

Microstructural Investigation of Lead Ion Interaction with Sodium and Calcium Bentonite under Various Pore Fluid Conditions

Vahid Reza Ouhadi^{1*}, Ali Arvandi²

1. Professor, Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran and Adjunct Professor, School of Civil Engineering, University of Tehran.
2. Master Student, Environmental Eng. Department, University College of Omran Toseeh, Hamedan, Iran.

Abstract

This study investigates the microstructural interaction between the heavy metal contaminant lead and two types of bentonite: sodium bentonite and calcium bentonite. Calcium bentonite samples were prepared through homoionic treatment using calcium chloride followed by six stages of deionized water washing. Subsequently, these samples were modified with different concentrations of sodium chloride to assess the influence of monovalent and divalent cations in the pore fluid on the retention capacity of lead.

The treated bentonite samples were exposed to various concentrations of lead nitrate, then atomic absorption spectroscopy (AAS) and X-ray diffraction (XRD) analyses were performed. The results revealed that the calcium bentonite sample, subjected to six washes and modified with 100 cmol/kg-soil NaCl, exhibited the highest retention of lead, reaching complete retention up to the cation exchange capacity (CEC). At higher lead concentrations, this sample maintained superior performance compared to other configurations.

XRD results indicated that treated calcium bentonite displayed enhanced peak intensities, reflecting a more dispersed and homogeneous microstructure due to the presence of sodium ions. These structural characteristics allowed for better lead ion accommodation between clay platelets. Additionally, lead contamination led to a decrease in the plasticity index of the samples, although all remained within the CH (high plasticity clay) classification range.

Overall, the findings highlight the importance of both the type and concentration of cations in the double layer and pore fluid in optimizing the use of bentonite in engineered barriers for the containment of heavy metal pollutants in geoenvironmental applications..

Review History

Received: Jun 29/2025
Revised: Sep 11, 2025
Accepted: Sep 29, 2025

Keywords

Bentonite
Clay Double Layer
Heavy Metal Contaminant
XRD experiment

* Corresponding Author Email: vahidouhadi@ut.ac.ir & vahidouhadi@basu.ac.ir

ریزساختار اندرکنش سرب با بنتونیت سدیمی و کلسیمی در شرایط مختلف سیال منفذی

وحید رضا اوحدی^{۱*}، علی اروندی^۲

۱. استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان و عضو هیئت علمی وابسته دانشکده عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه عمران و توسعه، همدان.

چکیده

تاریخچه داوری

هدف این تحقیق، مطالعه ریزساختار اندرکنش آلاینده فلز سنگین سرب با بنتونیت سدیمی و بنتونیت کلسیمی و ارزیابی قابلیت نگهداری آلاینده توسط این نمونه‌های خاک است. نمونه‌های بنتونیت سدیمی با استفاده از محلول کلرید کلسیم به بنتونیت کلسیمی تبدیل شده و سپس با غلظت‌های مختلف کلرید سدیم اصلاح شده‌اند. سپس قابلیت نگهداری یون سرب برای همه نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است. همچنین برای کلیه نمونه‌ها آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) انجام شده است. نمونه‌های کلسیم بنتونیت شش بار آب‌شویی شده و اصلاح شده با ۱۰۰ cmol/kg-soil سدیم کلرید، بیشترین ظرفیت نگهداری آلاینده را از خود نشان داده است. همچنین بر اساس نتایج آزمایش‌های XRD، این نمونه‌ها به دلیل پراکندگی بیشتر پولک‌های رسی، شدت قله بزرگ‌تری نسبت به نمونه‌های دیگر داشته‌اند. افزایش قابلیت نگهداری فوق، به پراکندگی مناسب‌تر پولک‌های رسی و ساختار همگن‌تر خاک در نمونه همیونیک شده نسبت داده شده است. بر اساس تحلیل رفتار خمیری نمونه‌ها، حضور یون سرب سبب کاهش خاصیت خمیری آزمایش XRD نمونه‌های مورد مطالعه شده اما تأثیری بر طبقه‌بندی کلی خاک‌ها ایجاد نکرده است.

کلمات کلیدی

بنتونیت
لایه دوگانه رس
آلاینده فلز سنگین سرب
آزمایش XRD

۱- مقدمه

می‌شود. بنتونیت به علت دارا بودن مقدار زیادی کانی مونت‌موریلونیت^۱ با CEC و بار منفی زیاد در پروژه‌های ژئوتکنیک- زیست محیطی، مانند لایه‌های محافظ در مراکز دفن زباله، و سیستم‌های پوشاننده لایه‌های ژئوسینتتیک رس‌دار کاربرد فراوانی دارد (Yong, 2000). بنتونیت جزء کلیدی سیستم محافظتی مهندسی است زیرا دارای خواص جذبی مناسب، خاصیت خود ترمیمی مطلوب، هدایت هیدرولیکی کم و ظرفیت تبادل کاتیونی بزرگی بوده و ساختار لایه‌ای دارد (Yong and Mulligan, 2019). در مراکز دفن زباله، به‌منظور جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی و خاک زیر بستر دفن توسط شیرابه‌های حاوی فلزات، از

فلزات سنگین از جمله سرب، که در گروه آلاینده‌های غیرآلی قرار می‌گیرند، از متداول‌ترین مواد موجود در شیرابه‌ی زباله‌های صنعتی و معدنی‌اند (Ouhadi and Amiri, 2014; Wu et al., 2025). خاک‌های رسی به دلیل ساختار خاص، قادر به اندرکنش با آلاینده‌ها و جذب و نگهداری تمام یا قسمتی از آلاینده عبوری از خاک هستند. این قابلیت باعث می‌شود که جریان محلول آلاینده‌ی عبوری از خاک به آب زیر زمینی محدود شده یا با تأخیر صورت گیرد. بنابراین از خاک رس به عنوان یک نگهدارنده مناسب در طراحی مراکز دفن آلاینده‌ها و زباله‌های شهری و صنعتی استفاده

¹ Montmorillonite

* رایانامه نویسنده مسئول: vahidouhadi@ut.ac.ir و vahidouhadi@basu.ac.ir

کلسیمی را به علت پایداری بیشتر ساختار، برای بستر مراکز دفن مهندسی زباله توصیه کرده‌اند (Ouhadi et al., 2024). اصولاً فرایند اندرکنش آلاینده‌های فلز سنگین و کانی‌های رسی نیز تابعی از نوع کاتیون لایه دوگانه و نوع و غلظت کاتیون قلیایی موجود در سیال حفره‌ای است (Yang et al., 2024; Hmeid et al., 2025). با وجود تحقیقات وسیعی که در زمینه فرایند اندرکنش آلاینده فلز سنگین و پولک رسی انجام شده است در زمینه تأثیر نوع کاتیون لایه دوگانه رسی و نوع کاتیون قلیایی غالب در سیال حفره‌ای تحقیقات بسیار محدودی انجام شده است. بر این اساس هدف اصلی این تحقیق به مطالعه و تعیین ریزساختار اندرکنش سرب با بنتونیت سدیمی و کلسیمی در شرایط مختلف سیال منفذی معطوف شده است. برای دستیابی به این هدف، مجموعه‌ای از آزمایشات تعیین قابلیت نگهداری آلاینده و آزمایشات اشعه ایکس بر نمونه‌های بنتونیت همیونیک شده در حضور غلظت‌های مختلف نمک در سیال حفره‌ای انجام و نتایج مورد تجزیه و تحلیل و نتیجه‌گیری قرار گرفته است. نوآوری این تحقیق نسبت به تحقیقات دیگر محققین، تعیین تأثیر نوع کاتیون لایه دوگانه و خصوصیات سیال حفره‌ای بر میزان نگهداری آلاینده بر اساس نتایج آزمایش اشعه ایکس است.

۲- مواد و روش‌ها

نمونه‌ی رسی بنتونیتی مورد استفاده در این تحقیق بنتونیت تجاری، با نام "بنتونیت فلات ایران"، ارائه شده توسط شرکت تجاری "ایران باریت" است. این بنتونیت به صورت پودری سفید رنگ، مایل به شیری دیده می‌شود. مشخصات فیزیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی بنتونیت در جدول (۱) و (۲) آمده است (Ouhadi et al., 2012; Ouhadi and Deiranlou, 2017).

جدول ۱ ویژگی‌های ژئوتکنیکی بنتونیت مورد مطالعه

(Ouhadi et al., 2012)

مقدار	خصوصیات فیزیکی بنتونیت
76	Clay %
23	Silt %
1	Sand %
283	Plasticity index %
3.73	Activity
CH	Classification

لایه‌های رسی استفاده می‌شود. این لایه‌ها معمولاً از بنتونیت و به‌خصوص مونت‌موریلونیت تشکیل شده‌اند (Ouhadi and Goli, 2024). خاک‌های ریزدانه حاوی رس به علت سطح مخصوص ویژه بزرگ، هزینه‌ی کم، در دسترس بودن و وجود آن‌ها در اکثر مناطق، به عنوان مانع انتقال آلودگی مناسب در محیط‌زیست مورد استفاده قرار می‌گیرند (Abollino et al., 2003; Ouhadi et al., 2016). کاتیون‌های قلیایی از یک سو می‌توانند با همیونیک کردن بنتونیت، اندرکنش همگن آن با سیال حفره‌ای را فراهم کنند. از سوی دیگر حضور کاتیون‌های قلیایی سبب کاهش ضخامت لایه دوگانه بخش رسی بنتونیت می‌شود (Yong et al., 1996; Ouhadi and Yong, 2002). کاتیون قلیایی سدیم، بر پراکندگی پولک‌های رسی تأثیر ویژه‌ای دارد (Ouhadi, et al. 2017; Li et al., 2024). افزایش پراکندگی ذرات خاک در حالت وجود کاتیون سدیم را می‌توان به جایگزینی سدیم با شعاع هیدراته کوچکتر در مقایسه با بسیاری از کاتیون‌های یک ظرفیتی و دو ظرفیتی نسبت داد (Chen et al., 1990). در اثر این فرایند جایگزینی؛ ضخامت لایه دوگانه بخش رسی افزایش می‌یابد (Mitchell, 1993; Yong et al., 1993; Maio, 1996). اما در صورتی که غلظت یون سدیم از مقدار مشخصی که به نوع خاک و نوع منشأ آنیونی نمک سدیم بستگی دارد (Ouhadi and Goodarzi, 2003; Ouhadi et al., 2014; Zhu et al., 2025) بیشتر شود، ساختار خاک به سمت حالت ساختار توده‌ای پیش می‌رود (Maio, 1996).

در این حالت، به دلیل کاهش سطح مخصوص فعال، میزان اندرکنش ذرات رسی با مایع منفذی نیز کاهش می‌یابد. همچنین، بر اساس نظریه لایه دوگانه، در صورتی که کاتیون غالب در ساختار خاک ظرفیت بزرگتری داشته باشد، ضخامت لایه دوگانه کاهش بیشتری یافته و در نتیجه، ساختار خاک به حالت بسیار مجتمع تبدیل می‌شود. در حالت وجود کاتیون‌های دو ظرفیتی در لایه دوگانه، برگشت‌پذیری کاتیون‌هایی با ظرفیت بزرگتر از لایه دوگانه خاک به داخل سیال حفره‌ای کمتر است به‌طوری‌که نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که سرعت دفع یون‌های سدیم به الکترولیت آزاد سیستم رس، بسیار سریع‌تر از یون‌های دو ظرفیتی خواهد بود (Ouhadi and Goodarzi, 2003; Hmeid et al., 2025). تحقیقات اخیر استفاده از رس همیونیک بنتونیت

جدول ۲ مشخصات ژئوتکنیک زیست محیطی بنتونیت (Ouhadi et al., 2016)

مقدار	خصوصیات ژئوتکنیک
	زیست محیطی بنتونیت
9.5	pH (1:10; soil: water)
8	Carbonate content %
413	Surface area (m ² /kg. 10 ⁻³)
68.2	CEC (cmol/kg-soil)
Mineral composition Montmorillonite, Quartz, Calcite	

نیترا ت سرب شامل غلظت های 40, 80, 120, 200 cmol/kg-soil و 10 درون فالكون های ۵۰ سی سی با نسبت ۱:۲۰ آلوده شده است. سپس نمونه ها تا چهار روز، روزی ۲ ساعت توسط دستگاه لرزاندن الکتریکی به طور کامل همگن شدند و به مدت ۲۴ ساعت برای ایجاد شرایط تعادل نگهداری شده و سپس توسط دستگاه سانتریفیوژ در دور ۸۵۰۰ به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شدند. بعد از این مرحله، مقدار pH و EC نمونه ها اندازه گیری شدند. در انتها، غلظت یون سرب در فاز الکترولیک نمونه ها توسط دستگاه جذب اتمی OPTIMA 8300 مدل Perkin-Elmer در دانشگاه تربیت مدرس اندازه گیری شده است.

همچنین یک مجموعه آزمایش اشعه ایکس بر نمونه های بنتونیت طبیعی، کلسیم-بنتونیت ۶ بار آبشویی شده و کلسیم-بنتونیت ۶ بار آبشویی شده و اصلاح شده با سدیم انجام شده است. برای نمونه سازی، مقدار ۰/۲ گرم خاک مورد نظر را با ۴ سی سی آب مقطر درون فالكون ۱۵ سی سی ریخته و به مدت ۴ روز، روزی ۲ ساعت توسط لرزاندن الکتریکی مخلوط شده است. سپس توسط پیست پاستور تعداد ۸ قطره از سوسپانسیون ساخته شده بر روی لام شیشه ای ۲×۲ سانتی متری ریخته شد. در مرحله بعد لام های شیشه ای حاوی نمونه های مذکور به مدت یک روز برای خشک شدن، در داخل محیط آزمایشگاه قرار گرفتند و سپس با گام ۰/۰۳ در محدوده ۲θ و زاویه بین ۲ الی ۶۰ درجه توسط دستگاه XRD مدل Siemens-Diffractometer D8 Advance ساخت کشور آلمان تحت آزمایش قرار گرفتند.

۳- بحث و بررسی

از آن جا که بنتونیت دارای ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح مخصوص بزرگی است، غلظت های کم آلاینده را به طور کامل نگهداری خواهد کرد. از طرفی، انتظار می رود که با پراکنده نمودن ساختار خاک، میزان نگهداری فلز سنگین توسط خاک افزایش یابد (Yong and Mulligan, 2019). از این رو، پس از آماده شدن نمونه های اولیه، علاوه بر غلظت های کم آلاینده، غلظت سرب در محلول تا 200 cmol/kg-soil افزایش داده شده است. در شکل (۱) نمودار نگهداری آلاینده برای نمونه های سدیم بنتونیت، کلسیم بنتونیت و کلسیم بنتونیت حاوی دو غلظت متفاوت سدیم کلرید ارائه شده است. نمونه های کلسیم-بنتونیت پس از همیونیک

برای ساخت نمونه های همیونیک بنتونیت، سوسپانسیون بنتونیت در نسبت ۱:۲۰ از خاک مورد نظر به الکترولیت نمک CaCl₂ به میزان 280 cmol/kg-soil اضافه شد. برای حصول تعادل، فالكون حاوی نمونه ها در طول ۹۶ ساعت، و هر ۲۴ ساعت به مدت ۲ ساعت بر روی دستگاه لرزاندن الکتریکی (شیکر) قرار داده شدند. سپس لوله های فالكون با سرعت ۸۰۰۰ دور بر دقیقه سانتریفیوژ شدند و الکترولیت واقع در قسمت فوقانی فالكون از نمونه جدا شد. برای خروج نمک اضافی، به نمونه های خاک همیونیک شده ته نشین شده در لوله فالكون، آب مقطر اضافه شد. سپس فالكون حاوی نمونه، برای حصول شرایط تعادل بر شیکر قرار داده شد. پس از سانتریفیوژ کردن فالكون، الکترولیت از نمونه ته نشین شده جدا شد و سپس با اضافه نمودن آب مقطر به فالكون، این فرایند که به عنوان فرایند آبشویی تعریف شده است برای ۵ بار دیگر (در مجموع ۶ بار) تکرار شد. بر اثر فرایند آبشویی، نمک اضافی موجود در خاک (بخش قابل حل) از نمونه خارج شده و ساختار خاک برای نمونه همیونیک شده نیز به صورت ساختار پراکنده در می آید. به منظور مطالعه تأثیر حضور یون سدیم در فرایندهای مورد مطالعه، پس از تهیه نمونه همیونیک، به این نمونه ها غلظت های مختلف سدیم کلرید اضافه شده و پس از حصول شرایط تعادل، نمونه ها خشک شده اند.

آلاینده ی فلز سرب، مطابق روش تعادل مخلوط اشباع^۱، در غلظت های مختلف آلاینده و با نسبت ۱:۲۰ به نمونه های بنتونیت طبیعی، کلسیم-بنتونیت ۶ بار آبشویی شده و کلسیم-بنتونیت ۶ بار آبشویی شده و اصلاح شده با یون سدیم اضافه شده است. بدین منظور، خاک بنتونیت و کلسیم-بنتونیت ۶ بار آبشویی شده و همچنین کلسیم-بنتونیت ۶ بار آبشویی شده و اصلاح شده با سدیم، با محلول نیترا ت سرب Pb(NO₃)₂ با غلظت های مختلف

¹ Batch Equilibrium Test

کاتیونی مشهود شده است.

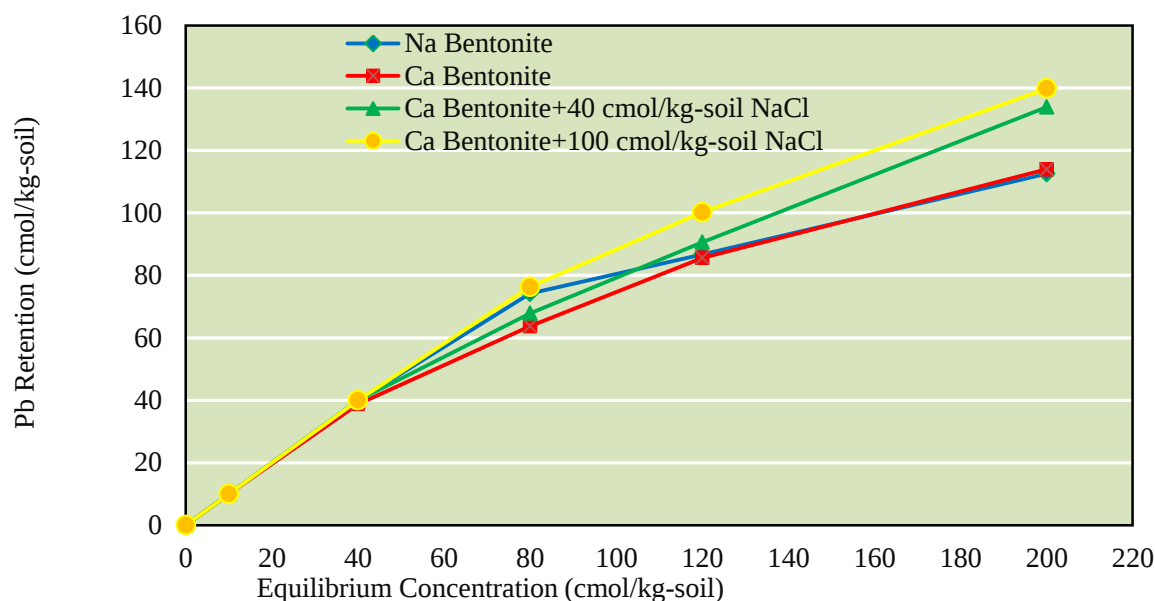
در نمونه‌ی کلسیم-بتونیت ۶ بار آب‌شویی شده و اصلاح شده با $100 \text{ cmol/kg-soil NaCl}$ مشاهده می‌شود که این نمونه غلظت سرب تا مرز CEC را به‌طور کامل نگهداری کرده و در غلظت $80 \text{ cmol/kg-soil Pb}$ حدود ۹۵٪ و در غلظت $120 \text{ cmol/kg-soil Pb}$ حدود ۹۰٪ و در غلظت $200 \text{ cmol/kg-soil Pb}$ نیز حدود ۷۰٪ از یون سرب موجود در سیال حفره‌ای را نگهداری نموده که بیشترین میزان نگهداشت آلایند سرب در بین حالت‌های موجود است. از سوی دیگر، پراش اشعه ایکس (XRD) یکی از روش‌هایی است که به‌طور گسترده برای شناسایی ریز ساختاری کانی‌های خاک و مطالعه ساختار آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Yong and Ouhadi, 1997; Ouhadi et al., 2021). از آن‌جا که نتایج آزمایش پراکنش اشعه ایکس نشان دهنده فاصله بین صفحات کانی‌های رسی است، نتایج این آزمایش در مورد خاک نشان دهنده تغییرات ایجاد شده در شرایط ریز ساختاری خاک خواهد بود (Ouhadi et al., 2024). شکل (۲) مقایسه شدت قله‌های نمونه بتونیت طبیعی و کلسیم-بتونیت ۶ بار آب‌شویی شده و اصلاح شده با $100 \text{ cmol/kg-soil NaCl}$ با غلظت $40 \text{ cmol/kg-soil Pb}$ را نمایش می‌دهد.

از نتایج ارائه شده در شکل (۲) مشاهده می‌شود که دو نمونه مقایسه شده با کمی تفاوت در شدت قله دارای مقادیر مشابهی در شدت قله اصلی نظیر کانی مونت‌موریلونیت هستند. در مقایسه نمونه خاک بتونیت طبیعی قرار گرفته در معرض $40 \text{ cmol/kg-soil Pb}$ با خاک تک کاتیون شده با کلسیم ۶ بار آب‌شویی شده و اصلاح شده با $100 \text{ cmol/kg-soil NaCl}$ قرار گرفته در معرض $40 \text{ cmol/kg-soil Pb}$ مشاهده می‌شود که شدت قله‌های نمونه بتونیت طبیعی حاوی سرب 746 CPS بوده است که شدت قله در نمونه‌ی کلسیم-بتونیت ۶ بار آب‌شویی شده و اصلاح شده با $100 \text{ cmol/kg-soil NaCl}$ حاوی سرب به 765 CPS افزایش یافته است. این موضوع بیانگر عملکرد جزئی بهتر نمونه‌های کلسیم-بتونیت ۶ بار آب‌شویی است. در واقع همگن‌سازی و هم‌یونیک‌سازی نمونه‌های بتونیت سبب شده است که حتی در غلظت‌های TDS زیاد نیز این نمونه‌ها اندرکنش نسبتاً مناسب‌تری با یون‌های فلز سنگین سرب نشان داده‌اند.

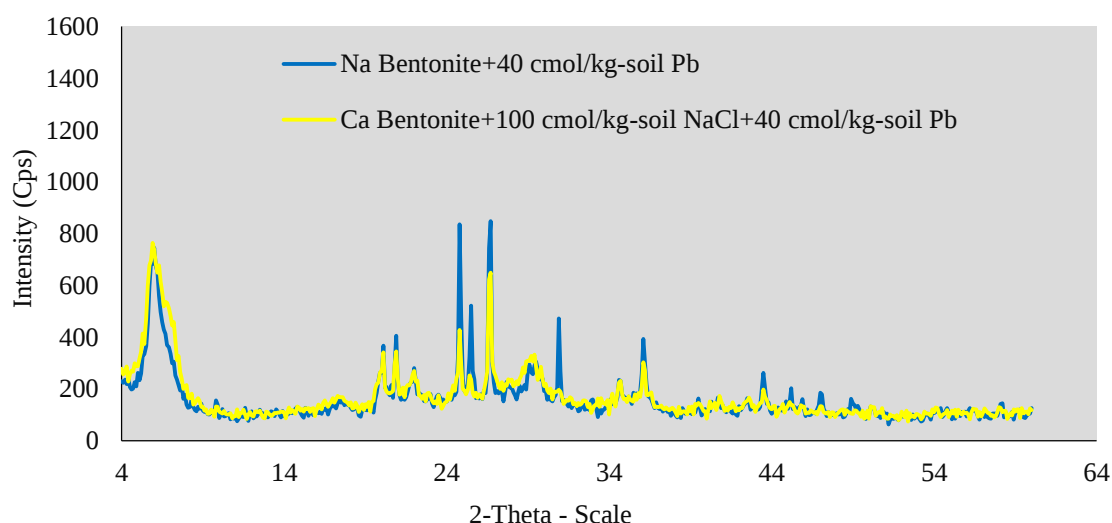
شدن، در ۶ مرحله آب‌شویی شده است تا نمک‌های قابل حل آن از محیط خارج شوند و سپس برای ادامه‌ی آزمایشات مورد استفاده قرار گرفته‌اند. البته لازم به تأکید است که شرایط آزمایشگاهی کنترل شده (آزمایش Batch Test) لزوماً بیانگر شرایط واقعی دفن (سیال حفره‌ای حاوی چند آلایند و pH متغییر) نیست. با این وجود، انجام این آزمایش امکان مقایسه خاک‌های با کانی‌های مختلف و یا شرایط اولیه مختلف در اندرکنش خاک و سیال حفره‌ای را فراهم می‌کند (Yong et al., 1992).

همان‌طور که در شکل (۱) مشخص است نمونه کلسیم-بتونیت ۶ بار آب‌شویی شده و اصلاح شده با $100 \text{ cmol/kg-soil NaCl}$ بیشترین میزان نگهداری را نسبت به نمونه‌های دیگر داشته است. این تغییرات را این‌گونه می‌توان تفسیر نمود که با تک کاتیون کردن خاک و ۶ بار آب‌شویی، ساختار خاک پراکنده شده است. سپس با حضور یون سدیم، ظرفیت جذب در عین ساختار کاملاً پایدار به علت قابلیت پراکنده‌سازی پولک‌ها توسط یون سدیم، افزایش یافته است. این نتیجه‌گیری با نتایج محققین قبلی نیز انطباق مناسبی دارد (Ouhadi and Goodarzi, 2003). البته میزان نگهداشت سرب برای همه نمونه‌ها تا $40 \text{ cmol/kg-soil Pb}$ یکسان بوده و با افزایش میزان سرب از نگهداری یون فلزی توسط نمونه‌ها کاسته شده است.

از داده‌های ارائه شده در شکل (۱) دو نتیجه کلی قابل حصول است: (۱) مکانیزم اثر کلرید سدیم بر پراکندگی تأثیر گذاشته و باعث می‌شود نگهداری یون سرب توسط خاک افزایش یابد. (۲) حضور کلرید کلسیم به دلیل این‌که شعاع هیدراته بزرگتری دارد باعث تسهیل در ورود یون سرب در لایه دوگانه بخش رسی شده است. وقتی به نمونه تک کاتیون شده با کلسیم، کلرید سدیم اضافه می‌شود ($\text{Ca Bentonite} + 100 \text{ cmol/kg-soil NaCl}$) در ابتدا با تسهیل زمینه برای پراکنده شدن خاک، نگهداری بیشتر یون سرب فراهم می‌شود. در نهایت می‌توان به این نتیجه رسید که تا زمانی که کربنات کلسیم موجود در خاک در نگهداری آلایند فلز سنگین عمل کرده است متحنی‌ها بر هم منطبق بوده‌اند و حضور نمک قلیایی تأثیری بر جذب نداشته است ولی بعد از این‌که نقش کربنات کلسیم بر نگهداری آلایند فلز سنگین به اتمام رسیده است و فاز نگهداری آلایند توسط ظرفیت تبادل کاتیونی وارد عمل شده است تأثیر حضور نمک قلیایی در تغییرات ظرفیت تبادل



شکل ۱: بررسی میزان نگهداری آلاینده فلز سنگین سرب در چهار نمونه بنتونیت، کلسیم- بنتونیت ۶ بار آبشویی شده و کلسیم- بنتونیت ۶ بار آبشویی شده و اصلاح شده با ۱۰۰ cmol/kg-soil NaCl و ۴۰ cmol/kg-soil NaCl



شکل ۲: مقایسه شدت قله‌های نظیر نمونه‌های بنتونیت طبیعی و کلسیم- بنتونیت ۶ بار آبشویی شده و اصلاح شده با ۱۰۰ cmol/kg-soil NaCl و قرار گرفته در معرض ۴۰ cmol/kg-soil Pb

در شکل (۳) مقایسه تغییرات شدت قله نظیر نمونه بنتونیت در نمونه کلسیم- بنتونیت ۶ بار آبشویی شده و کلسیم- بنتونیت ۶ بار آبشویی شده و اصلاح شده با ۴۰ cmol/kg-soil NaCl و قرار گرفته در معرض ۴۰ cmol/kg-soil Pb مشاهده می‌شود که شدت قله اصلی نظیر مونت موریلونیت در نمونه کلسیم- بنتونیت حاوی سرب ۱۵۰۰ CPs بوده است که شدت قله در نمونه کلسیم- بنتونیت ۶ بار آبشویی شده و اصلاح شده با ۴۰ cmol/kg-soil NaCl حاوی سرب به ۱۳۰۰ CPs کاهش یافته است. به نظر می‌رسد دلیل کاهش شدت قله در نمونه حاوی سدیم به علت غلظت زیاد نمک‌های قابل حل در سیال منفذی بوده است

در شکل (۳) مقایسه تغییرات شدت قله نظیر نمونه بنتونیت در نمونه کلسیم- بنتونیت ۶ بار آبشویی شده و کلسیم- بنتونیت ۶ بار آبشویی شده و اصلاح شده با ۴۰ cmol/kg-soil NaCl پس از قرار گرفتن در معرض غلظت ۴۰ cmol/kg-soil Pb سرب نشان داده شده است.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۳) مشاهده می‌شود که دو نمونه مقایسه شده دارای تفاوت قابل توجهی در شدت قله اصلی نظیر مونت موریلونیت هستند. در مقایسه‌ی نمونه‌ی خاک کلسیم- بنتونیت ۶ بار آبشویی شده قرار گرفته در معرض

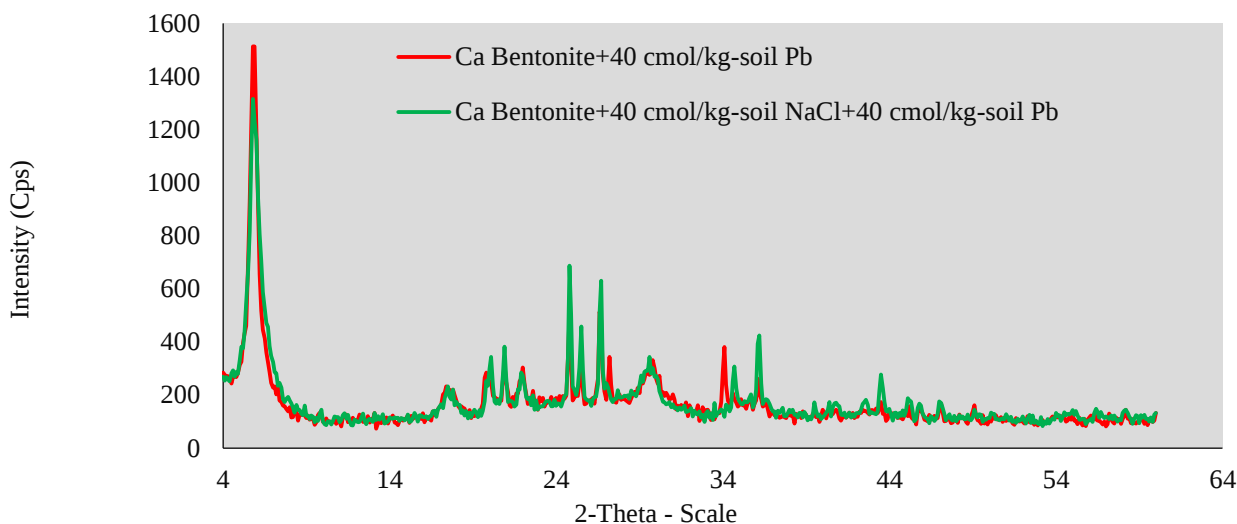
ساختار فلوکوله در نمونه‌های سرب سبب کاهش شدت قله نظیر مونت‌موریلونیت با افزایش غلظت سرب شده است. همچنین جابه‌جایی موقعیت قله اصلی به دلیل قرار گرفتن کاتیون‌ها در بین لایه‌های پولک مونت‌موریلونیت است.

در شکل (۴) مقایسه شدت قله‌های نمونه بتونیت طبیعی و نمونه‌های بتونیت طبیعی حاوی دو غلظت متفاوت سرب ارائه شده است.

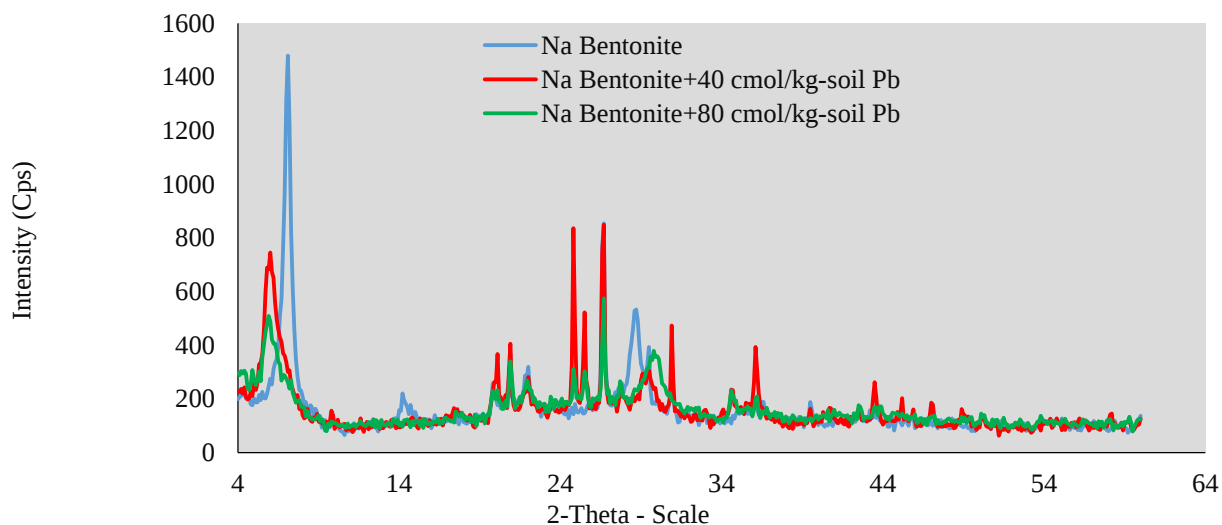
بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۵)، امکان مقایسه شدت قله‌های نظیر کانی مونت‌موریلونیت در نمونه کلسیم-بتونیت ۶ بار آب‌شویی شده حاوی غلظت‌های مختلف سرب و بدون سرب فراهم شده است.

که حضور سدیم اضافی باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه و کاهش شدت اشعه منعکس شده است. همچنین وجود یون کلسیم در لایه دوگانه بخش رسی نمونه بتونیت باعث ایجاد ساختار همگن و پایدار در بخش رسی شده است که این نتیجه نیز در آزمایش جذب اتمی سبب افزایش قابلیت نگهداری آلاینده توسط نمونه فوق شده بود.

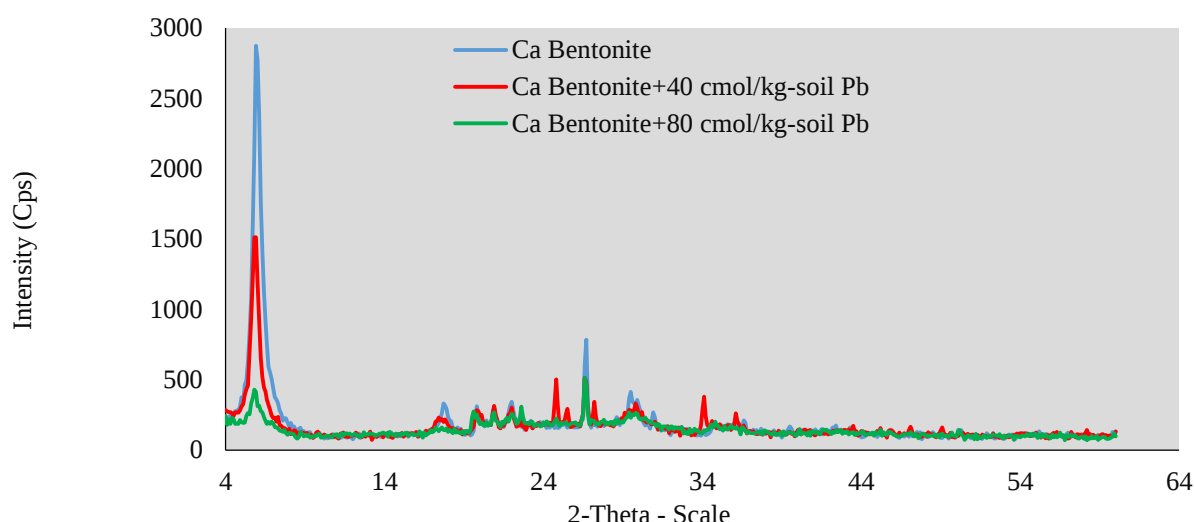
بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۴)، تغییر قابل توجه در شدت قله‌های نظیر کانی مونت‌موریلونیت در خاک بتونیت طبیعی بدون سرب نسبت به خاک بتونیت طبیعی با غلظت‌های مختلف سرب مشاهده می‌شود. اضافه شدن یون سرب به منظور آلوده کردن خاک به دلیل دو ظرفیتی بودن، سبب کوچک شدن ضخامت لایه دوگانه و ساختار فلوکوله در بخش رسی نمونه شده است. ایجاد



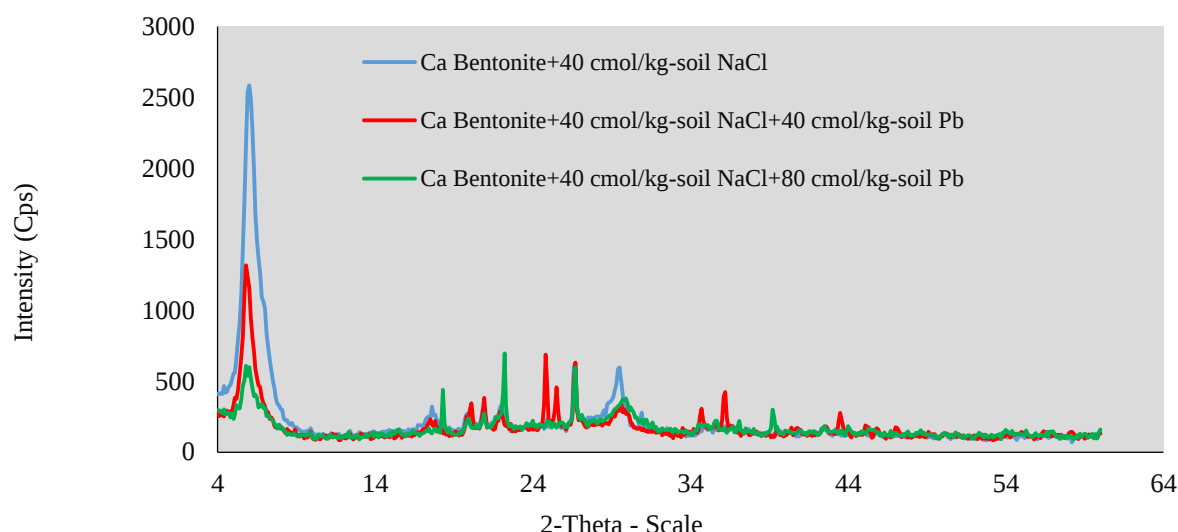
شکل ۳: مقایسه شدت قله‌های نظیر نمونه کلسیم-بتونیت ۶ بار آب‌شویی شده و نمونه کلسیم-بتونیت ۶ بار آب‌شویی شده و اصلاح شده با 40 cmol/kg-soil NaCl پس از قرار گرفتن در معرض 40 cmol/kg-soil Pb



شکل ۴: مقایسه شدت قله‌های نظیر کانی‌های مختلف در نمونه بتونیت طبیعی حاوی غلظت‌های مختلف سرب و بدون سرب



شکل ۵: مقایسه شدت قله‌های نظیر کانی‌های موجود در نمونه کلسیم- بنتونیت ۶ بار آب‌شویی شده حاوی غلظت‌های مختلف سرب و بدون سرب



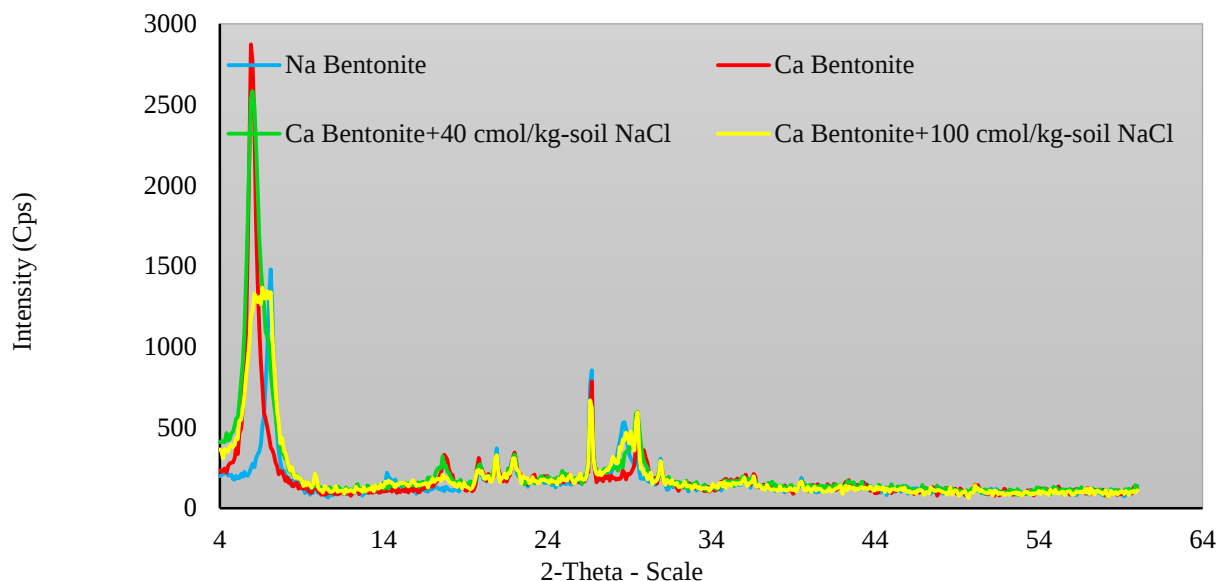
شکل ۶: مقایسه شدت قله‌های نظیر کانی‌های موجود در نمونه‌ی کلسیم- بنتونیت ۶ بار آب‌شویی شده و اصلاح شده با 40 cmol/kg-soil NaCl حاوی غلظت‌های مختلف سرب و بدون سرب

نمونه کلسیم-بنتونیت ۶ بار آب‌شویی شده و اصلاح شده با 40 cmol/kg-soil NaCl با غلظت‌های مختلف سرب و بدون سرب را نشان می‌دهد.

در شکل (۶) تغییر در شدت قله خاک کلسیم- بنتونیت ۶ بار آب‌شویی شده و اصلاح شده با 40 cmol/kg-soil NaCl بدون سرب نسبت به خاک کلسیم- بنتونیت ۶ بار آب‌شویی شده و اصلاح شده با 40 cmol/kg-soil NaCl با غلظت‌های مختلف سرب مشاهده می‌شود. مقایسه شکل‌های (۵) و (۶) نشان می‌دهد که عمل‌آوری نمونه‌های کلسیم-بنتونیت با ۶ بار آب‌شویی شده با غلظت 40 cmol/kg-soil NaCl سبب شده است که نمونه مونت‌موریلونیت پراکندگی مناسب‌تری پیدا کند. این موضوع از

بر اساس نتایج فوق در این نمونه‌ها نیز حضور یون سرب سبب ایجاد ساختار فلوکوله و کاهش شدت قله اصلی نظیر مونت‌موریلونیت شده است. عدم تغییر در مقدار d در نمونه‌های شکل (۵) را می‌توان به شعاع هیدراته نسبتاً مشابه سرب و کلسیم نسبت داد. این عدم تغییر در فاصله اصلی نظیر کانی مونت‌موریلونیت اثبات‌کننده حصول ریزساختار پایدارتر در نمونه‌های کلسیم بنتونیت در مقایسه با نمونه بنتونیت طبیعی (سدیم بنتونیت) است. این نتایج با نتایج ارائه شده توسط دیگر محققین نیز انطباق مناسبی دارد (Wang et al., 2020; Ouhadi et al., 2021).

شکل (۶) مقایسه شدت قله‌های نظیر کانی‌های موجود در



شکل ۷: مقایسه شدت قله‌های نظیر کانی‌های مختلف در نمونه‌های بنتونیت طبیعی، کلسیم-بنتونیت ۶ بار آب‌شویی شده، کلسیم-بنتونیت ۶ بار آب‌شویی شده و اصلاح شده با 40 cmol/kg-soil NaCl و کلسیم-بنتونیت ۶ بار آب‌شویی شده و اصلاح شده با 100 cmol/kg-soil NaCl بدون سرب

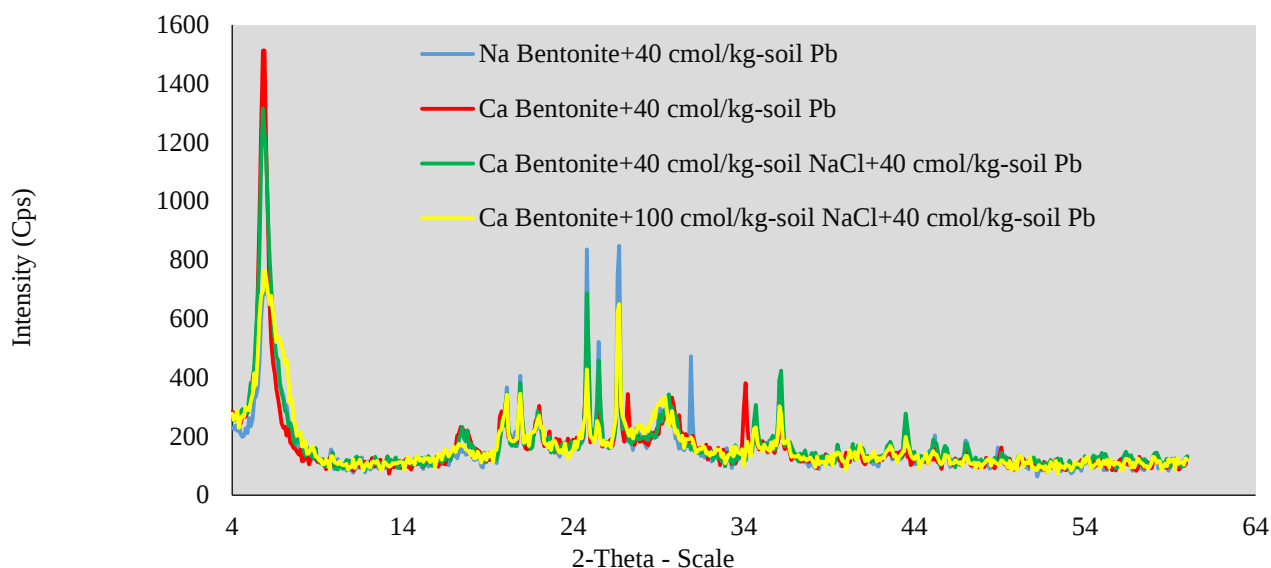
و اثر غلظت یون سدیم بر کاهش ضخامت لایه دوگانه بر رفتار ریزساختاری خاک حاکم شده است. از سوی دیگر، بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۸) نمونه کلسیم-بنتونیت ۶ بار آب‌شویی شده پس از اندرکنش با نیترات سرب در مقایسه با دیگر نمونه‌ها از شدت قله اصلی بیشتری برای کانی مونت‌موریلونیت برخوردار است. این تغییرات نیز به پایداری بهتر ساختار کلسیم-بنتونیت ۶ بار آب‌شویی در اندرکنش با آلایند فلز سنگین نسبت داده می‌شود. ضمن آن‌که نمونه‌های کلسیم-بنتونیت ۶ بار آب‌شویی شده و قرار گرفته در معرض 100 cmol/kg-soil NaCl و 40 نیز نسبت به بنتونیت طبیعی، شدت قله اصلی بیشتری را برای مونت‌موریلونیت نشان داده‌اند. این موضوع نیز بیانگر عملکرد بهتر نمونه‌های کلسیم-بنتونیت ۶ بار آب‌شویی است.

در واقع همگن‌سازی و همیونیک‌سازی نمونه بنتونیت سبب شده است که حتی در غلظت‌های TDS زیاد نیز این نمونه‌ها اندرکنش مناسب‌تری با یون‌های فلز سنگین سرب نشان دهند و متعاقب این اندرکنش، تغییر ریزساختاری کمتری در این نمونه‌ها رخ دهد. ضمن آن‌که نمونه‌های کلسیم-بنتونیت ۶ بار آب‌شویی به‌علت داشتن فاصله پایه بزرگتر برای کانی مونت‌موریلونیت امکان مناسب‌تری برای جذب یون‌های سرب داشته است و یون‌های سرب بدون تغییر در فاصله اصلی نظیر کانی مونت‌موریلونیت، با سهولت بیشتری بین لایه‌های پولک رسی نگهداری شده‌اند.

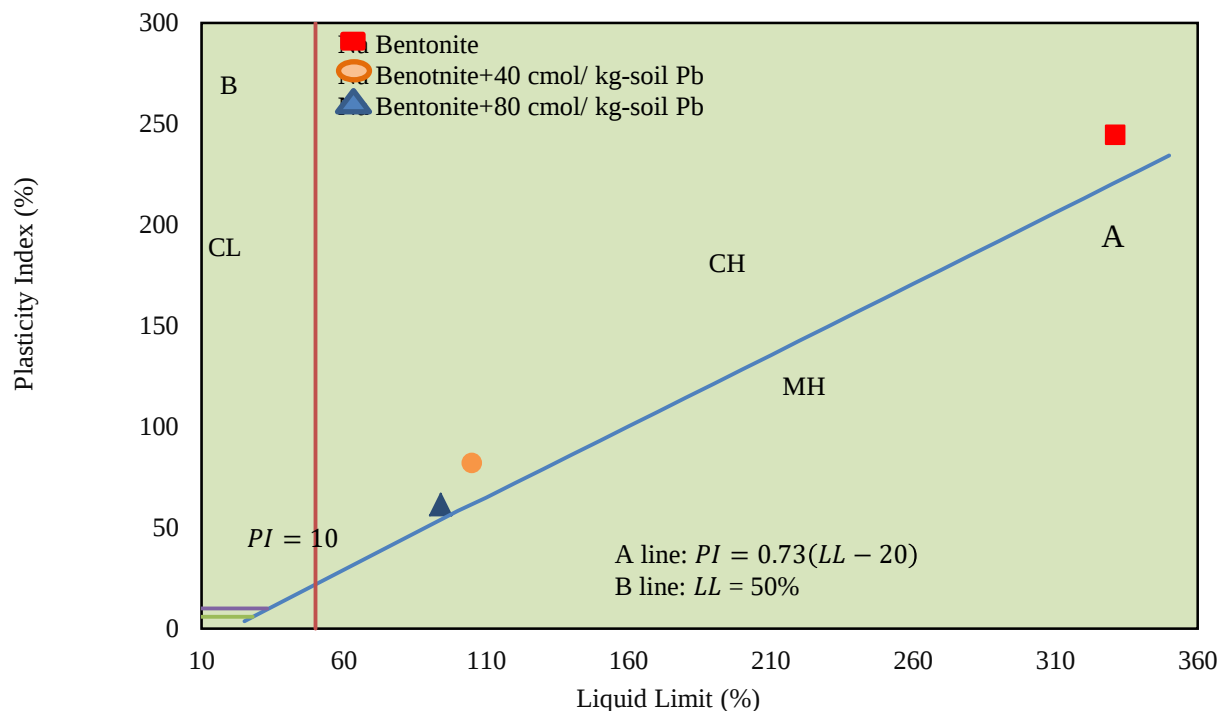
شدت بیشتر قله‌های دوم و سوم نظیر مونت‌موریلونیت در شکل (۶) قابل نتیجه‌گیری است.

در شکل‌های (۷) و (۸) نیز شدت قله نمونه‌های بنتونیت طبیعی، کلسیم-بنتونیت ۶ بار آب‌شویی شده، کلسیم-بنتونیت ۶ بار آب‌شویی شده و اصلاح شده با 40 cmol/kg-soil NaCl و کلسیم-بنتونیت ۶ بار آب‌شویی شده و اصلاح شده با 100 cmol/kg-soil NaCl فاقد سرب و در حضور سرب ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه در شکل (۷)، نمونه کلسیم-بنتونیت ۶ بار آب‌شویی شده در مقایسه با نمونه بنتونیت طبیعی، برای قله اصلی نظیر مونت‌موریلونیت، شدت بیشتری نشان داده است. این افزایش در شدت قله به حصول ساختار همگن‌تر و نیز پراکندگی نمونه کلسیم-بنتونیت بعد از ۶ بار آب‌شویی نسبت داده می‌شود. نمونه‌های کلسیم-بنتونیت ۶ بار آب‌شویی شده با قرار گرفتن در معرض غلظت‌های 100 cmol/kg-soil NaCl و 40، شدت قله کمتری را نشان داده‌اند. در واقع پس از ۶ بار آب‌شویی نمونه کلسیم-بنتونیت، اضافه نمودن غلظت کلرید سدیم سبب کاهش ضخامت لایه دوگانه‌ی خاک و در نتیجه کاهش شدت قله‌ی اصلی نظیر کانی مونت‌موریلونیت شده است.

به‌بیان دیگر بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۷) از آن‌جا که یون سدیم اضافه شده به نمونه کلسیم-بنتونیت ۶ بار آب‌شویی شده قادر به جایگزینی کل یون‌های کلسیم لایه دوگانه نشده است، پراکندگی قابل توجهی در نمونه کلسیم-بنتونیت ایجاد نکرده است



شکل ۸: مقایسه شدت قله‌های نظیر کانی‌های مختلف در نمونه‌های بنتونیت طبیعی، کلسیم-بنتونیت ۶ بار آب‌شویی شده، کلسیم-بنتونیت ۶ بار آب‌شویی شده و اصلاح شده با ۴۰ cmol/kg-soil Pb و کلسیم-بنتونیت ۶ بار آب‌شویی شده و اصلاح شده با ۱۰۰ cmol/kg-soil NaCl حاوی ۴۰ cmol/kg-soil Pb



شکل ۹: نمودار طبقه‌بندی خاک بنتونیت طبیعی در حضور غلظت‌های مختلف سرب و بدون سرب

در واقع هریک از نمونه‌های مورد مطالعه مورد تعیین مقادیر حد روانی و دامنه خمیری قرر گرفته و نتایج بدست آمده در شکل ۹ نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۹ نمونه بنتونیت طبیعی به دلیل داشتن مقادیر یزرگ حد روانی و دامنه خمیری در ناحیه CH از نمودار کاساگرانده قرار گرفته‌اند. بر اساس نظریه لایه دوگانه انتظار می‌رود که بر اثر حضور آلایند فلز سنگین در تماس با پولک‌های رسی، ضخامت لایه دوگانه کاهش

از سوی دیگر، تحقیقات گذشته نشان داده‌اند که طبقه‌بندی خاک معیار مناسبی برای ارزیابی قابلیت خاک در اندرکنش با آلاینده‌های زیست‌محیطی است. بر این اساس در شکل ۹، طبقه‌بندی خاک بنتونیت طبیعی، کلسیم-بنتونیت ۶ بار آب‌شویی شده و کلسیم-بنتونیت ۶ بار آب‌شویی شده و اصلاح شده با سدیم در حضور سرب و بدون سرب با یکدیگر مقایسه شده است.

۱۰۰ cmol/kg-soil از کلرید سدیم اصلاح شده بود، بیشترین ظرفیت نگهداری سرب را در مقایسه با دیگر نمونه‌ها از خود نشان داد. این افزایش قابلیت نگهداری، به پراکندگی مناسب‌تر پولک‌های رسی و ساختار همگن‌تر خاک نسبت داده شد. براساس تحقیق حاضر، نمونه کلسیم-بتونیت ۶ بار آب‌شویی شده و اصلاح شده با ۱۰۰ cmol/kg-soil NaCl، غلظت سرب تا مرز CEC را به‌طور کامل نگهداری کرده و در غلظت ۸۰ cmol/kg-soil Pb حدود ۹۵٪، در غلظت ۱۲۰ cmol/kg-soil Pb حدود ۹۰٪ و در غلظت ۲۰۰ cmol/kg-soil Pb نیز حدود ۷۰٪ از یون سرب موجود در سیال حفره‌ای را نگهداری نموده که بیشترین میزان نگهداشت آلایند سرب در بین نمونه‌های خاک‌های مورد مطالعه است. نتایج آزمون‌های اشعه ایکس (XRD) نیز مؤید افزایش شدت قله‌ها و بهبود ریزساختار در نمونه‌های بتونیت کلسیمی اصلاح شده با سدیم کلرید بوده‌است. همچنین نتایج بیانگر آن است که افزودن یون سرب به نمونه‌ها، به دلیل کاهش ضخامت لایه دوگانه، منجر به کاهش شدت قله‌های مونت‌موریلونیت شده و ساختار خاک را به سمت فلوکوله شدن سوق داده است. در نهایت، بررسی رفتار خمیری نمونه‌ها نیز نشان داد که هرچند فلز سنگین سبب کاهش خاصیت خمیری خاک شده است، اما طبقه‌بندی آن‌ها در محدوده خاک‌های رسی با خاصیت خمیری زیاد (CH) باقی مانده است. این نتایج ضمن تأیید کارایی بتونیت همیونیک‌شده در شرایط مختلف آلایند، نشان‌دهنده اهمیت نوع کاتیون و غلظت نمک در طراحی موانع ژئوتکنیک زیست‌محیطی برای مدیریت پسماندهای صنعتی و آلایند‌های فلزی است.

یافته که این موضوع از یکسو سبب کاهش حد روانی و در نتیجه باعث کاهش دامنه خمیری نمونه رسی می‌شود. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۹، وجود فلز سنگین از خاصیت خمیری خاک کاسته است اما در طبقه‌بندی خاک تأثیری نداشته است. به‌طوری‌که در دامنه غلظت فلز سنگین مورد مطالعه، طبقه‌بندی هر سه نمونه مورد مطالعه کماکان در محدوده خاک‌های CH قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود نمونه حاوی ۸۰ cmol/kg-soil Pb به خط A نزدیک‌تر است که این امر نشان می‌دهد غلظت بزرگتر سرب تغییرات بیشتری در رفتار خاک ایجاد کرده است و شرایط لازم برای تغییر رفتار خاک از رفتار خاک‌های رسی به سمت رفتار رس لاغر و رفتار لای را فراهم کرده است. در واقع در حالی که بر اساس نتایج ارائه شده در شکل‌های قبل، با وجود اندرکنش آلایند فلز سنگین و بخش رسی بتونیت اگرچه قله‌های نظیر اسمکتیت کماکان قابل رویت هستند لیکن کاهش شدت قله اصلی نظیر اسمکتیت با کاهش دامنه خمیری نمونه و ایجاد ساختار فولوکوله در نمونه انطباق مناسبی دارد.

۴- نتیجه‌گیری

اصلی‌ترین نوآوری این تحقیق، تعیین اثر نوع کاتیون لایه دوگانه و خصوصیات سیال حفره‌ای بر قابلیت نگهداری آلایند بر اساس نتایج آزمایش اشعه ایکس است. نتایج این تحقیق نشان داد که نوع کاتیون موجود در سیال منفذی و نحوه آماده‌سازی نمونه‌های بتونیت تأثیر قابل‌توجهی بر میزان نگهداری آلایند فلز سنگین سرب دارد. نمونه‌های بتونیت کلسیمی که به‌صورت همیونیک تهیه و شش بار آب‌شویی شده و سپس با غلظت

References

- Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M. Sarzanini, C., and Mentasti, E., 2003. Adsorption of heavy metals on Na-montmorillonite. Effect of pH and organic substances. Water research, 37(7), 1619-1627.
- Chen J.S., Cushman J.H. and Low P.F. 1990. Rheological Behavior of Na- Montmorillonite Suspension at Low Electrolyte Concentration", Clay and Clay Mineral; 38(1), 57-62.
- Hmeid, H.A., Akodad, M., Halim, M.E., Omdi, F.E., Baghour, M., Skalli, A., Sadik, C., Gueddari, H., Chahban, M., Yousfi, Y.E., M., Abioui, Daoudi, L., 2025. Comparative analysis of Na⁺ and Ca²⁺ ion effects on the physical-chemical properties of Bentonite: Implications for industrial applications, Ore and Energy Resource Geology, Vol. 18, 100095,
- Li, W., Ting, M.Z.Y., Qin, J., Yi, Y., 2024. Effects of seawater on properties of bentonite cut-off walls with/without cement addition, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 178 (3), 393-404.
- Maio, C., 1996. Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects. Geotechnique; 46, 695-707.
- Mitchell, J. K., 1993. Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Ouhadi, V.R., and Yong, R.N., 2002. Study of transformation of clay minerals in the interaction process with additives by use of scanning electron

- microscope and XRD and its relation to mechanical behavior. Iran. J. Crystallogr. Mineral, 10(1), 87-97
- Ouhadi, V.R., and Goodarzi, A.R., 2003. Pore fluid characteristics effect on the dispersivity behaviour of soils from macro and micro structure aspects, Proceedings of the 2nd international symposium on contaminated sediments, 200-206.
- Ouhadi, V.R., Bayesteh, H., and Pasdarpour, M., 2012. Analysis of dispersivity behavior of clay minerals by fuzzy computational system and experimental methods Journal of dispersion science and technology, 33(3), 420-428.
- Ouhadi, V.R., Amiri, M., Hamidi, S., 2014. Dispersive soil improvement with lime, special attention to the reduction of peak intensity of clay minerals in XRD analysis. Modares Journal of Civil Engineering, 14, 2.
- Ouhadi, V.R., Bahadorinezhad, O.R., and Amiri, M., 2014. Lead Retention of Carbonated Kaolinite in the Adsorption and Electrokinetics Processes. Modares Journal of Civil Engineering 14 (3)
- Ouhadi V.R., and Amiri, M., 2014. Interaction of nano-clays and Cu contaminant in geo-environmental projects, Journal of Environmental Science and Technology, 16 (160), 75-87.
- Ouhadi, V. R., Amiri, M., and Zangane, M., 2016. Microstructural assessment of lime consumption rate and pozzolanic reaction progress of a lime-stabilized dispersive soil. Modares Civil Engineering journal, 16(1), 11-22.
- Ouhadi V.R., Hamidi, S., and Amiri, M., 2016. Impact of heavy metal contaminants on coefficient of variations of compression index, expansion index and permeability coefficient of bentonite from micro-structural point of view, Journal of Civil and Environmental Engineering 45 (81), 7-17
- Ouhadi, V. R., Fakhimjoo, M. S., and Omid Naeini, S.T., 2017. The comparison of plastic and permeability behavior of bentonite in the presence of organic and heavy metal contaminants. Journal of Civil and Environmental Engineering, 46(85), 25-36.
- Ouhadi, V. R., and Deiranlou, M., 2017. Development and validation of the modified barium chloride method for CEC measurement and determination of accurate exchangeable calcium cation concentration in carbonated clayey soils, Modares Civil Engineering journal, 17(3), 21- 34.
- Ouhadi, V. R., Yong, R. N., and Deiranlou, M., 2021. Enhancement of Cement-Based Solidification/Stabilization cement-based solidification/stabilization of a lead-contaminated smectite clay, Journal of Hazardous Materials, 403, 123969.
- Ouhadi V. R., Farahpour M.A., Faridi F., and Gohari S., 2024. Determination of surface potential of kaolinite for selection of optimal enhancement pattern for removal of heavy metal contaminant in electrokinetics remediation. Sharif Journal of Civil Engineering. 20.
- Ouhadi, V.R. and Goli, M., 2024. Pore fluid dielectric constant effect on geotechnical and geo-environmental properties of smectite and kaolinite, Soil and Sediment Contamination: An International Journal 33 (8), 1526-1548
- Wang, F., Shen, Z., Liu, R., and et al. 2020. GMCs stabilized/solidified Pb/Zn contaminated soil under different curing temperature: Physical and microstructural properties Chemosphere, 239, (Article 124738).
- Wu, Z.Q., Li, H.Y., Lü, L.Y., Liang, G.J., Wu, T.T., Zhu, J.X., 2025. Distributions and risk assessment of heavy metals in solid waste in lead-zinc mining areas and across the soil, water body, sediment and agricultural product ecosystem in their surrounding areas, China Geology, Vol. 8, 92-106.
- Yang, X., Zhou, Y., Hu, J., Zheng, Q., Zhao, Y., Lv, G., Liao, L., 2024. Clay minerals and clay-based materials for heavy metals pollution control, Science of The Total Environment, Vol. 954, 176193.
- Yong R. N., Galvez-Cloutier R., and Phadungchewit Y., 1993. Selective sequential extraction analysis of heavy-metal retention in soil. Canadian Geotechnical Journal, 30(5):834-847 <https://doi.org/10.1139/t93-074>
- Yong, R.N., Ouhadi, V.R., and Mohamed, A.M.O., 1996. Physicochemical evaluation of failure of stabilized marl soil, Proceedings of the 49th Canadian geotechnical conference frontiers in geotechnology, 2, 769-776
- Yong, R.N., and Ouhadi, V.R., 1997. Reaction factors impacting on instability of bases on natural and lime-stabilized marls, Special Lecture, Keynote Paper, International Conference on Foundation Failures, Singapore, 135, 87-97
- Yong R.N., 2000. Contaminated soils, pollutant fate and mitigation. In: CRC press, New York,
- Yong R.N., and Mulligan, C.N., 2019. Natural and Enhanced Attenuation of Contaminants in Soils, Second Edition, CRC Press.
- Zhu, K., He, Y., Zhang, K., Cui, Y.J., 2025. Effects of wetting-drying cycles and NaCl solution on the hydro-mechanical behaviour and microstructure of compacted red clay-bentonite mixtures, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.