت  $\text{Na}^+$  حاوی ۴٪ کربنات، حدود ۶۰٪ بیشتر از میزان جذب نمونه کائولینیت حاوی ۴٪ کربنات در غلظت  $250 \text{ cmol/kg-soil}$  بوده‌است.

د) در روش‌های تهیه نانورس، نوع و مقدار ماده شیمیایی استفاده شده ممکن است بر سایت‌های قابل تبادل کاتیونی خاک تأثیر بگذارد. در چنین مواردی اگر تأثیر مواد شیمیایی استفاده شده در راستای کاهش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک باشد، افزایش سطح مخصوص ناشی از کاهش ابعاد پولک‌های رسی تأثیر کاهش قابلیت نگهداری آلودگی ناشی از کاهش CEC را جبران نمی‌کند. ه) در تهیه نمونه نانورس اگر بتوان این هدف را به نحوی انجام داد که ظرفیت تبادل کاتیونی کاهش نیابد آنگاه زیاد شدن سطح مخصوص خاک در نمونه نانورس تهیه شده می‌تواند قابلیت نگهداری آلودگی خاک را افزایش دهد. و) روند قابلیت نگهداری آلاینده توسط نمونه‌ها با افزایش درصد‌های مختلف کربنات به شرح ذیل تغییر می‌کند:

Bentonite>Cloisite@Na<sup>+</sup>> Kaolinite> Cloisite@30B>  
 Cloisite@20A > Cloisite@15A  
 Cloisite@Na<sup>+</sup>> Cloisite@15A≥ Cloisite@20A≥  
 Cloisite@30B> Bentonite > Kaolinite

(۱) عدم حضور کربنات در نمونه نانورس:

(۲) حضور ۴٪ و یا ۸٪ کربنات در نمونه نانورس:

## مراجع

1. Lines, M. G., (2008), "Nanomaterials for practical functional uses", *Journal of Alloys and Compounds* 449, pp 242–245.
2. Krishna B. G. and Gupta, S. S., (2008), "Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: A review", *Advances in Colloid and Interface Science* 140, pp 114–131.
3. Kónyal, J. and Nagy, N. M. and Földvári, M., (2005), "The formation and production of nano and micro particles on clays under environmental-like conditions", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 79, pp 537–543.
4. Sevim, I. F. and Güner, G., (2005), "Investigation of rheological and colloidal properties of bentonitic clay dispersion in the presence of a cationic surfactant", *Progress in Organic Coatings*. 54 (1), pp 28-33.
5. Yong, R. N. and Phadangchewit, Y., (1993), "pH Influence on selectivity and retention of heavy metals in some clay soils", *Can. Geotech. J.*, pp 821-833.
6. Yong, R. N. and Warkentin, B. P. and Phadangchewit, Y. and Galvez, R., (1990) "Buffer capacity and lead retention in some clay minerals", *Water, Air, Soil, Pollution, J.*, 53, pp 53-67.
7. Tadros, Th. F., (1987), "*Solid/liquid dispersions*", Academic Press, London.
8. Luckham, P. F. and Rossi, S., (1999) "The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions", *Adv. Colloids Interface*. 82, pp 43-92.
9. Chen, G. and Han, N.B. and Yan, H., (1998), "Interaction of Cationic Surfactants with Iron and Sodium Montmorillonite Suspensions", *Colloid Interface Sci.* 201(2) pp 158-163.
10. Öztekin, N. and İşçi, S. and Güngör, N., (2002), "Effect of the adsorption of cetylpyridinium bromide on the flow behaviour of bentonite dispersions", *Mater. Lett.* 57 (3), pp 684-688.
11. Günister, E. and İşçi, S. and Alemdar, A. and Güngör, N., (2004), "The modification of rheologic properties of clays with PVA effect", *Mater. Sci.* 27, pp 101–106.
12. Sevim, İ. and Seniha, F. G., (2005), "Investigation of rheological and colloidal properties of bentonitic clay dispersion in the presence of a cationic surfactant", *Progress in Organic Coatings*. 54 (1), pp 28-33.
13. Yong, R. N. and Mohamed, A.M.O and Warketin, B. P., (1992), "Principles of contaminant transport in soils", *Elsevier, Holland*.
14. Yong, R. N., (2000), "Geoenvironmental engineering, contaminated soils, pollutant fate and mitigation", *CRC Press*.
15. Hesse, P. R., (1971), "A textbook of soil chemical analysis", *William Clowes and Sons*, 519p.
16. Eltantawy and Arnold, I.N. Eltantawy and Arnold, P.W., (1973), "Reappraisal of ethylene glycol mono-ethyl ether method for surface area estimation of clays", *Soil Sci.* 24, pp. 232–238.
17. Handershot, W. H., and Duquette, M., (1986), "A simple barium chloride method for determining cation exchange capacity and exchangeable cations", *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, pp. 605–608.
18. EPA, (1983), "Process design manual, land application of municipal sludge, Municipal Environmental Research Laboratory", EPA-625/1-83-016, U.S. *Government Printing Offices*, New York.

## واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. CEC
  2. SSA
  3. CPS
- شدت اشعه منعکس شده از نمونه در واحد زمان می‌باشد.