

اثر آلاینده فلز سنگین بر ضریب تغییرات مقادیر شاخص تراکم، شاخص انبساط، و ضریب نفوذپذیری بنتونیت از منظر ریزساختاری

وحیدرضا اوحدی^{۱*}، صلاح‌الدین حمیدی^۲ و محمد امیری^۳

^۱ استاد گروه عمران، دانشگاه بوعلی سینا همدان

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا همدان

^۳ استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دپارتمان مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان

چکیده

در طراحی‌های پروژه‌های ژئوتکنیک زیست‌محیطی، استفاده از نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک و به طور خاص ضریب نفوذپذیری، به طور مستقیم بر نتایج طراحی اثرگذار است. به عبارتی یکی از مهمترین پارامترهای مورد نظر در طراحی مراکز دفن زباله و هسته سدهای خاکی، نشست‌پذیری، نفوذپذیری و میزان انتقال آب در خاک است. از سوی دیگر در پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه پروژه‌های ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی به صورت خاص به نوع کانی رسی و تغییرات خصوصیات سیال حفره‌ای و میزان تأثیر این دو پارامتر بر خصوصیات خاک و خطاهای آزمایش‌ها توجه خاصی صورت نگرفته است. بر این اساس در پژوهش حاضر، تأثیر حضور آلاینده فلز سنگین بر خطای مقادیر شاخص تراکم (نشانه فشردگی)، شاخص انبساط (نشانه تورم) و ضریب نفوذپذیری بنتونیت (با کانی غالب مونت‌موریلونیت) از منظر ریزساختاری مورد مطالعه قرار گرفته‌است. در این راستا حدود ۱۰۰ آزمایش تحکیم و حدود ۱۰۰ آزمایش جذب اتمی انجام شده‌است. آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های رسی بنتونیت حاوی غلظت‌های مختلف آلاینده فلز سنگین سرب انجام شده‌است. همچنین برای ارزیابی تأثیر تغییر مشخصات سیال حفره‌ای بر پارامترها و خطاهای آزمایش‌های مکانیک خاک از منظر ریزساختاری، آزمون ارزیابی پراش پرتو ایکس (XRD) و تصویر میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) از نمونه‌ها تهیه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. از مهمترین نتایج این پژوهش می‌توان به وابستگی قابل توجه ضریب نفوذپذیری به خصوصیات الکترولیت آب حفره‌ای اشاره نمود، به نحوی که حضور 40 cmol/kg-soil آلاینده فلز سنگین سرب میزان ضریب نفوذپذیری نمونه رسی را حدود ۱۰۰۰ برابر افزایش داده‌است. همچنین تغییرات خصوصیات آب حفره‌ای که سبب تغییر در خصوصیات لایه دوگانه می‌شود، بر میزان ضریب تغییرات (CoV) آزمایش‌های مورد بررسی تأثیر قابل توجهی ای داشته‌است. به نحوی که حضور 40 cmol/kg-soil آلاینده فلز سنگین سرب میزان ضریب تغییرات آزمایش نفوذپذیری را از ۱۷.۷٪ به ۹.۸٪ کاهش داده‌است.

واژگان کلیدی: سیال حفره‌ای، کانی‌های رسی، نفوذپذیری، ضریب تغییرات (CoV)، XRD، SEM.

۱- مقدمه

تغییرپذیری در نتایج آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گیرد [۱-۶]. در این زمینه محققین مختلف با استفاده از پارامتر ضریب تغییرات^۱ (CoV)، بر تأثیر تغییرپذیری خاک‌های مناطق مختلف جهان بر نتایج آزمایش‌های مختلف مکانیک خاک، مطالعات قابل توجهی انجام داده‌اند. بر این اساس پژوهشگران برای آزمایش‌های مختلف مکانیک خاک بازه تغییراتی برای CoV خاک‌های مناطق مختلف، ارائه کرده‌اند [۷-۱۱].

از سوی دیگر، کنترل شیرابه‌های مراکز دفن زباله فلزات سنگین یکی از مشکلات متداول محیط زیست و ژئوتکنیک زیست‌محیطی در سراسر جهان بوده‌اند. آلاینده‌های فلز سنگین

استفاده از نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک یکی از پایه‌های اصلی در انجام تحقیقات آزمایشگاهی و مدل‌سازی نظری در پروژه‌های ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی می‌باشد. اندازه خطاهای آزمایش‌های مکانیک خاک بر قابل اعتماد بودن نتایج و تحقیقات انجام شده تأثیر مستقیم می‌گذارد. میزان این خطاها به طور مستقیم بر نتایج طراحی و به خصوص نتایج طراحی انتقال آلودگی در مراکز دفن زباله و نفوذپذیری در هسته سدهای خاکی تأثیرگذار است. چون تنوع در خواص خاک در هر پروژه به طور جدایی‌ناپذیری به سایت و به زمین‌شناسی منطقه-ای خاص، مربوط می‌شود، برای طراحی مناسب، باید تحلیل‌های ریسک و عدم قطعیت در منطقه انجام شود و ضرایب

1- Coefficient of variations

۲- مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تأثیر خصوصیات الکترولیت آب حفره‌ای از نمونه رسی بنتونیت حاوی غلظت‌های مختلف آلاینده فلز سنگین سرب استفاده شده است. علت انتخاب نمونه رسی بنتونیت، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و مساحت سطح مخصوص قابل توجه آن است. به طوری که این موضوع سبب شده است تغییر خصوصیات آب حفره‌ای در بنتونیت، تغییرات مشهود در پارامترهای این خاک را به دنبال داشته و باعث قضاوت صحیح‌تر در خصوص اثر تغییر مشخصات آب حفره‌ای بر خطاهای آزمایش‌های ژئوتکنیکی شود. نمونه رسی بنتونیت مورد استفاده در این تحقیق بنتونیت تجاری، با نام بنتونیت «فلات ایران»، ارائه شده توسط شرکت تجاری «ایران باریت» بوده است. مشخصات ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی نمونه رسی بنتونیت در جدول (۱) نشان داده شده است در راستای دستیابی به اهداف این تحقیق، بر اساس مقدار درصد کربنات و ظرفیت تبادل کاتیونی نمونه رسی بنتونیت، سه غلظت مختلف (کم، متوسط و زیاد) آلاینده نیترات سرب ($Pb(NO_3)_2$) استفاده شده است. این ترکیب‌ها به صورت ذیل مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

(۱) بنتونیت + $10 \text{ cmol/kg-soil } (Pb(NO_3)_2)$ (غلظت کم)
 (۲) بنتونیت + $40 \text{ cmol/kg-soil } (Pb(NO_3)_2)$ (غلظت متوسط): در حدود مقدار آلاینده قابل نگهداری توسط فاز کربنات خاک (با فرض آن که هر یک درصد کربنات موجود در خاک قابلیت نگهداری حدود 5 cmol/kg-soil آلاینده سرب را دارد).

(۳) بنتونیت + $80 \text{ cmol/kg-soil } (Pb(NO_3)_2)$ (غلظت زیاد): حدود مجموع آلاینده قابل نگهداری توسط فاز کربنات و ظرفیت تبادل کاتیونی بنتونیت.

بخش اعظم آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق بر اساس استاندارد ASTM و دستورالعمل انجام آزمایش‌های ژئوتکنیک زیست‌محیطی دانشگاه مک‌گیل کانادا صورت گرفته است [۱۷]، [۱۸]. برای تعیین درصد کربنات خاک، از روش تیتراسیون استفاده شده است [۱۹]. همچنین به منظور تعیین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC)، از محلول باریت کلراید استفاده شد [۲۰]. از سوی دیگر رفتار قابلیت جذب آلاینده نمونه رسی بنتونیت، از طریق انجام آزمایش تعادل مخلوط اشباع مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور با انجام آزمایش تعادل سوسپانسیون اشباع خاک در غلظت‌های مختلف آلاینده فلز

معمول در خاک‌ها عمدتاً شامل سرب، روی، مس، جیوه، کروم و کادمیم هستند [۱۲، ۱۳]. 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 [۱۲-۱۴]. نتایج پژوهش‌های محققین نشان می‌دهد که به دلیل حساسیت زیاد کانی‌های رسی، با افزایش کانی‌های رسی میزان خطاها نیز در آزمایش‌های مکانیک خاک افزایش می‌یابد. همچنین تغییر خصوصیات الکترولیت آب حفره‌ای موجب تغییر خصوصیات خاک‌ها می‌شود [۱۵، ۱۶].

نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که علی‌رغم خطاهای متعارف موجود در نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک، درصد و مقدار کانی‌های رسی می‌تواند در افزایش ضریب تغییرات (CoV) نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک تأثیر قابل توجهی داشته باشد [۱۶]. با وجود تحقیقات مختلفی که در زمینه تعیین حدود خطاهای آزمایش‌های مکانیک خاک انجام شده است به نظر می‌رسد در زمینه تأثیر تغییر مشخصات سیال حفره‌ای بر قابلیت اعتماد نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک تحقیقات محدودی صورت گرفته است. اهمیت این موضوع از منظر ژئوتکنیک و ژئوتکنیک زیست‌محیطی ضرورت انجام مطالعات پژوهشی در این موضوع را ایجاب می‌کند. در واقع تغییر خصوصیات الکترولیت آب حفره‌ای سبب تغییر در خصوصیات لایه دوگانه، تغییر پتانسیل سطحی رس و سایر خصوصیات پولک رسی می‌شود، که این تغییرات باعث تغییر در پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌ها و همچنین تغییر در روند تغییر خطا در نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک می‌شود.

بر این اساس در این تحقیق به منظور مطالعه تأثیر مشخصات سیال حفره‌ای بر خصوصیات خاک و خطای نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک، نمونه رسی بنتونیت حاوی غلظت‌های مختلف (کم، متوسط و زیاد) آلاینده فلز سنگین سرب مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است. در این پژوهش تلاش شده است که با مطالعه ریزساختاری تأثیر تغییر مشخصات سیال حفره‌ای بر ساختار خاک توسط آزمون پراش پرتو ایکس و تصویر میکروسکوپ الکترونی پویشی، اثر تغییرات ریزساختاری بر خطاهای آزمایشگاهی نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

سنگین، قابلیت نگهداری فلز سنگین در نمونه‌ها مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفت [۱۲، ۲۱]. به منظور انجام این آزمایش-ها، در ابتدا محلول‌های شامل نیترات سرب ($Pb(NO_3)_2$) در غلظت‌های ۰، ۵، ۱۰، ۲۵، ۴۰، ۸۰، ۵۰ و ۱۰۰ $cmol/kg-soil$ تهیه شد. یک گرم خاک خشک با دقت 0.001 گرم وزن شده و داخل تیوپ سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتر ریخته شد. سپس ۵۰ میلی‌لیتر از الکترولیت مورد نظر به خاک اضافه شد. 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 rpm ۳۰۰۰، 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 شده است [۱۲، ۱۸].

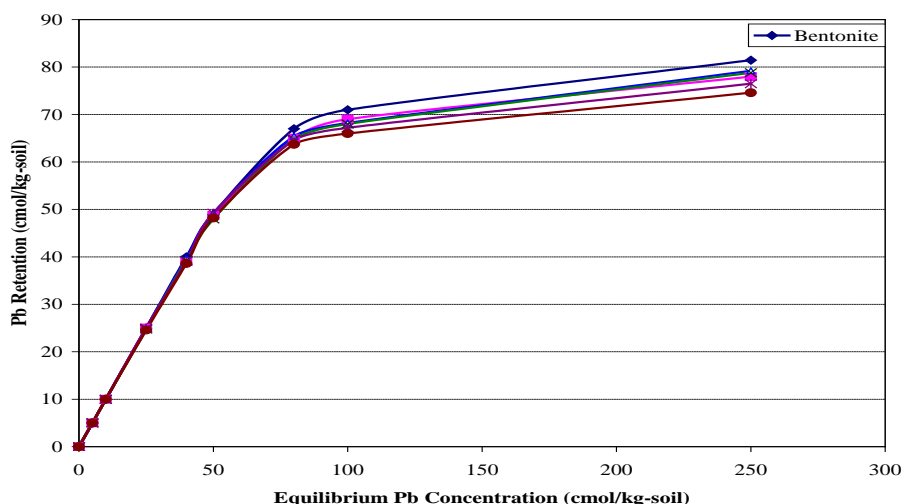
شایان ذکر است در پایان هر مرحله برای تهیه نمونه‌های پراش پرتو ایکس (XRD) و تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM)، یک گرم خاک خشک با دقت 0.001 گرم وزن شده و داخل تیوپ سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتر ریخته شد. سپس بعد از اضافه نمودن ۵۰ میلی‌لیتر از الکترولیت مورد نظر به خاک، این سوسپانسیون الکترولیت- خاک به مدت سه ساعت توسط لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شد. آنگاه پس از نگهداری نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت با هدف ایجاد شرایط تعادل، این

۳- بحث و بررسی

نمونه رسی بنتونیت به دلیل حضور کربنات در آن، ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد و سطح مخصوص قابل توجه، قابلیت نگهداری بالای آلاینده فلز سنگین را دارد. شکل (۱) منحنی قابلیت نگهداری آلاینده فلز سنگین سرب را توسط نمونه رسی بنتونیت نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود تا غلظت $cmol/kg-soil$ ۲۵، نمونه رسی بنتونیت قابلیت نگهداری کامل آلاینده را دارد. در غلظت $cmol/kg-soil$ ۴۰، ظرفیت قابل نگهداری در کلیه نمونه‌های مورد بررسی بین $cmol/kg-soil$ ۳۷ تا ۴۰ بوده است. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، در غلظت $cmol/kg-soil$ ۸۰ آلاینده ورودی میزان قابلیت نگهداری در حدود ۶۴٪ هست.

جدول ۱- مشخصات ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی نمونه رسی بنتونیت

مشخصات فیزیکی	بنتونیت	مشخصات ژئوتکنیک زیست‌محیطی	بنتونیت
رس (/)	۷۶	pH	۹/۹
لای (/)	۲۳	درصد کربنات	۸
حد روانی (/)	۳۱۸/۹	درصد مواد آلی	۰
حد خمیری (/)	۳۴/۷	سطح مخصوص (m^2/g)	416 ± 5
شاخص خمیری (/)	۲۸۴/۲	Na^+ ($cmol/kg-soil$)	۴۰/۸
G_s	۲/۷۹	Ca^{+2}	۷/۵۵
طبقه‌بندی	CH	Mg^{+2}	۱/۴۶
رس	۷۶	K^+	۰/۴۲
لای	۲۴	CEC ($cmol/kg-soil$)	۵۰/۲۳
رنگ	شیری	X Ray نتایج: d_{001}	$A^{\circ} 12/40$
مونت‌موریلونیت، کوآرتز، کلسیت		ترکیب کانی	



شکل ۱- منحنی‌های قابلیت نگهداری آلاینده فلز سنگین سرب توسط نمونه رسی بنتونیت در چندین آزمایش تکراری

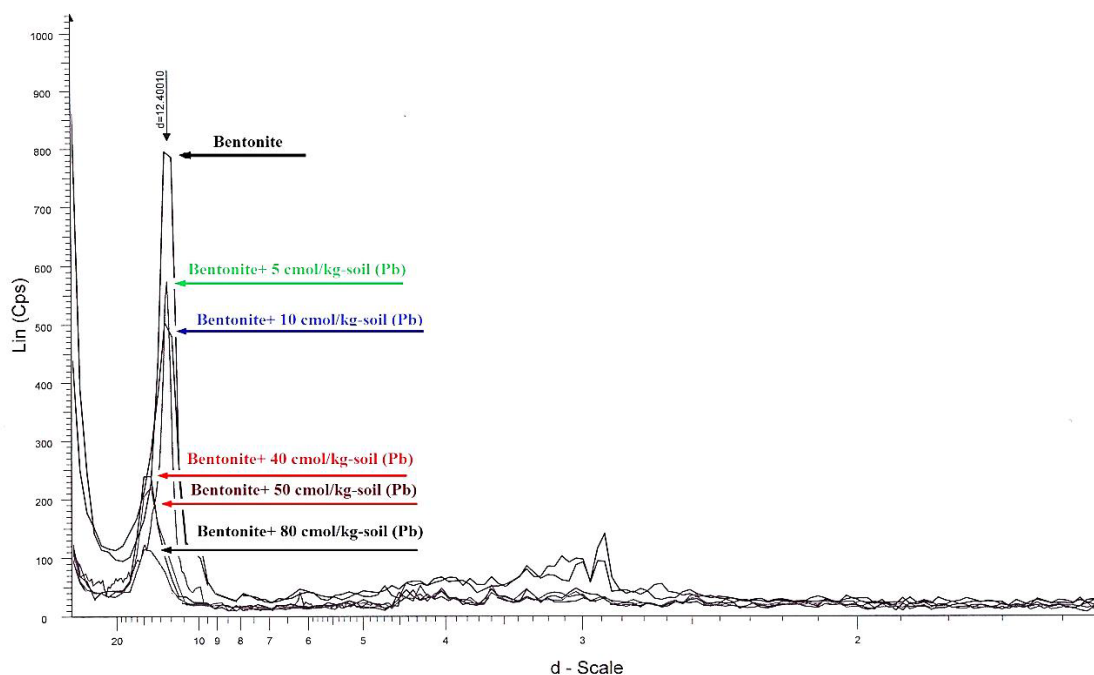
نمونه‌ها، پراش پرتو ایکس و تصویر میکروسکوپ الکترون پویشی از نمونه‌ها تهیه شده است.

فرایند اندرکنش خاک-آلودگی به واسطه تأثیر نهادن بر نیروهای بین پولک‌ها سبب تغییر در ریزساختار خاک‌های رسی می‌شود [۱۲، ۱۳، ۲۲]. ارزیابی پراش پرتو ایکس به عنوان یک معیار در تعیین ریز ساختار خاک‌ها شناخته شده است. به طوری که پراش پرتو ایکس نمونه‌های رسی دارای ساختار پراکنده دارای شدت بیشتری در مقایسه با شدت قله طیف اشعه ایکس نمونه‌های رسی دارای ساختار درهم است. شکل (۲) نتایج آزمایش پراش اشعه ایکس را برای نمونه رسی بنتونیت قبل از اندرکنش با آلودگی و نمونه رسی بنتونیت حاوی غلظت‌های مختلف آلاینده نیترات سرب را نشان می‌دهد.

در جدول (۲) ضریب تغییرات (CoV) جذب آلاینده فلز سنگین ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده، در غلظت‌های کمتر از ۴۰ cmol/kg-soil در کلیه نمونه‌ها فرایند نگهداری آلاینده به صورت کامل انجام شده است. به همین دلیل ضریب تغییرات به صفر نزدیک شده است. اما از سوی دیگر در غلظت‌های زیاد آلاینده فلز سنگین به دلیل این که در کلیه نمونه‌ها سایت‌های تبادلی به طور کامل وارد واکنش نمی‌شوند و همچنین میزان آلاینده ورودی بیش از قابلیت نگهداری خاک است، بر این اساس میزان ضریب تغییرات در نمونه‌ها افزایش یافته است. به نحوی که در غلظت ۴۰ cmol/kg-soil آلاینده ورودی ضریب تغییرات به ۲/۴۸٪ و در غلظت ۱۰۰ cmol/kg-soil آلاینده ورودی به حدود ۵/۵٪ رسیده است. برای بررسی ریزساختاری نمونه‌ها و تأثیر حضور آلاینده فلز سنگین بر روی

جدول ۲- نتایج آماری آزمایش‌های جذب، تحکیم و نفوذپذیری نمونه رسی بنتونیت با غلظت‌های مختلف آلاینده فلز سنگین سرب

نمونه رسی بنتونیت	ضریب تورم (Cc)	ضریب فشردگی (Cc)	نگهداری آلاینده	ضریب نفوذپذیری k (cm/sec)
متوسط (Mean)	۰/۱۲۴	۰/۴۷۹	۰	$۳/۷۳ \times ۱۰^{-۹}$
ضریب تغییرات (COV%)	۹/۸۰	۱۰/۲۶	۰	۱۷/۷۴
Bentonite+10 cmol/kg-soil				
متوسط (Mean)	۰/۱۰۸	۰/۳۸۰	۱۰	$۲/۳ \times ۱۰^{-۸}$
ضریب تغییرات (COV%)	۴/۴۳	۷/۹۰	۰/۰۱	۱۴/۰۲
Bentonite+40 cmol/kg-soil				
متوسط (Mean)	۰/۰۷۱	۰/۲۹۱	۳۹/۲۸	$۶/۵۲ \times ۱۰^{-۷}$
ضریب تغییرات (COV%)	۲/۹۷	۵/۲۸	۱/۲۸	۹/۸۷
Bentonite+80 cmol/kg-soil				
متوسط (Mean)	۰/۰۵۱	۰/۲۱۰	۶۴/۰۸	$۲/۱۰ \times ۱۰^{-۶}$
ضریب تغییرات (COV%)	۹/۴۳	۸/۶۳	۲/۴۸	۱۹/۰۵



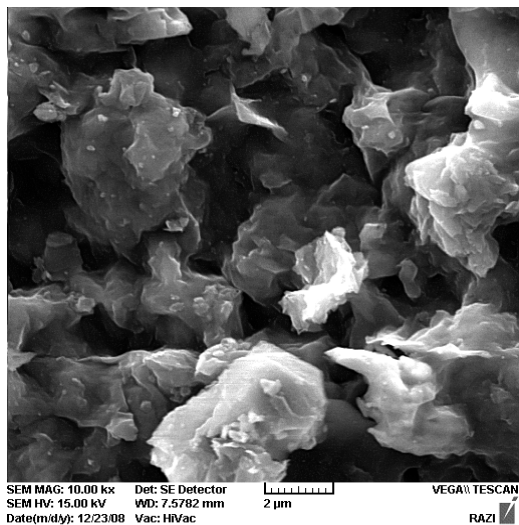
شکل ۲- ارزیابی پراش پرتو ایکس نمونه‌های رسی بنتونیت حاوی غلظت‌های مختلف آلاینده فلز سنگین سرب

حفرات سطحی می‌باشد. پس از اضافه کردن ۲۵ cmol/kg-soil آلاینده فلز سنگین سرب به نمونه رسی، ساختار نمونه رسی به وضوح به حالت در هم تغییر یافته است که وجود حفرات در سطح نمونه ناشی از توده‌ای شدن ساختار خاک است (شکل ۳-ب). بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۳-ب) حضور آلاینده فلز سنگین و تغییر خصوصیات الکترولیت آب حفره‌ای باعث فعال شدن سایت‌های تبادل رسی بنتونیت شده و با پوشش پولک‌های رسی توسط رسوبات کربناتی، کاهش نیروی دافعه بین ذرات و کاهش ضخامت لایه دوگانه ساختار نمونه به حالت درهم تغییر پیدا کرده است. از این نتایج متعاقباً در تفسیر داده‌های اخذ شده از مطالعات آزمایشگاهی استفاده خواهد شد. از سوی دیگر به منظور ارزیابی تأثیر مشخصات سیال حفره-ای بر نتایج آزمایشات تحکیم، مجموعه‌ای از آزمایشات تحکیم در حضور سه غلظت الکترولیت آب حفره‌ای چندین بار مورد انجام قرار گرفت. در آزمایش‌های انجام شده بر روی بنتونیت در حضور آلاینده فلز سنگین سرب، آزمایش‌های تحکیم در غلظت‌های مختلف الکترولیت آب حفره‌ای بیش از ۱۰ بار تکرار شده است. بخشی از منحنی‌های آزمایش تحکیم نمونه‌های بنتونیت خالص، بنتونیت حاوی ۱۰ cmol/kg-soil آلاینده فلز سنگین سرب، بنتونیت حاوی ۴۰ cmol/kg-soil آلاینده فلز سنگین سرب، و بنتونیت حاوی ۸۰ cmol/kg-soil آلاینده فلز سنگین سرب در شکل‌های (۴-الف) تا (۴-د) ارائه شده است.

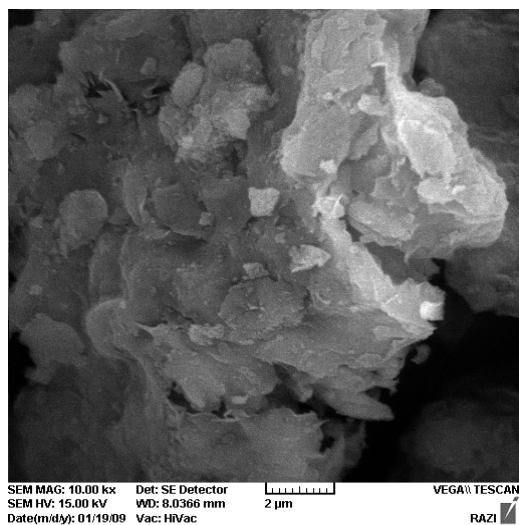
بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۲) با افزایش غلظت آلاینده سرب، شدت قله اصلی (مونت‌موریلونیت) از ۸۰۰ Cps به ۱۲۰ Cps برای نمونه حاوی ۸۰ cmol/kg-soil کاهش یافته است. این موضوع تأیید کننده این نکته است که افزایش غلظت نمک سیال منفذی موجب تشکیل ساختار مجتمع در نمونه‌ها شده که در نتیجه آن شدت قله نظیر اصلی کانی کاهش یافته است.

بررسی منحنی پراش پرتو ایکس ارائه شده در شکل (۲) نشان می‌دهد که افزایش ۵ cmol/kg-soil آلاینده فلز سنگین سرب میزان شدت قله کانی مونت‌موریلونیت را به حدود ۵۰۰ Cps کاهش داده است. این در حالی است که افزایش غلظت سیال حفره‌ای به حدود ۴۰ cmol/kg-soil تا ۵۰ cmol/kg-soil (حدود غلظت آلاینده قابل نگهداری توسط فاز کربنات خاک) با افت شدید شدت قله نظیر کانی مونت‌موریلونیت همراه بوده است، به نحوی که شدت قله کانی مونت‌موریلونیت به حدود ۲۰۰ Cps کاهش یافته است. این موضوع را می‌توان به پوشش پولک‌های رسی توسط رسوبات کربناتی فلز سنگین نسبت داد.

برای بررسی روند تغییرات ریزساختاری نمونه‌های رسی در حضور غلظت‌های مختلف سیال حفره‌ای، تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) از نمونه‌ها تهیه شد. همان‌طور که بر اساس ریخت‌شناسی نمونه رسی بنتونیت در شکل (۳-الف) قابل مشاهده است، نمونه رسی بنتونیت دارای ساختار لایه‌ای و فاقد

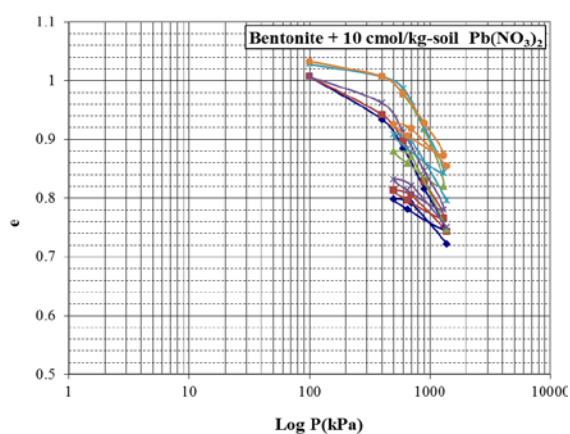


(ب)

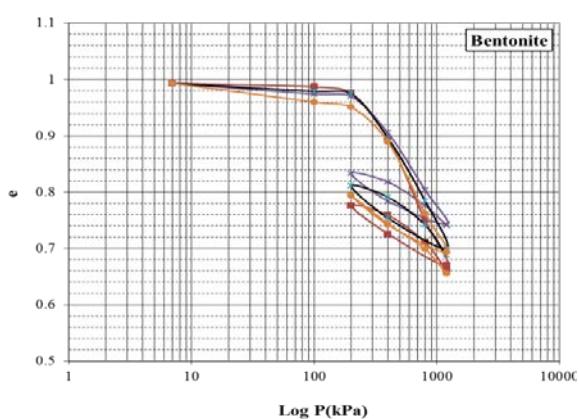


(الف)

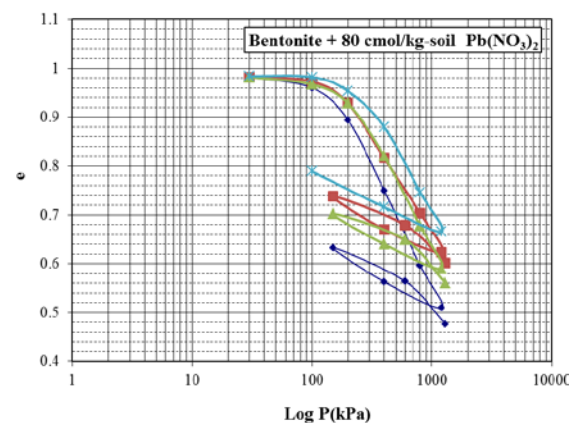
شکل ۳- الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی پوشی نمونه رسی بنتونیت با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر، ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی پوشی نمونه رسی بنتونیت حاوی 25 cmol/kg-soil آلاینده فلز سنگین سرب با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر



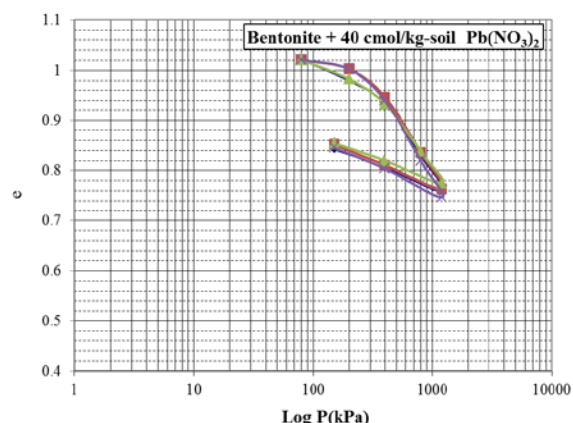
(ب)



(الف)



(د)

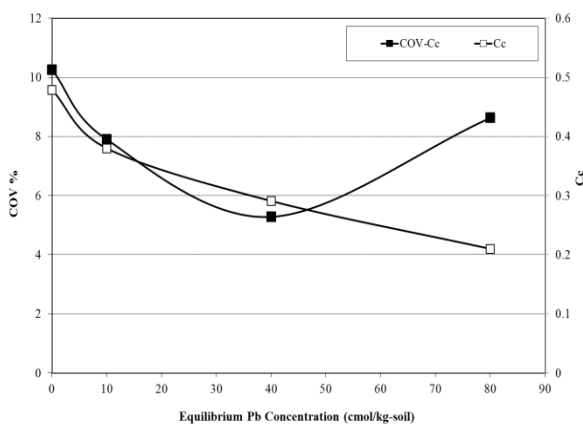


(ج)

شکل ۴- الف) نتایج آزمایش‌های تحکیم بنتونیت در چندین آزمایش تکراری، ب) نتایج آزمایش‌های تحکیم بنتونیت حاوی 10 cmol/kg-soil آلاینده فلز سنگین سرب در چندین آزمایش تکراری، ج) نتایج آزمایش‌های تحکیم بنتونیت حاوی 40 cmol/kg-soil آلاینده فلز سنگین سرب در چندین آزمایش تکراری، د) نتایج آزمایش‌های تحکیم بنتونیت حاوی 80 cmol/kg-soil آلاینده فلز سنگین سرب در چندین آزمایش تکراری

هنوز همه فاز تبدالی در جذب آلاینده عمل نکرده است این کاهش شدت قله به علت پوشش پولک‌های رسی با رسوب کربناتی است. به نظر می‌رسد همین موضوع سبب شده‌است تا میزان خطاهای اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های تحکیم به کمترین مقدار خود رسیده‌است.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل‌های (۵) و (۶) با افزایش میزان غلظت سیال حفره‌ای به بیش از مقادیر نظیر قابلیت نگهداری آلاینده در خاک، میزان ضریب تغییرات (CoV) در پارامترهای شاخص تراکم و شاخص انبساط افزایش یافته‌است. بر اساس نتایج آزمایش پراش اشعه ایکس با افزایش میزان غلظت الکترولیت آب حفره‌ای از 50 cmol/kg-soil به 80 cmol/kg-soil و 100 cmol/kg-soil میزان تغییرات شدت قله کانی رسی مونت‌موریلونیت زیاد نبوده‌است. از سوی دیگر با توجه به حدود ظرفیت تبادل کاتیونی مونت‌موریلونیت پیش‌بینی می‌شود که در غلظت بین 40 cmol/kg-soil تا 50 cmol/kg-soil اکثر سایت‌های تبادل کاتیونی در فرایند نگه‌داشت شرکت کرده باشند. بر این اساس پیش‌بینی می‌شود که در غلظت‌های زیاد الکترولیت، فرایند پوشش کامل پولک‌های رسی با رسوب در نمونه رخ دهد. در آزمایش تحکیم احتمالاً این رسوب‌ها که دارای چگالی بزرگ‌تری نسبت به خاک می‌باشند در صورت تجمع در یک نقطه خاص از نمونه می‌توانند، مانند عدسی‌های ماسه‌ای عمل کنند و به دلیل تغییر سرعت تحکیم در نقاط مختلف و ایجاد نشست‌های غیر یکنواخت کوچک، موجب خطاهایی در آزمایش تحکیم شوند. به همین دلیل در غلظت‌های زیاد آلاینده، مقدار ضریب تغییرات افزایش یافته‌است.



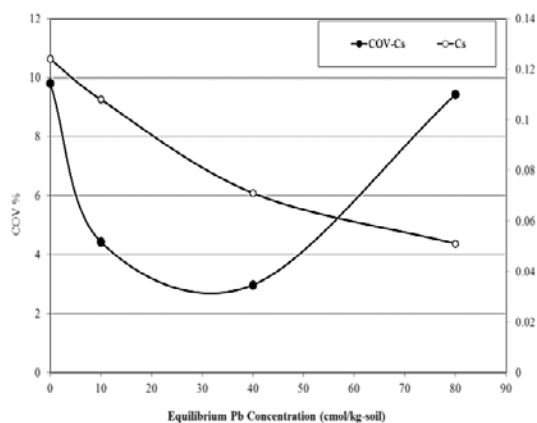
شکل ۵- منحنی تغییرات شاخص تراکم و ضریب تغییرات (CoV) شاخص تراکم بنتونیت تحت تأثیر غلظت‌های مختلف سیال حفره‌ای

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۴) با افزایش غلظت الکترولیت سیال حفره‌ای به دلیل کاهش قله اصلی کانی رسی مونت‌موریلونیت (شکل (۲)) و تغییر ساختار خاک از ساختار پراکنده به درهم (شکل (۳))، میزان شاخص تراکم و شاخص انبساط نمونه بنتونیت در خاک کاهش یافته‌است. حضور 10 cmol/kg-soil آلاینده فلز سنگین سرب در نمونه موجب کاهش 20% در شاخص تراکم و کاهش 13% در شاخص انبساط شده‌است. از سوی دیگر اضافه نمودن 40 cmol/kg-soil آلاینده فلز سنگین سرب به نمونه بنتونیت موجب کاهش شدید شاخص تراکم و شاخص انبساط نمونه‌های مورد آزمایش شده‌است. به عبارتی همان‌طور که در ارزیابی منحنی‌های پراش پرتو ایکس نمونه رسی حاوی غلظت 40 cmol/kg-soil آلاینده سرب مشاهده شد، کاهش شدید شدت قله مونت‌موریلونیت در این غلظت، و تشکیل ساختار درهم و کاهش نیروی دافعه بین پولک‌های رسی موجب کاهش شاخص تراکم و شاخص انبساط شده‌است. در شکل‌های (۵) و (۶) روند کاهش میزان شاخص تراکم و شاخص انبساط نمونه‌های مورد مطالعه نشان داده شده‌است. همچنین بررسی روند حدود ضریب تغییرات (CoV) شاخص تراکم و شاخص انبساط نیز در شکل‌های (۵) و (۶) و جدول (۲) ارائه شده‌است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل‌های فوق در آزمایش تحکیم با افزایش غلظت آلاینده تا حدود آلاینده قابل نگهداری توسط فاز کربنات خاک، مقدار ضریب تغییرات کاهش یافته و پس از این مرحله با افزایش غلظت آلاینده، مقدار ضریب تغییرات، افزایش یافته‌است. در آزمایش تحکیم در ابتدا با اضافه کردن آلاینده فلز سنگین سرب تا غلظت 40 cmol/kg-soil به نمونه‌ی رسی بنتونیت، بر اساس نتایج آزمایش قابلیت نگهداری آلاینده در شکل (۱) آلاینده توسط نمونه رسی بنتونیت به صورت کامل نگهداری می‌شود.

با افزایش غلظت سیال حفره‌ای به حدود بیش از قابلیت بخش کربناتی در نگهداری آلاینده (50 cmol/kg-soil)، کمترین میزان ضریب تغییرات در آزمایش تحکیم مشاهده شده‌است. بر اساس نتایج آزمایش پراش اشعه ایکس ارائه شده در شکل (۲) بیش‌ترین و شدیدترین افت در شدت قله نظیر کانی مونت‌موریلونیت نیز در همین غلظت آلاینده مشاهده شده‌است. بر این اساس می‌توان بیان نمود که در غلظت سیال حفره‌ای نزدیک به شروع عملکرد فاز ظرفیت تبادل کاتیونی، کاهش قابل توجه در شدت قله نظیر کانی مونت‌موریلونیت نمونه رسی بنتونیت مشاهده شده‌است. با توجه به آن که در شرایط فوق

آزمایش تحکیم با افزایش غلظت آلاینده تا حوالی آلاینده قابل نگهداری توسط فاز کربنات و پوشش آن‌ها بر سطوح پولک‌های رسی، همگنی و پایداری گفته شده موجب می‌شود که پولک‌های رسی اندرکنش‌های نسبتاً یکسانی نسبت به یکدیگر داشته باشند. در نتیجه بر اساس نتایج ارائه شده در شکل‌های (۵) و (۶) مقدار ضریب تغییرات کاهش نشان داده‌است.

از سوی دیگر، بر اساس نتایج ارائه شده در شکل‌های (۵) و (۶) و جدول (۲)، بررسی نتایج شاخص تراکم و شاخص انبساط نشان می‌دهد، CoV شاخص تراکم بیشتر از CoV شاخص انبساط است. به طور متوسط مقدار CoV شاخص تراکم حدود ۱/۵ برابر CoV شاخص انبساط است. یکی از دلایل این مسئله می‌تواند میزان تغییر شکل بیشتری باشد که در زمان بارگذاری نسبت به حالت باربرداری به وجود می‌آید. به عبارتی در فرایند بارگذاری احتمال بیشتر وقوع پدیده خزش نسبت به حالت باربرداری بر روی میزان ضریب تغییرات شاخص تراکم تأثیرگذار است. میزان و نحوه خزش به عوامل متعددی همچون درصد رطوبت، میزان بار اعمالی موجود و نوع کانی رسی بستگی دارد [۲۴]. علاوه بر این میزان خزش به چیدمان و همگنی دانه‌ها به شدت وابسته است [۲۴]. از سوی دیگر حضور کانی‌های رسی فعال در این آزمایش‌ها سبب شده است که همگنی و چیدمان پولک‌های رسی نسبت به یکدیگر بیش از پیش بر نتایج آزمایش‌ها تأثیر داشته‌باشد [۲۵]. نکته قابل توجه در این‌جا این است که در بارگذاری‌های تدریجی و کند، رس‌ها به خصوص رس‌های فعال، مقاومتی در برابر جابه‌جایی پولک‌های رسی هم‌جوار از خود نشان می‌دهند. این مقاومت در برابر تغییر شکل، به دانسیته، درصد رطوبت، دست‌خوردگی و نوع کانی رسی وابسته است. بر این اساس از آنجا که میزان تغییر شکل در محاسبه شاخص تراکم بیشتر می‌باشد و مدت زمان لازم برای به تعادل رسیدن در فرایند تعیین شاخص تراکم طولانی‌تر است همچنان روند خزش ادامه دارد، بنابر این ناهمگنی در بارگذاری بیشتر تأثیر خود را نشان می‌دهد [۲۳-۲۶]. در مجموع می‌توان بیان نمود که چیدمان‌های مختلف در پولک‌های رسی، تغییرات در میزان جاذبه و دافعه بین پولک‌های رسی را به دنبال دارد. به طوری که به تبع تغییرات در جاذبه و دافعه رس‌ها، تغییرات در میزان تغییر شکل و خزش نمونه‌ها نیز رخ می‌دهد، همه موارد ذکر شده موجب پراکندگی در میزان تغییر شکل و در نتیجه پراکندگی در میزان شاخص تراکم و در مجموع سبب زیادشدن مقدار CoV شده‌است.



شکل ۶- منحنی تغییرات شاخص انبساط و ضریب تغییرات (CoV) شاخص انبساط بنتونیت تحت تأثیر غلظت‌های مختلف سیال حفره‌ای

با افزایش غلظت سیال حفره‌ای، فرایند رسوب به شکل‌های مختلف در نمونه ظاهر می‌شود. اولین صورتی که امکان تشکیل رسوب وجود دارد، عدم جذب کاتیون‌هایی است که وارد محلول آب و خاک شده، ولی جذب رس نشده‌اند. حالت دیگر رسوب ناشی از حضور کربنات در نمونه بنتونیت می‌باشد. کربنات با نگهداری بخشی از آلاینده سرب در محلول رسوب می‌دهد، این فرایند سبب افزایش قابلیت نگهداری آلاینده در خاک می‌شود [۲۲-۲۵]. حالت دیگری هم که امکان تشکیل فرایند رسوب را فراهم می‌کند حصول مقادیر pH بزرگ‌تر از ۷ است. با توجه به این که کربنات موجود در بنتونیت، pH محلول را بالا می‌برد، بنابر این رسوب آلاینده فلز سنگین از این طریق هم امکان‌پذیر است. از سوی دیگر طی فرایند رسوب، احتمال ایجاد ناهمگنی در نمونه بسیار زیاد است. از آنجا که چگالی رسوب سرب، بیشتر از چگالی بنتونیت است، بنابر این عدم تجمع همگن این رسوب‌ها در نقاط مختلف عامل افزایش خطا در نتایج آزمایش می‌باشد. در آزمایش تحکیم نیز این رسوب‌ها که بسیار سنگین‌تر از خاک هستند، به سمت پایین رینگ تحکیم منتقل شده از این‌رو نحوه تجمع و محل تجمع فلز سنگین می‌تواند موجب پراکندگی داده‌ها و افزایش ضریب تغییرات شود.

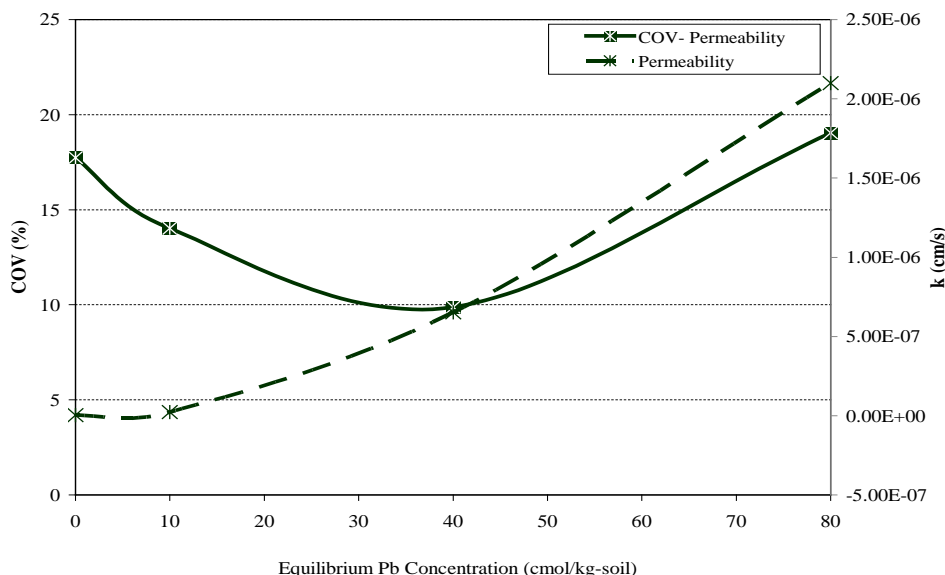
نتایج آزمایش تحکیم چه در باربرداری و چه در نشست وابستگی قابل توجهی به اندرکنش و نحوه قرارگیری پولک‌های رسی نسبت به یکدیگر (کتابی، درهم، موازی) دارد. بر اساس نتایج حاصل از تصویر میکروسکوپ الکترونی پویشی (شکل (۲))، آلاینده فلز سنگین سرب ساختار خاک را درهم کرده و رفتار خاک را به سمت رفتار مصالح دانه‌ای میل می‌دهد. بنابر این در

اساس با شکل‌گیری ساختار توده‌ای، میزان نفوذپذیری در خاک نیز افزایش یافته‌است. نتایج آزمایش پراش پرتو ایکس نیز با نتایج نفوذپذیری انطباق مناسبی دارد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۲) افزایش 40 cmol/kg-soil آلاینده فلز سنگین سرب موجب کاهش شدید قله اصلی کانی مونت‌موریلونیت در نمونه رسی بنتونیت شده بود. به عبارتی کاهش 71% شدت قله کانی مونت‌موریلونیت و به تبع آن نیروهای دافعه بین پولک‌ها، افزایش 100 برابری نفوذپذیری را به همراه داشته است. قابل توجه است که با افزایش غلظت سیال حفره‌ای و درهم شدن کامل ساختار پولک‌های رسی، میزان نفوذپذیری تا 1000 برابر نیز افزایش یافته‌است.

بر اساس نتایج شکل (۷) و جدول (۲)، با افزایش غلظت سیال حفره‌ای میزان ضریب تغییرات در ابتدا کاهش یافته است. به عبارتی افزایش 10 cmol/kg-soil میزان ضریب تغییرات را بیش از 20% کاهش داده‌است. افزایش 40 cmol/kg-soil سیال حفره‌ای (حدود ظرفیت تبادل کاتیونی نمونه رسی) کمترین میزان ضریب تغییرات را ارائه داده است. در حقیقت در غلظت‌های آلاینده بیشتر از قابلیت نگهداری فاز کربنات، و احتمال تشکیل رسوب‌های غیر همگن در نمونه، میزان خطاهای اندازه‌گیری شده به شدت افزایش یافته است.

همچنین در آزمایش تحکیم، به علت تراکم نمونه، چگونگی اندرکنش پولک‌های رسی مجاور نسبت به یکدیگر نقش کلیدی در نتایج آزمایش‌ها دارد. این اندرکنش‌ها، روند و نحوه انتقال بار از آب به خاک را کنترل می‌کند. به واسطه تأثیر نیروهای بین ذره‌ای از فاصله پولک‌ها [۲۲]، این مسئله در شاخص تراکم بیشتر خود را نشان می‌دهد. بنابر این تأثیر پارامتر عدم همگنی بر میزان خطا، در ساخت نمونه‌های لازم برای تکرار آزمایش تحکیم، در این ضریب بیشتر نمایان می‌شود.

نفوذپذیری یکی از پارامترهای مهم در طراحی مراکز دفن زباله می‌باشد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۷) و جدول (۲) مشاهده می‌شود که ضریب نفوذپذیری به شدت تحت تأثیر غلظت الکترولیت آب حفره‌ای می‌باشد. به نحوی که با افزایش 10 cmol/kg-soil آلاینده فلز سنگین میزان ضریب نفوذپذیری خاک حدود 10 برابر افزایش یافته‌است. همچنین حضور 40 cmol/kg-soil آلاینده فلز سنگین، ضریب نفوذپذیری نمونه رسی بنتونیت را حدود 100 برابر افزایش داده‌است. بر این اساس در طراحی مراکز دفن زباله، غلظت سیال حفره‌ای به شدت بر پارامتر نفوذپذیری تأثیرگذار است. در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شد که با افزایش غلظت آلاینده فلز سنگین، ساختار خاک از حالت پراکنده به حالت درهم تغییر کرده است. بر همین



شکل ۷- تغییرات ضریب نفوذپذیری و ضریب تغییرات نفوذپذیری نمونه بنتونیت در غلظت‌های مختلف فلز سنگین

۴- نتیجه گیری

مهمترین نتایج پژوهش حاضر را می توان به شرح ذیل بیان نمود:

(۱) خصوصیات ژئوتکنیکی خاک تحت تأثیر ریزساختار و غلظت سیال حفره ای می باشد. به نحوی که حضور ۴۰ cmol/kg-soil آلاینده فلز سنگین به علت پوشش پولک های رسی توسط رسوبات کربناتی، میزان شاخص تراکم را حدود ۴۰٪ و میزان شاخص انبساط را حدود ۴۲٪ کاهش داده است.

(۲) ریزساختار و نحوه قرارگیری پولک های رسی تحت تأثیر تغییرات غلظت الکترولیت سیال حفره ای می باشد. به طوری که حضور ۴۰ cmol/kg-soil آلاینده فلز سنگین سرب شدت قله نظیر کانی مونت موریلونیت را حدود ۷۰٪ کاهش داده است. همچنین خصوصیات درشت ساختاری نیز تابع خصوصیات ریزساختاری است.

(۳) حضور فلز سنگین سرب با تغییر خصوصیات سیال حفره ای سبب تغییر در خصوصیات لایه دوگانه، خواص خاک و در نتیجه تغییر در نتایج اخذ شده از آزمایش های مکانیک خاک می شود. همچنین تغییر خصوصیات الکترولیت سیال حفره ای تأثیر مستقیم در مقدار و نرخ تغییرات خطاهای آزمایش های تحکیم داشته است.

(۴) میزان ضریب تغییرات (CoV) آزمایش های تحکیم و نفوذپذیری در خاک های رسی تابعی از قابلیت نگهداری آلاینده توسط نمونه رسی می باشد. به نحوی که در غلظت نظیر قابلیت نگهداری فاز کربنات، به علت پوشش پولک های رسی توسط رسوبات کربناتی، خاک در حالت پایدار است و کمترین مقدار خطا در نتایج آزمایش های فوق مشاهده شده است. در این حالت میزان CoV شاخص تراکم نسبت به CoV شاخص تراکم نمونه خالص حدود ۵۰٪ کاهش یافته است.

(۵) وجود رسوب آلاینده فلز سنگین سرب و توده ای شدن ساختار نمونه رسی بنتونیت در مجاورت آلاینده، موجب ایجاد ناهمگنی و توزیع غیر یکسان رطوبت است، همین موضوع سبب تغییر مقدار COV آزمایش ها در مجاورت آلاینده شده است.

(۶) پارامتر نفوذپذیری در طراحی مراکز دفن زباله و هسته سدهای خاکی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. نتایج پژوهش حاضر نشان می دهند که تغییر مشخصات سیال حفره ای می تواند میزان نفوذپذیری را تا ۱۰۰۰ برابر افزایش دهد. بر این اساس تغییرات غلظت سیال حفره ای در پروژه های ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست محیطی توجه ویژه ای می طلبد.

۵- مراجع

- [1] Baecher, G., Christian. J., "Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering", John Wiley & Sons, UK, 2003, Vol. 8, pp 181-203.
- [2] Sherwood, P. T., "An Examination of the Reproducibility of Soil Classification and Compaction Tests", Symposium on Quality Control of Road Works, Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement, 1970.
- [3] Hoeg, K., Murarka, R. P., "Probabilistic Analysis of a Retaining Wall", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE 100 (GT3), 1974, 349-370.
- [4] Lambe. T. W., Whitman, R. V., "Soil Mechanics", New York, John Wiley & Sons, 1969.
- [5] Mitchell, I. V., "Pillared Layered Structures: Current Trends and Applications", Elsevier, 2005.
- [6] Lacasse, S., Nadim, F., "Uncertainties in Characterizing Soil Properties", Uncertainty in the Geologic Environment, Madison, ASCE, 1996, pp 49-75.
- [7] Tanaka, H., Loat. J., Shibuya. S., Soon. T. T., Shiwakoti, D., "Characterization of Singapore, Bangkok, and Ariake Clays", Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38, 378-400.
- [8] Zhu, G., Yin, J. H., Graham, J., "Consolidation Modelling of Soils under the Test Embankment at Clek Lap Kok International Airport in Hong Kong using a Simplified Finite Element Model", Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38, 349-363.
- [9] Benson, C. H., "Probability Distributions for Hydraulic Conductivity of Compacted Soil Liners", ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1993, 119 (3), 471-486.
- [10] Kulhawy, F. H., Phoon, K. K., "Engineering Judgment in the Evolution from Deterministic to Reliability-Based Foundation Design", Uncertainty in the Geological Environment, Madison, WI, ASCE, 1996, pp 29-49.
- [11] Jack, R. B., Allin, C. C., "Probability for Civil Engineer", McGraw-Hill, 1970.
- [12] Ouhadi, V. R., Amiri, M., "Geo-Environmental Behaviour of Nanoclays in Interaction with Heavy Metals Contaminant", Amirkabir Journal of Civil and Environmental Engineering, 2011, 42 (3), 29-36.

- Evaluation by XRD Analysis", Applied Clay Science, 2003, 23, 141-148.
- [22] Yong, R. N., "Geoenvironmental Engineering, Contaminated Soils, Pollutant Fate and Mitigation", CRC Press, Boca Raton, 2001.
- [23] Ouhadi, V. R., Yong, R. N., Sedighi, M., "Desorption Response and Degradation of Buffering Capability of Bentonite, Subjected To Heavy Metal Contaminants", Engineering Geology, 2006, 85, 102-110.
- [24] Cetin, H., "Soil-Particle and Pore Orientations During Consolidation of Cohesive Soils", Engineering Geology, 2004, 73, 1-11.
- [25] Liu, H. C., You, C. F., Huang, B. J., Huh, C. A., "Distribution and Accumulation of Heavy Metals In Carbonate and Reducible Fractions of Marine Sediment From Offshore Mid-Western Taiwan", Marine Pollution Bulletin, 2013, 73 (1), 37-46.
- [26] Li, J. S., Xue, Q., Wang, P., Li, Z. Z., "Effect of Lead (II) on The Mechanical Behavior And Microstructure Development of A Chinese Clay", Applied Clay Science, 2015, 105, 192-199.
- [27] Ludovico-Marques, M., Chastre, C., "Effect of Consolidation Treatments on Mechanical Behaviour of Sandstone", Construction and Building Materials, 2014, 70, 473-482.
- [13] Ouhadi, V. R., Amiri, M., Goodarzi, A. R., "The Special Potential of Nano-Clays for Heavy Metal Contaminant Retention in Geo-Environmental Projects", Journal of Civil and Surveying Engineering, 2012, 45 (6), 631-642.
- [۱۴] اوحدی، و. ر.، امیری، م.، "جداسازی اجزای بنتونیت به منظور دستیابی به نانومونت موریلونیت"، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۱۳۹۱، ۱۹ (۲)، ۲۷۱-۲۸۰.
- [۱۵] اوحدی، و. ر.، چوبچیان لنگرودی، س. ا.، "تأثیر ظرفیت و غلظت کاتیون بر نتایج آنالیز پرتو ایکس کانی رسی اسمکتیت"، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۱۳۹۰، ۲۰، ۱-۱۰.
- [۱۶] اوحدی، و. ر.، "تأثیر کانی‌های رسی در خطاهای موجود در آزمایش‌های مکانیک خاک"، نشریه ژئوتکنیک و مقاومت مصالح، ۱۳۷۸، ۸۳، ۱-۱۰.
- [17] ASTM, "Annual Book of ASTM Standards", Vol. 4 (8), Philadelphia, US, 2003.
- [18] EPA, "Process Design Manual, Land Application of Municipal Sludge, Municipal Environmental Research Laboratory", EPA-625/1-83-016, US Government Printing Offices, New York, US, 1983.
- [19] Hesse, P. R., "A Textbook of Soil Chemical Analysis", William Clowes and Sons, 1971.
- [20] Handershot, W. H., Duquette, M., "A Simple Barium Chloride Method for Determining Cation Exchange Capacity and Exchangeable Cations", Soil Science Society of America Journal, 1986, 50, 605-608.
- [21] Ouhadi, V. R., Yong, R. N., "Experimental and Theoretical Evaluation of Impact of Clay Microstructure on The Quantitative Mineral