

تأثیر تغییر pH اولیه کائولینیت بر ریز ساختار و خصوصیات تحکیمی آن

محمد رضا شعبانیان^۱، احد اوریا^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی

^۲ دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی

(دریافت: ۹۸/۴/۱۹، پذیرش: ۹۹/۱۱/۲۸، نشر آنلاین: ۹۹/۱۱/۲۸)

چکیده

مشخصات مکانیکی خاک‌ها؛ علی‌الخصوص خاک‌های ریزدانه به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر مشخصات شیمیایی محیط است. مشاهدات صورت گرفته بیانگر آن است که نشت آلاینده‌های اسیدی یا بازی در خاک بستر شالوده‌های بنا شده می‌تواند احتمال خرابی شالوده‌ها و نشست‌های غیرقابل پیش‌بینی در آن‌ها را افزایش دهد. از این رو پژوهش حاضر با هدف مطالعه تأثیر تغییر pH اولیه کائولینیت (Kaolinite) بر ریزساختار و خصوصیات تحکیمی آن انجام شده است. در این پژوهش ابتدا در سیکل‌های متوالی عامل اسیدی یا بازی به مخلوط آب و خاک اضافه شده و تغییرات pH در طی زمان اندازه‌گیری شده است. آزمایشات ریز ساختاری و درشت ساختاری بعد از رسیدن pH نمونه‌ها به مقادیر ماندگار انجام شده است. بررسی نتایج به‌دست‌آمده در سه بخش پراش پرتوایکس، رسوب‌گذاری و دانه‌بندی لیزری بیانگر تغییر ساختار خاک رسی کائولینیت و تغییر ساختار خاک از حالت پراکنده به مجتمع و در نهایت افزایش اندازه ذرات رسی با کاهش pH اولیه خاک است. بررسی خصوصیات تحکیمی نمونه‌ها نیز نشان‌دهنده آن است که، کاهش pH اولیه خاک با کاهش تنش دافعه خالص بین‌ذره‌ای موجب کاهش نشانه فشردگی نمونه‌ها و افزایش ضریب تحکیم آن‌ها شده است.

کلیدواژه‌ها: کائولینیت، pH اولیه، ریز ساختار، تحکیم.

۱- مقدمه

به‌صورت مستقیم بر پایداری سازه‌های مهندسی ساخته‌شده بر روی این خاک‌ها تأثیرگذار است (Gratchev و Towhata، ۲۰۱۶؛ گودرزی و اکبری، ۱۳۹۸؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۴؛ اوحدی و گودرزی ۱۳۹۳). از این رو شناخت و بررسی عوامل تأثیرگذار بر رفتار مهندسی خاک‌ها رسی از جمله pH ضروری به‌نظر می‌رسد. اغلب از pH به‌عنوان یکی از پارامتر اصلی خاک یاد می‌شود. pH تأثیر بسزایی بر تعداد زیادی از واکنش‌ها و فرایندهای شیمیایی خاک داشته و اندازه‌گیری آن از نظر تعیین میزان اسیدی یا بازی بودن یک خاک دارای اهمیت است (Soga و Mitchell، ۲۰۰۵). اسیدها (پروتون‌ها) از طریق مکانیسم‌های مختلفی با خاک رس واکنش نشان می‌دهند، این مکانیسم‌ها عبارت‌اند از: الف) مکانیسم اول را می‌توان تغییر در بار الکتریکی موجود در سطح ذرات رسی با تغییر pH محیط دانست. مطالعات محققین پیشین نشان‌دهنده آن است که بار گوشه‌های شکسته در ذرات رسی وابسته به pH محیط است. در مقادیر pH کم با توجه به جذب یون H^+ بار گوشه‌ها مثبت و در مقادیر pH های زیاد با توجه به جذب یون OH^- بار گوشه‌ها منفی می‌شود. اگرچه این

امروزه بسیاری از زمین‌های موجود در معرض قرارگیری آلاینده‌های اسیدی یا بازی قرار دارند (Yildiz و Olgun، ۲۰۱۲). بررسی‌های صورت‌گرفته نشان‌دهنده آن است که حضور آلاینده‌های اسیدی در خاک می‌تواند از طریق فرایندهای طبیعی مانند هوازگی پیریت^۱ یا فرایندهای انسانی مانند مراکز دفن زباله‌های شهری یا بارش باران‌های اسیدی باشد (Gratchev و Towhata، ۲۰۱۳؛ بدو و ارجمند قره‌قشالقی، ۱۳۹۶). به‌طور مثال باران اسیدی نتیجه آلودگی هوا بوده و منبع اصلی آن دی‌اکسید گوگرد SO_2 و اکسید نیتروژن NO_x است. وجود این اسیدها در آب باران موجب تشکیل اسیدی با pH ۳ تا ۴/۵ می‌شود (Bakhshipour و همکاران، ۲۰۱۶). از سوی دیگر، مشخصات مکانیکی خاک‌ها؛ به‌خصوص خاک‌های ریزدانه به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر مشخصات شیمیایی محیط است (Spagnoli و همکاران، ۲۰۱۲؛ اوحدی و همکاران، ۱۳۹۵). تغییرات شیمیایی آب منفذی تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر مشخصات ژئوتکنیکی خاک‌های رسی از جمله تراکم‌پذیری و پارامترهای مقاومتی آن داشته، که این عوامل

1. Pyrite

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۵-۳۱۵۰۵۰۰

آدرس ایمیل: mohamadreza.shabanian@yahoo.com (م. ر. شعبانیان)، aouria@uma.ac.ir، aouria@mail.com (ا. اوریا).

Bakhshipour و همکاران (۲۰۱۶)، با مدل سازی نحوه عملکرد باران های اسیدی در آزمایشگاه، تأثیر باران اسیدی را بر رفتار ژئوتکنیکی دو نوع خاک طبیعی SRS^۷ (MH)، کائولینیت باوجود غلظت بالای Fe₂O₃ و IRS^۸ (GL، حاوی کوارتز) مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از انجام آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده (تک محوری) نشان دهنده آن است که مقاومت فشاری نمونه ها در حضور باران اسیدی کاهش یافته است. همچنین حد روانی و شاخص خمیری نمونه ها با کاهش pH آب منفذی به مقدار بسیار جزئی افزایش یافته است. نتایج حاصل از بررسی میزان نفوذپذیری نمونه ها نیز حاکی از آن است که با کاهش pH باران اسیدی نفوذپذیری نمونه ها افزایش یافته است. همچنین نتایج پژوهش های اخیر بیانگر آن است که آلاینده های اسیدی غیرآلی تأثیر مهمی بر روی رفتار تورمی و تراکم پذیری خاک های رسی بنتونیت^۹ و کائولینیت دارند. به گونه ای که جایگزینی یون هیدروژن با کاتیون های لایه دوگانه و به تبع آن کاهش ضخامت لایه دوگانه کانی مونت موریلونیت موجب کاهش میزان تورم پذیری، تراکم پذیری و حد روانی بنتونیت شده است. حال آن که در فشار سربار کم (۵ کیلو پاسکال) جذب آنیون ها، تغییر بار سطحی کانی رسی و در نهایت تغییر ساختار خاک مکانیسم های کنترل کننده تورم پذیری، تراکم پذیری و حد روانی کائولینیت بوده است (Ponnapureddy و Chavali، ۲۰۱۷).

طیف گسترده ای از پژوهش ها به تجزیه و تحلیل درجه تجزیه خاک رس توسط محلول های اسیدی و بازی معطوف شده است و خواص فیزیکی و شیمیایی حاصل از فعالیت مواد اسیدی و بازی از جمله تغییرات سطح اسیدیته، ظرفیت تبادل کاتیونی و قدرت کاتالیزوری خاک را مورد بررسی قرار داده اند. این در حالی است که مطالعات اندکی بر روی تغییرات برخی شاخص های مهندسی خاک های رسی (مانند حدود اتربرگ و شاخص تورم) در صورت تغییر pH اولیه آن صورت گرفته است. در اکثر تحقیقات صورت گرفته، آزمایشات پس از اضافه کردن اسید یا باز و تنظیم pH مخلوط آب و خاک انجام شده است. در حالی که به نظر می رسد pH مخلوط آب و خاک با گذشت زمان تغییراتی داشته باشد. از این رو عاملی که در تحقیقات پیشین در نظر گرفته نشده را می توان عدم رسیدن به حالت پایدار دانست. لذا در این پژوهش ابتدا در سیکل های متوالی عامل اسیدی یا بازی به مخلوط آب و خاک اضافه شده و تغییرات pH در طی زمان اندازه گیری شده است. آزمایشات ریز ساختاری و درشت ساختاری بعد از رسیدن pH به مقادیر ماندگار انجام شده است. بنابراین همان طور که

پدیده در کانی های مختلف رسی رخ می دهد اما رخداد این پدیده در کائولینیت برجسته تر است (Jozefaciuk، ۲۰۰۲). کائولینیت با ساختار درهم در مقایسه با ساختار پراکنده عموماً دارای حد روانی، نفوذپذیری و مقاومت بالاتر است. مقاومت بالاتر ساختار درهم را می توان ناشی از افزایش نیروی جاذبه بین پولک ها دانست (Gratchev و Towhata، ۲۰۱۳).

ب) مکانیسم دوم را نیز می توان تغییر در ضخامت لایه دوگانه و در نتیجه تغییر در نیروهای بین مولکولی موجود در بین ذرات دانست. مطالعات پیشین نشان دهنده آن است که حضور اسید رقیق موجب جایگزینی یون H⁺ با کاتیون های رایج در لایه دوگانه از جمله Na، Ca، Al و Fe شده و در نتیجه این جایگزینی، ضخامت لایه دوگانه کاهش و تراکم خاک افزایش می یابد. همچنین نتایج مطالعات پیشین نشان دهنده آن است که، تغییرات لایه دوگانه تأثیرات مهمی بر رفتار خاک های رسی دارای کانی های مونت-موریلونیت^۲ و اسمکتیت^۳ دارد؛ در حالی که رفتار خاک های رسی حاوی کانی کائولینیت تحت تأثیر تغییر ساختار خاک است (Gratchev و Towhata، ۲۰۱۱). Gori (۱۹۹۴)، تأثیر pH بر حدود اتربرگ کائولینیت را مورد بررسی قرار داد و دریافت که با توجه به عدم تأثیر گذاری pH آب منفذی بر ضخامت لایه دوگانه کائولینیت، حد روانی کائولینیت وابسته به pH آب منفذی نیست. در مقابل حد روانی اسمکتیت به شدت تحت تأثیر pH آب منفذی قرار دارد.

ج) مکانیسم سوم را می توان حل شدگی و آبشویی کاتیون ها و آنیون های خاک در سطح pH های مختلف دانست. Sunil و همکاران (۲۰۰۶)، کاهش مقاومت فشاری و افزایش حد روانی خاک لاتریت^۴ را با آبشویی آهن از آن گزارش کردند. در شرایط بسیار اسیدی نیز ممکن است تغییرات مهمی در ساختار کانی ها ناشی از حل شدگی آلومینا^۵ و سیلیکا^۶ ممکن است رخ دهد (Bakhshipour و همکاران، ۲۰۱۶). Imai و همکاران (۲۰۰۶)، بیان کردند که جریان اسیدی با حل کردن کلسیم کربنات و همچنین تخریب پیوندهای کربناتی بین اجزای رسی موجب تشکیل ساختار شل تر با منافذ بیشتر و تراکم پذیری بیشتر خاک رسی می شود. خلاصه بررسی پژوهش های پیشین پیرامون پتانسیل تأثیر گذاری pH روی خواص مکانیکی خاک نشان دهنده آن است که pH آب منفذی بر خصوصیات مکانیکی خاک های رسی تأثیر گذار است، حال آن که کدام یک از مکانیسم ها، مکانیسم حاکم بر این تغییرات است مشخص نیست (Spagnoli و همکاران، ۲۰۱۲).

7. Sedimentary Residual Soil
8. Igneous residual soil
9. Bentonite

2. Montmorillonite
3. Smectite
4. Laterite
5. Alumina
6. Silica

بررسی پژوهش‌های پیشین نیز بیانگر آن است که واکنش اسید و باز با خاک در ۴ روز اول صورت می‌گیرد (Gratchev و Towhata، ۲۰۱۳). نمونه‌ها با pH تثبیت‌شده جهت خشک‌شدن در داخل گرمخانه با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. همچنین جهت تثبیت نمونه کائولینیت با pH اولیه ۱۳ نیز با استفاده از محلول سدیم هیدروکسید ۴ مولار فرآیند ذکر شده بالا انجام شد.

پس از ساخت مخلوط‌های آب و خاک با نسبت ۱:۱۰ (۱۰ آب: ۱ خاک) و انجام آزمایش رسوب‌گذاری، جهت آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمایش تحکیم مطابق استاندارد ASTM D 2435، نمونه‌ها در قالب‌های پیش‌بارگذاری ریخته و تا تنش پیش‌تحکیمی ۲۵ کیلوپاسکال بارگذاری شدند.

همچنین جهت بررسی رفتار ریزساختاری نمونه‌ها آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) و دانه‌بندی لیزری انجام شد. نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها برای انجام آزمایش پراش پرتو ایکس بدین‌صورت بود که ۱ گرم از نمونه خاک با pH اولیه تثبیت‌شده با ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط شده و به مدت ۴ روز، هر روز به مدت ۲ ساعت روی دستگاه لرزاننده الکتریکی قرار گرفته، و سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت برای رسیدن به تعادل رها شد. بعد از آن نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه تکان داده شده و مقداری از سوسپانسیون به‌وسیله پیپت پاستور برداشته، و بر روی لام شیشه‌ای تمیز، خشک و شفاف به ابعاد ۴×۴ ریخته شده و به مدت ۲۴ ساعت در هوای محیط خشک شده است.

۳- نتایج آزمایش‌ها

۳-۱- بررسی تغییرساختار خاک رسی کائولینیت با تغییر pH اولیه

آرایش و پراکندگی ذرات در توده خاک نه‌تنها مستقیماً بر روی خصوصیات فیزیکی خاک مانند دانسیته و تخلخل، بلکه بر عملکرد خصوصیات ذاتی خاک مانند مقاومت برشی، تحکیم و هدایت هیدرولیکی نیز تأثیرگذار است (Yong، ۲۰۰۱). از این‌رو شناخت دقیق رفتار رس‌ها نیازمند شناخت عوامل مؤثر در ساختار خاک است.

از آنجاکه شدت و موقعیت قله‌های پراش پرتو ایکس کانی‌های رسی متناسب با چگونگی قرارگیری پولک‌ها و تغییر در ضخامت لایه دوگانه آن‌ها تغییر می‌کند، این روش می‌تواند تا حدود زیادی بازگوکننده تغییرات رفتاری خاک‌های رسی در شرایط مختلف زیست‌محیطی باشد. بنابراین جهت بررسی چگونگی تغییر شرایط ریزساختاری خاک و همچنین چگونگی تغییر ساختار خاک با

گفته شد تغییر pH خاک‌ها و کانی‌های رسی به‌دلیل شرایط مختلف شکل‌گیری کانی و نیز عوامل خارجی از یک‌سو و تغییر در خصوصیات مهندسی خاک و به‌تبع آن تغییر در عملکرد ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی خاک ناشی از تغییر pH از سوی دیگر لازمه انجام این پژوهش را نشان می‌دهد.

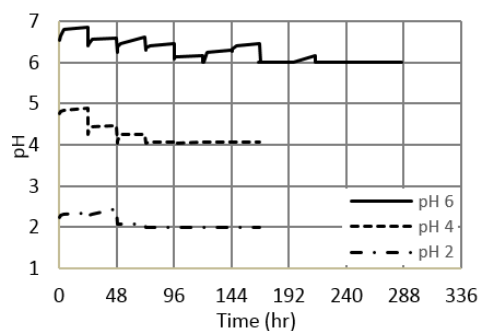
۲- مواد و روش‌ها

کائولینیت مورد استفاده در این پژوهش به رنگ سفید مایل به شیری بوده است. جدول (۱) برخی مشخصات ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی کائولینیت مورد استفاده، که بر اساس استاندارد ASTM تعیین شده را نشان می‌دهد.

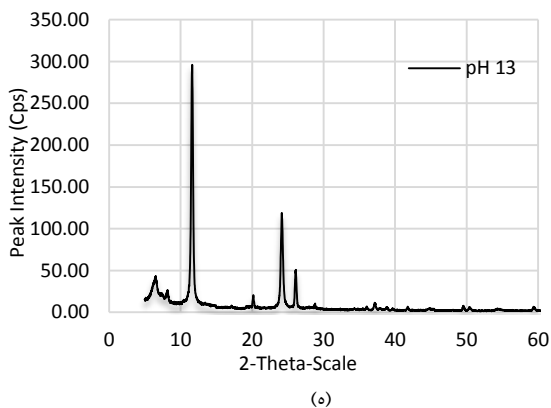
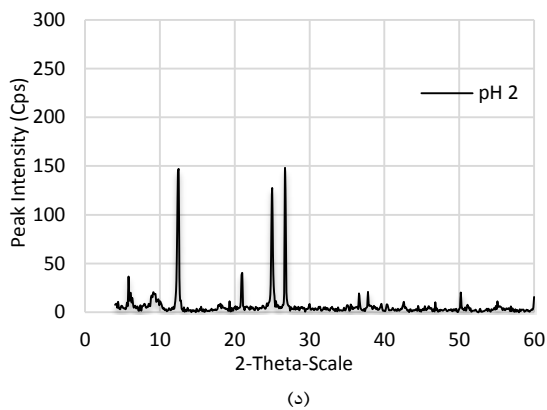
در این پژوهش به‌منظور تثبیت pH اولیه کائولینیت، ابتدا مخلوط آب و خاک با نسبت ۱:۱۰ (۱۰ آب: ۱ خاک) ساخته شد. به منظور یکنواختی بیشتر مخلوط، پس از همگن‌سازی توسط همزن، مخلوط به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد. پس از آن برای تثبیت نمونه‌های کائولینیت با pH های اولیه ۲، ۴ و ۶ به نمونه‌های در حال هم‌خوردن، درحالی‌که الکتروود pH متر نیز به منظور اندازه‌گیری pH نمونه در داخل ظرف قرار گرفته، محلول هیدروکلرید اسید ۱ مولار اضافه شد. افزودن محلول هیدروکلرید اسید به نمونه‌ها تا جایی ادامه می‌یافت که pH نمونه به pH موردنظر تثبیت برسد. این کار به‌صورت روزانه تکرار شد تا این‌که pH نمونه‌ها به مدت ۹۶ ساعت در pH موردنظر ثابت بماند. شکل (۱) روند تغییر pH نمونه‌ها را در طول مدت افزودن اسید به خاک را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خصوصیات اولیه فیزیکی و شیمیایی خاک کائولینیت

مشخصه مورد ارزیابی	مقدار اندازه‌گیری شده
حد روانی (%)	۴۸
حد خمیری (%)	۲۰
طبقه‌بندی خاک	CL
pH (با نسبت ۱:۱۰ خاک: آب)	۹/۳
کربنات (%)	۴



شکل ۱- روند تغییر pH نمونه‌ها را در طول مدت افزودن اسید به خاک

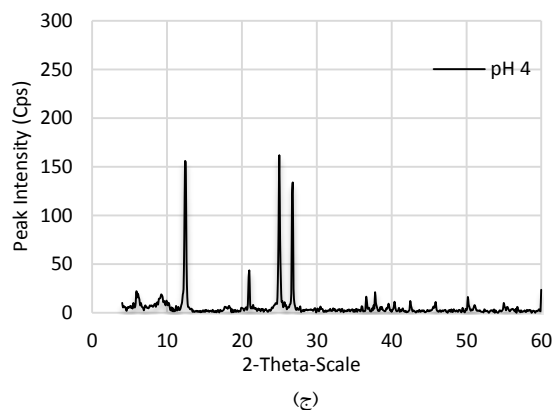
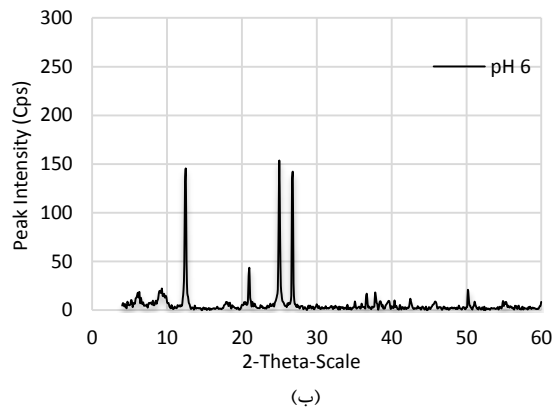
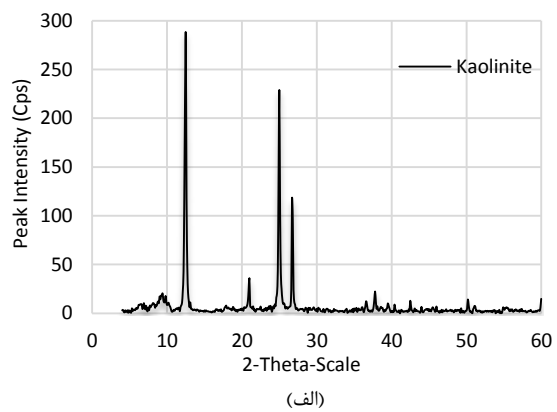


شکل ۲- نتایج آزمایش پراش پرتو ایکس بر روی نمونه خالص کائولینیت: الف) نمونه‌های کائولینیت با pH های اولیه، الف) ۹/۳ (ب) ۶، ج) ۴، د) ۲، ه) ۱۳

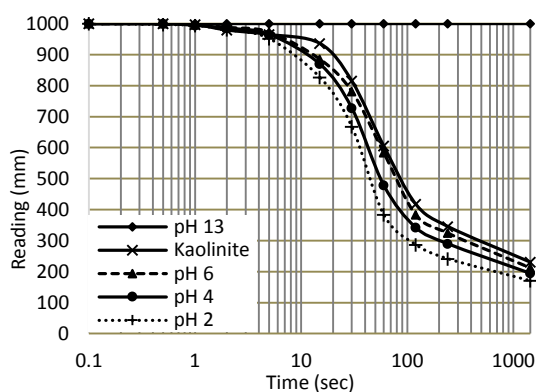
شکل (۳) چگونگی تغییر شدت قله کائولینیت با تغییر pH اولیه را نشان می‌دهند. با توجه به شکل (۳) میزان کاهش شدت قله کائولینیت در نمونه‌های با pH اولیه ۶، ۴ و ۲ به ترتیب برابر ۴۸٪، ۴۲٪ و ۵۰٪ نسبت به نمونه اصلی کائولینیت است. به‌طور کلی می‌توان دو مکانیسم تغییر ساختار خاک و تخریب بنیان‌های رسی را برای این رفتار در نظر گرفت (Liu و همکاران، ۲۰۱۳). در خصوص مکانیسم اول مطالعات پیشین بیانگر آن است که بار الکتریکی موجود در سطح برخی ذرات رسی از جمله کائولینیت وابسته به pH آب منفذی است (Chen و همکاران، ۲۰۰۰).

Van Olphen (۱۹۹۱)، بیان کرده که pH های پایین ($pH < 5/5$) آب منفذی با ایجاد بار مثبت در لبه‌های کانی کائولینیت موجب تشکیل ساختار فلوکوله (F-E) در خاک می‌شود. این در حالی است که pH بالای آب منفذی با ایجاد بار منفی در گوشه‌ها موجب تشکیل ساختار پراکنده (F-F) در خاک می‌شود.

تغییر pH اولیه، آزمایش پراش پرتو ایکس روی نمونه اصلی کائولینیت و نمونه‌های کائولینیت با pH اولیه مختلف انجام شد. شکل (۲) نشان‌دهنده نتایج آزمایش پراش پرتو ایکس بر روی نمونه خالص کائولینیت و نمونه‌های کائولینیت با pH های اولیه تثبیت‌شده است. با توجه به شکل (۲) می‌توان دریافت که، نمونه اصلی کائولینیت دارای قله شدیدتری نسبت به سایر قله‌ها در $(2\theta) 12/4^\circ$ (آنگستروم $d=7/13 \text{ \AA}$) است. بنابراین با توجه به غالب بودن این کانی در خاک، بررسی‌های صورت گرفته متمرکز بر این کانی است. نتایج حاصل بیانگر آن است که در مجموع با کاهش pH اولیه نمونه‌ها، شدت قله کائولینیت نیز کاهش یافته است.

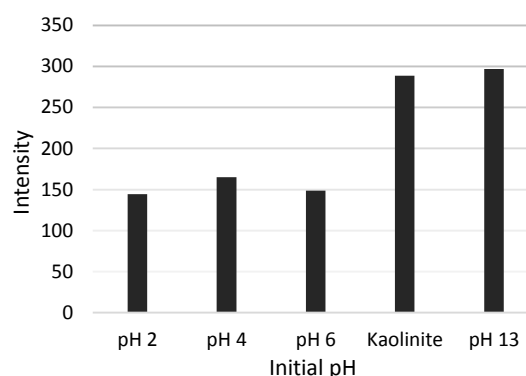


همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، در نمونه با pH اولیه ۱۳ رسوبی صورت نگرفته، به عبارت دیگر با توجه به حضور pH اولیه نمونه در محدوده بازی ساختار نمونه پراکنده بوده است. اما در نمونه‌های با pH اولیه ۶، ۴ و ۲ رسوب نمونه‌ها مشهود است به گونه‌ای که با کاهش pH اولیه میزان رسوب نیز افزایش یافته که این امر مؤید مجتمع‌تر شدن ساختار خاک است. در خصوص نمونه خالص کائولینیت (با pH اولیه ۹/۴) نیز رسوب به صورت کامل صورت نگرفته و محلول روی نمونه در استوانه مدرج دارای کدورت بوده است؛ بنابراین قرائت انجام شده بیانگر مرز ناحیه ذرات رسوب کرده و قسمت کدر محلول است. لذا به منظور بررسی تغییر اندازه ذرات رسی آزمایش دانه‌بندی لیزری روی نمونه خالص کائولینیت و نمونه‌های کائولینیت با pH های اولیه تثبیت‌شده در محدوده اسیدی صورت پذیرفت.



شکل ۴- منحنی رسوب‌گذاری نمونه خالص کائولینیت و نمونه‌های کائولینیت با pH های اولیه تثبیت‌شده

شکل (۵) منحنی دانه‌بندی نمونه خالص کائولینیت و نمونه‌های کائولینیت با pH های اولیه تثبیت‌شده حاصل از اندازه‌گیری لیزری را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود تغییر pH اولیه، توزیع اندازه ذرات کائولینیت را تغییر داده است. با پیشروی pH اولیه خاک از حالت طبیعی به محدوده اسیدی به دلیل افزایش غلظت یون هیدروژن ناشی از حضور محلول هیدروکلریداسید و بر اساس مکانیسم اول ذکر شده در بخش پراش پرتو ایکس نیروی جاذبه خالص بین ذرات افزایش یافته است. بنابراین افزایش نیروی جاذبه بین پولک‌ها منجر به تشکیل خوشه‌های بزرگ‌تر متشکل از تعداد بیشتری ذرات به هم چسبیده شده و در نتیجه متوسط اندازه ذرات را افزایش داده است. به گونه‌ای که فراوان‌ترین قطر ذرات برای نمونه کائولینیت طبیعی $2/5 \mu\text{m}$ است؛ درحالی‌که این مقدار برای نمونه‌های با pH اولیه ۶، ۴ و ۲ به ترتیب برابر $2/66 \mu\text{m}$ ، $2/83 \mu\text{m}$ و $3/16 \mu\text{m}$ است. مطالعات پیشین نیز نشان‌دهنده آن است که با کاهش نیروهای دافعه تمایل به دانه‌ای شدن در پولک‌های رسی به وجود می‌آید و



شکل ۳- تغییرات شدت قله اصلی نظیر کانی کائولینیت موجود در کائولینیت طبیعی با تغییر pH اولیه آن در آزمایش پراش پرتو ایکس

همچنین تغییر در ضخامت لایه دوگانه و در نتیجه تغییر در نیروهای واندروالسی موجود در بین ذرات ناشی از افزایش غلظت یون هیدروژن در نتیجه کاهش pH اولیه نمونه‌ها عامل دیگر تغییر ساختار خاک است. در خصوص مکانیسم دوم یعنی تخریب بخشی از ساختار کانی کائولینیت در pH های پایین، بررسی پژوهش‌های پیشین بیانگر آن است که تنها غلظت بالای اسید ($\text{pH}=1$) می‌تواند موجب تخریب بنیان‌های رسی شود (Van Olphen, ۱۹۹۱). از این رو مکانیسم اول را می‌توان مکانیسم‌های اصلی تغییر شدت قله پیک کائولینیت دانست.

با توجه به مکانیسم‌های ذکر شده انتظار می‌رود که شدت قله کائولینیت در نمونه با pH اولیه ۶ کاهش کم‌تری نسبت به نمونه‌ای خالص کائولینیت در مقایسه با سایر نمونه‌ها داشته باشد، حال آن‌که نتایج به دست آمده خلاف این امر است. علت این رخداد را می‌توان به حل‌شدگی کم کربنات خاک نسبت داد. بررسی مطالعات پیشین بیانگر آن است که جریان اسیدی موجب حل‌شدگی کلسیم کربنات و همچنین تخریب پیوندهای کربناتی بین اجزای رسی می‌شود (Imai و همکاران، ۲۰۰۶). به عبارت دیگر در نمونه‌های با pH اولیه ۲ و ۴ به دلیل افزایش حضور محلول هیدروکلریداسید میزان حل‌شدگی کربنات خاک که سطح پولک‌های رسی را پوشانده‌اند نیز افزایش یافته و در نتیجه با افزایش وضوح کانی کائولینیت شدت قله آن نیز افزایش یافته است. در خصوص نمونه کائولینیت با pH اولیه ۱۳ نیز، نتایج بیانگر آن است که با افزایش pH اولیه، شدت قله کانی کائولینیت افزایش یافته است. دلیل این امر را می‌توان مطابق آنچه در قسمت قبل گفته شد، ایجاد ساختار پراکنده در خاک ناشی از حضور آب منفذی با pH بالا دانست. جهت بررسی بیشتر چگونگی تغییر ساختار کائولینیت آزمایش رسوب روی نمونه خالص کائولینیت و نمونه‌های کائولینیت با pH های اولیه تثبیت صورت پذیرفت، شکل (۴) نتایج این آزمایش را نشان می‌دهد.

منجر به توسعه معادله‌ای برای تنش مؤثر بین ذرات رسی شد که در آن تأثیرات هم‌زمان تنش‌های مکانیکی و تنش‌های فیزیکی-شیمیایی وجود دارد. شکل عمومی معادله به صورت معادله (۱) است (Lambe, ۱۹۶۰).

$$\sigma^* = \sigma - u_f - (R - A) \quad (1)$$

در این معادله:

σ^* : تنش مؤثر واقعی

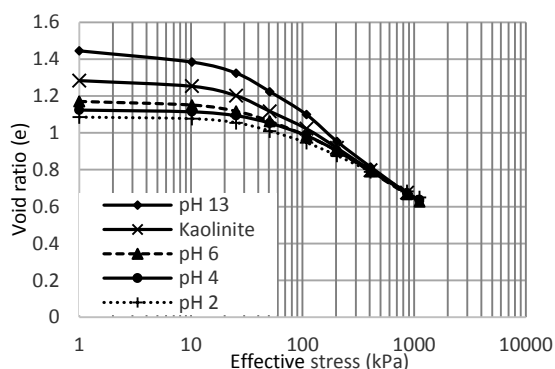
σ : تنش کل

u_f : فشار آب منفذی

$(R-A)$: تنش دافعه خالص بین ذره‌ای

حضور یون هیدروژن ناشی از حضور محلول هیدروکلرید اسید به منظور کاهش pH اولیه خاک موجب کاهش تنش دافعه خالص بین ذره‌ای رسی شده است. بر این اساس طبق معادله (۱) تحت تنش پیش تحکیمی ثابت با کاهش تنش دافعه خالص بین-ذره‌ای میزان تنش مؤثر بین ذرات خاک افزایش یافته و خاک متراکم‌تر می‌شود.

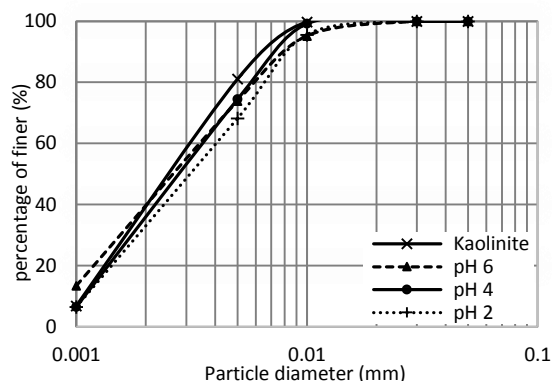
شکل (۷) تغییرات نسبت تخلخل نمونه‌ها را در مقابل تغییر pH اولیه آن‌ها در سطح تنش‌های مشخص نشان می‌دهد.



شکل ۶- منحنی نسبت منافذ در مقابل فشار تحکیمی کائولینیت با تغییر pH اولیه

به‌طور کلی شکل (۷) نشان‌دهنده آن است که با افزایش سطح تنش‌های بارگذاری، تأثیر pH اولیه بر رفتار تحکیمی کائولینیت کاهش یافته است. به‌گونه‌ای که تا سطح تنش حدود ۲۰۳/۷۳ کیلو پاسکال با کاهش pH اولیه نمونه‌ها نسبت تخلخل آن‌ها نیز کاهش یافته حال آن‌که در سطح تنش‌های بالاتر از ۲۰۳/۷۳ کیلو پاسکال کاهش pH اولیه تأثیری بر نسبت تخلخل نمونه‌ها نداشته است.

در نتیجه متوسط اندازه ذرات تغییر می‌کند (Mathew و Rao, ۲۰۱۳). بررسی نتایج ارائه شده در سه بخش پراش پرتو ایکس، رسوب‌گذاری و دانه‌بندی لیزری نشان‌دهنده هم‌پوشانی مناسبی بین نتایج حاصل است. به‌طور کلی این نتایج بیانگر تغییر ساختار خاک رسی کائولینیت و پیشروی ساختار خاک از حالت پراکنده به مجتمع و در نهایت افزایش اندازه ذرات رسی با کاهش pH اولیه خاک است.



شکل ۵- منحنی دانه‌بندی نمونه خالص کائولینیت و نمونه‌های کائولینیت با pH های اولیه تثبیت شده حاصل از اندازه‌گیری لیزری

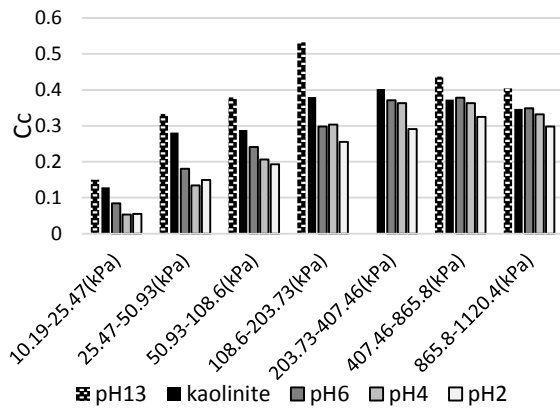
۳-۲- بررسی تغییر خصوصیات تحکیمی خاک رسی کائولینیت با تغییر pH اولیه

برای بررسی اثر تغییر pH اولیه بر رفتار تراکم‌پذیری و تحکیمی کائولینیت، آزمایش تحکیم یک‌بعدی روی نمونه‌ها صورت پذیرفت. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در شکل (۶) نشان داده شده است.

همان‌طور که در قسمت مواد و روش‌ها گفته شد، نسبت تخلخل اولیه همه نمونه‌ها تحت تنش پیش‌تحکیمی ثابت در سلول‌های تودرتو حاصل شده است. با دقت در مقادیر نسبت تخلخل اولیه نمونه‌ها می‌توان دریافت که با کاهش pH اولیه کائولینیت، ساختار نمونه‌ها تحت تنش ثابت اولیه، متراکم‌تر شده است؛ به‌گونه‌ای که نسبت تخلخل اولیه ۱/۲۸ برای کائولینیت طبیعی در حضور آب مقطر، در pH های اولیه ۶، ۴ و ۲ به ترتیب به ۱/۱۷، ۱/۱۲ و ۱/۰۸ کاهش یافته است. در مجموع این نتایج نشان‌دهنده وقوع تحکیم اسمزی در نمونه‌ها بوده است.

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان‌دهنده آن است که عکس‌العمل خاک‌های رسی را نمی‌توان به‌تنهایی به اثرات متقابل مکانیکی و یا فیزیکی-شیمیایی بین ذرات رسی نسبت داد؛ بنابراین رفتار تراکم‌پذیری خاک‌های رسی را تا حدود زیادی می‌توان متأثر از حضور توأمان عوامل مکانیکی و فیزیکی-شیمیایی بین ذرات رسی دانست (Lambe, ۱۹۵۸). این مطلب

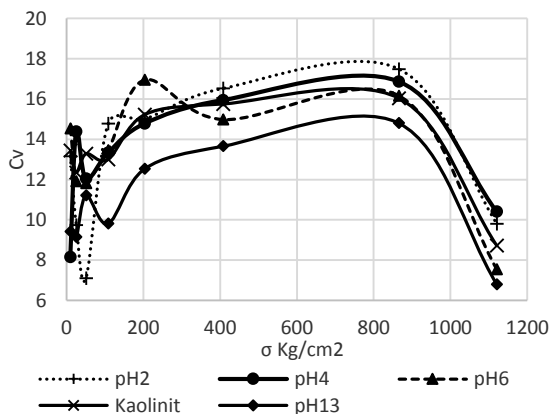
با افزایش pH اولیه خاک کائولینیت به ۱۳ شاخص فشردگی متوسط ۲۲٪ افزایش یافته است.



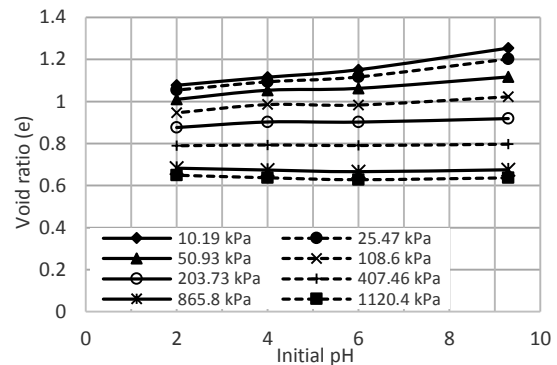
شکل ۹- مقادیر شاخص فشردگی در سطوح مختلف تنش برای نمونه خالص کائولینیت و نمونه‌های کائولینیت با pH های اولیه تثبیت شده

با دقت در شکل (۹) می‌توان دریافت که با افزایش سطح تنش‌های اعمالی، تغییرات شاخص فشردگی نسبت به تغییر pH اولیه نمونه‌ها کاهش یافته است. به عبارت دیگر با افزایش سطح تنش‌های اعمالی انحراف از معیار نمونه‌ها کاهش یافته است. بنابراین مطابق آنچه در بخش قبل گفته شد، خصوصیات مکانیکی سیستم حاکم بر رفتار تراکمی خاک شده و در نتیجه این امر تغییر pH اولیه نمونه‌ها تأثیر اندکی بر شاخص فشردگی آن‌ها داشته است.

در شکل (۱۰) تغییرات ضریب تحکیم برای نمونه کائولینیت و نمونه‌های با pH اولیه ۲، ۴، ۶ و ۱۳ نشان داده شده است.



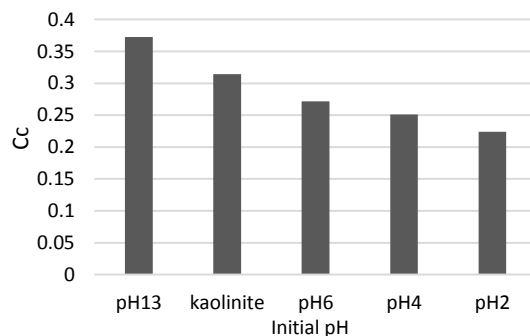
شکل ۱۰- تغییرات ضریب تحکیم برای نمونه خالص کائولینیت و نمونه‌های کائولینیت با pH های اولیه تثبیت شده



شکل ۷- تغییرات نسبت تخلخل نمونه‌ها در مقابل تغییر pH اولیه آن‌ها در سطح تنش‌های مشخص

به عبارت دیگر در صورت اعمال بارگذاری با سطح تنش زیاد، خصوصیات مکانیکی سیستم حاکم بر رفتار تراکمی خاک خواهد بود و در نتیجه خصوصیات فیزیکی- شیمیایی الکترولیت تأثیر اندکی بر عملکرد خاک داشته است. اوحدی و همکاران نیز به نتایج مشابهی در مورد خاک بنتونیت رسیده‌اند (Ouhadi و همکاران، ۲۰۰۶).

با توجه به آماده‌سازی نمونه‌ها تحت تنش پیش تحکیمی ثابت و مشخص ۱۲/۷۴ کیلو پاسکال در سلول‌های تودرتو شیب منحنی (e-log p) در تنش‌های بیشتر از ۱۲/۷۴ کیلو پاسکال بیانگر شاخص فشردگی نمونه‌ها است. از این رو مقدار متوسط شاخص فشردگی که بیانگر میانگین شاخص فشردگی در سطوح مختلف تنش است در شکل (۸) و همچنین مقادیر شاخص فشردگی در سطوح مختلف تنش در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۸- مقادیر شاخص فشردگی متوسط در سطوح مختلف تنش برای نمونه خالص کائولینیت و نمونه‌های کائولینیت با pH های اولیه تثبیت شده

شکل (۸) نشان‌دهنده آن است که با کاهش pH اولیه نمونه‌ها شاخص فشردگی آن‌ها کاهش یافته است. به گونه‌ای که با کاهش pH اولیه خاک کائولینیت به ۲، ۴، ۶ و ۱۳ شاخص فشردگی متوسط به ترتیب به میزان ۱۳٪، ۲۰٪ و ۲۸٪ کاهش یافته است. همچنین

برای کاتولینیت طبیعی در حضور آب مقطر، در pH های اولیه ۶، ۴ و ۲ به ترتیب به ۱/۱۷، ۱/۱۲ و ۱/۰۸ کاهش یافته است. در مجموع این نتایج نشان دهنده وقوع تحکیم اسمزی در نمونه‌ها بوده است.

(۵) در خصوص تغییرات شاخص فشردگی نمونه‌ها با تغییر pH اولیه آن‌ها نتایج حاصل بیانگر آن است که با کاهش pH اولیه نمونه‌ها شاخص فشردگی آن‌ها کاهش یافته است. به گونه‌ای که با کاهش pH اولیه خاک کاتولینیت به ۶، ۴ و ۲ شاخص فشردگی متوسط به ترتیب به میزان ۱۳٪، ۲۰٪ و ۲۸٪ کاهش یافته است. در حالی که با افزایش pH اولیه خاک کاتولینیت به ۱۳ شاخص فشردگی متوسط ۲۲٪ افزایش یافته است.

(۶) با کاهش pH اولیه نمونه‌ها و درهم شدن ساختار خاک میزان تراکم‌پذیری نمونه‌ها تحت تنش تحکیمی با سرعت بیشتری صورت گرفته و این امر موجب افزایش ضریب تحکیم نمونه‌ها با کاهش pH اولیه آن‌ها شده است.

۵- مراجع

احمدی م م، حسنلوراد م، خاتمی س م ح، "بررسی اثر تغییرات درجه pH شیرابه بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک رس کاتولینیت در حضور بنتونیت"، پژوهش‌های تجربی در مهندسی عمران، ۱۳۹۴، ۲، ۲۵-۳۳.

اوحدی و ر، فخیم‌جو م س، امیدنائینی س ت، "مقایسه نحوه تغییرات رفتار خمیری و نفوذپذیری بنتونیت در حضور آلاینده‌های آلی و فلزسنگین"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۵، ۴۶ (۴)، ۲۵-۳۶.

اوحدی و ر، گودرزی ا ر، "تأثیر تغییر خصوصیات مایع منفذی و افزایش درجه حرارت بر پارامترهای ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی رس اسمکتیت"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۳، ۴۴ (۳)، ۱۷-۲۵.

بدو ک، ارجمند قره‌قشلاقی م، "اثر سیستم پوشش تک‌لایه در کنترل زهاب اسیدی سدهای باطله معادن"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۶، ۴۷ (۴)، ۹۹-۱۱۲.

گودرزی ا ر، اکبری ح ر، "تأثیر ترکیب پسماندهای صنعتی و آهک بر رفتار هیدرومکانیکی رس‌ها"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۸، ۴۹ (۱)، ۹۷-۱۰۸.

American Society for Testing and Materials, "ASTM, 1992 American Society for Testing and Materials, ASTM, Annual Book of ASTM Standards", 1992, P.A., Philadelphia 4, 08.

Bakhsipour Z, Asadi A, Huat BB, Sridharan A, Kawasaki S, "Effect of acid rain on geotechnical properties of residual soils", Soils and Foundations, 2016, 56 (6), 1008-1020.

ضریب تحکیم بیانگر رابطه بین تغییر شکل‌های تحکیمی و زمان است. به عبارت دیگر این ضریب وضعیت و سرعت حذف فشار آب حفره‌ای اضافی و تراکم‌پذیری خاک را نشان می‌دهد. نتایج حاصل بیانگر آن است که به‌طور کلی با کاهش pH اولیه خاک ضریب تحکیم نمونه‌ها افزایش یافته است. به عبارت دیگر با کاهش pH اولیه نمونه‌ها نشست نمونه‌ها در مدت زمان کم‌تری صورت می‌گیرد.

مطابق نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های پراش پرتو ایکس و رسوب کاهش pH اولیه نمونه‌ها موجب ایجاد ساختار درهم در آن‌ها شده است. لذا با درهم شدن ساختار خاک میزان نشست نمونه‌ها تحت تنش تحکیمی با سرعت بیشتری صورت گرفته و این امر موجب افزایش ضریب تحکیم نمونه‌ها با کاهش pH اولیه شده است.

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در این مقاله نتایج ذیل قابل استخراج است:

(۱) نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های پراش پرتو ایکس بیانگر آن است که با کاهش pH اولیه نمونه‌ها و غلبه نیروهای جاذبه بر دافعه بین پولک‌های رسی، ساختار از حالت پراکنده به درهم تبدیل شده و این امر موجب کاهش شدت پیک‌های کاتولینیت با کاهش pH اولیه نمونه‌ها گردیده است. به گونه‌ای که شدت درهم شدن ساختار نیز با کاهش pH اولیه افزایش یافته است. همچنین نتایج بیانگر آن بوده است که افزایش pH اولیه نمونه‌ها به دلیل پراکنده کردن ساختار خاک موجب افزایش شدت پیک کاتولینیت گردیده است.

(۲) نتایج حاصل از انجام آزمایش رسوب نیز بیانگر آن است که، با کاهش pH اولیه نمونه‌ها میزان رسوب‌گذاری آن‌ها افزایش یافته است. این امر مؤید درهم شدن ساختار خاک است. در حالی که فرارگیری pH اولیه نمونه‌ها در محدوده بازی با پراکنده کردن ساختار خاک موجب عدم رسوب نمونه‌ها گردیده است.

(۳) با کاهش pH اولیه خاک در محدوده اسیدی به دلیل افزایش غلظت یون هیدروژن و به تبع آن کاهش نیروهای دافعه بین‌ذره‌ای تمایل به دانه‌ای شدن در پولک‌های رسی افزایش یافته است. به گونه‌ای که بر اساس نتایج حاصل از آزمایش دانه‌بندی لیزری فراوان‌ترین قطر ذرات برای نمونه کاتولینیت طبیعی $3/16 \mu m$ و $2/83 \mu m$ بوده است؛ در حالی که این مقدار برای نمونه‌های با pH اولیه ۶، ۴ و ۲ به ترتیب برابر $2/66 \mu m$ ، $2/83 \mu m$ و $3/16 \mu m$ شده است.

(۴) بررسی نتایج حاصل از تحکیم یک بعدی بیانگر آن است که با کاهش pH اولیه کاتولینیت، ساختار نمونه‌ها تحت تنش ثابت اولیه، متراکم‌تر شده است. به گونه‌ای که نسبت تخلخل اولیه ۱/۲۸

- Van Olphen H, "An Introduction to Clay Colloid Chemistry: For Clay Technologists, Geologists, and Soil Scientist", Krieger, Marabal, Florida, 1991.
- Yong RN, "Geoenvironmental Engineering: Contaminated Soils, Pollutant Fate and Mitigation", CRC Press, 2001.
- Chavali RV, Ponnareddy HP, "Swelling and compressibility characteristics of bentonite and kaolin clay subjected to inorganic acid contamination", International Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 12 (5), 500-506.
- Chen J, Anandarajah A, Inyang H, "Pore fluid properties and compressibility of kaolinite", Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2000, 126 (9), 798-807.
- Gori U, "The pH influence on the index properties of clays", Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, 1994, 50 (1), 37-42.
- Gratchev I, Towhata I, "Compressibility of soils containing kaolinite in acidic environments", KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20 (2), 623-30.
- Gratchev I, Towhata I, "Compressibility of natural soils subjected to long-term acidic contamination", Environmental Earth Sciences, 2011, 64 (1), 193-200.
- Gratchev I, Towhata I, "Stress-strain characteristics of two natural soils subjected to long-term acidic contamination", Soils and foundations, 2013, 53 (3), 469-476.
- Imai G, Komatsu Y, Fukue M, "Consolidation yield stress of Osaka-Bay pleistocene clay with reference to calcium carbonate contents", Journal of ASTM International, 2006, 3 (7), 1-9.
- Jozefaciuk G, "Effect of acid and alkali treatments on surface-charge properties of selected minerals", Clays and Clay Minerals, 2002, 50 (5), 647-656.
- Lambe TW, "The structure of compacted clay", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1958, 84 (2), 1-34.
- Lambe TW, "Compacted clay: structure", Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1960, 125 (1), 682-705.
- Liu Y, Gates WP, Bouazza A, "Acid induced degradation of the bentonite component used in geosynthetic clay liners", Geotextiles and Geomembranes, 2013, 36, 71-80.
- Mitchell JK, Soga K, "Fundamentals of soil behavior", Fundamentals of soil behavior, 2005, (Ed. 3).
- Olgun M, Yildiz M, "Influence of acetic acid on structural change and shear strength of clays", Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2012, 36 (C1), 25-38.
- Ouhadi VR, Yong RN, Sedighi M, "Influence of heavy metal contaminants at variable pH regimes on rheological behaviour of bentonite", Applied Clay Science, 2006, 32 (3-4), 217-231.
- Rao SN, Mathew PK, "Effects of exchangeable cations on hydraulic conductivity of a marine clay", Clays and clay minerals, 1995, 43 (4), 433-437.
- Spagnoli G, Rubinos D, Stanjek H, Fernández-Steeger T, Feinendegen M, Azzam R, "Undrained shear strength of clays as modified by pH variations", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2012, 71 (1), 135-148.
- Sunil BM, Nayak S, Shrihari S, "Effect of pH on the geotechnical properties of laterite", Engineering geology, 2006, 85 (1-2), 197-203.

EXTENDED ABSTRACT

Impact of Initial pH Change of Kaolinite on Its Microstructure and Consolidation Characteristics

Mohammadreza Shabanian, Ahad Ouria *

Civil Engineering Department, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received: 11 July 2019; **Accepted:** 17 February 2021

Keywords:

Kaolinite, Initial pH, Microstructure, Consolidation characteristics.

1. Introduction

Acidic agents are considered as one of the most prevalent contaminants on the earth. Several sites are exposed to acidic pollutants like Acetic acid (Olgun and Yildiz, 2012). According to previous researches, the causes of acidic contaminations in soil could be natural processes like weathering of pyrite in mudstone, or human activities like municipal waste storage, accidental spills, or acidic rain (Gratchev and Towhata, 2013). On the other hand, changes in the chemical properties of the pore fluid have a considerable effect on the geotechnical characteristics of clay, including the compressibility and the shear strength parameters all of which are important parameters on the strength and the stability of earth structures and constructions on the soil. Therefore, it seems to be necessary to recognize and analyze the effective factors on the engineering behavior of clay soils like pH.

In most of the available research, experiments have been conducted by adding acidic or alkaline agents to the soil-water mixture and adjusting its, pH whereas it seems that the pH would have some variations by time. Therefore, the effects of the changes in the initial pH of the soil are neglected in the previous studies. In this study, the effect of the initial pH of the pore fluid of the kaolinite on its microstructural and consolidation characteristics has been investigated in the laboratory.

2. Methodology

In this research, at first, the water and soil were mixed with the portion of 1:10 (10 water and 1 soil) to initialize the stabilization process of the initial pH of the kaolinite. Then in order to prepare kaolinite samples with stabilized initial pHs of 2, 4, and 6, 1M Hydrochloric acid solution was added to the mixture of water and kaolinite while the suspension was mixed by a rotary mixer. Adding Hydrochloride acid solution to samples was continued daily until the pH of the mixture was reached the desired pH. The process of mixing was repeated every day for at least 2 hours in successive cycles to keep the pH of the mixture in the desired range of PH for 96 hours.

Fig. 1 shows the changes of the pH in samples while adding the acidic agent to the soil-water mixture. As can be seen in Figure 1, the pH of the soil-water mixture had reached a steady-state condition after several cycles of exposing to the acidic agent depending on the desired level of the pH. Higher values of the pH require more cycles of exposing to the acidic agent, while lower steady-state pH values are reached by a few cycles of exposing to the acidic agent.

After stabilization of the initial pH of samples, several tests have been conducted on the samples, including sedimentation, X-ray diffraction (XRD), laser gradation, and consolidation according to ASTM standard. The

* Corresponding Author

E-mail addresses: mohammadreza.shabanian@uma.ac.ir (Mohammadreza Shabanian), aouria@uma.ac.ir (Ahad Ouria)

tests were repeated at least two times to ensure the reputability of the experiments and reduce the possible errors.

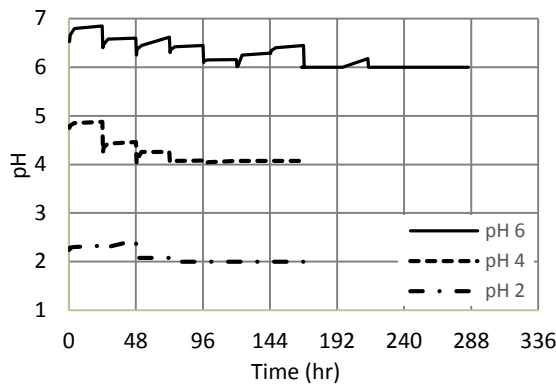


Fig. 1. PH variations in samples while adding acid to the soil

3. Results and discussion

3.1. The investigation of changes in fabrics of kaolinite by changes of initial pH

Fig. 2 shows peak intensity variation of kaolinite by initial pH variations in XRD test. According to Fig. 2, the rate of kaolinite peak intensity reduction in samples with the pH of 2, 4 and 6 are 50%, 42% and 48% relatively compared to the main kaolinite sample. Generally, the results show a change in fabrics of kaolinite clay and the progress of soil fabrics from dispersed to flocculated with a reduction in initial pH of soil.

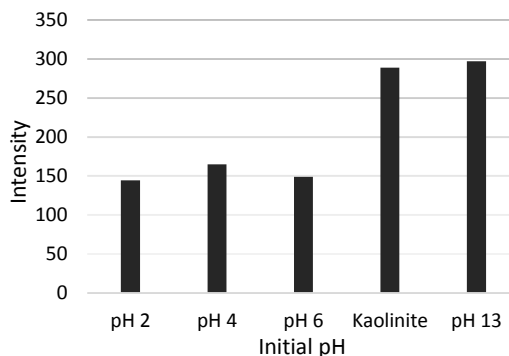


Fig. 2. The peak intensity variation of kaolinite by initial pH variations in XRD test

Fig.3 shows a laser gradation plot of a pure kaolinite sample and kaolinite samples with stable initial pHs from laser measuring. As can be seen in Fig. 3, a reduction of initial pH and increasing the attraction between the clay particles, caused a kind of flocculation that increased the average particles size measured in the tests.

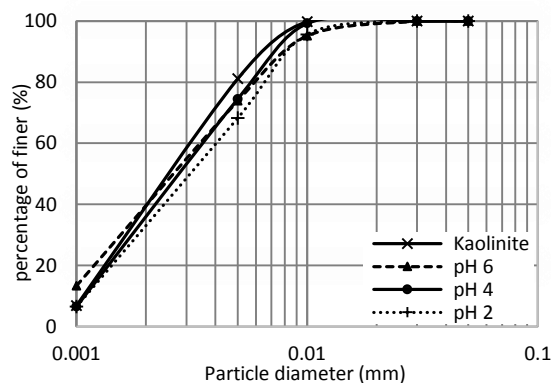


Fig. 3. Laser gradation plot of a pure kaolinite sample and kaolinite samples with stable initial pHs

3.2. The investigation of variations of consolidation characteristics of kaolinite soil by changes in initial pH

To investigate the effects of initial pH variations on the compressibility behavior of kaolinite, the odometer test has been done on the samples. The outcomes are shown in Fig. 4.

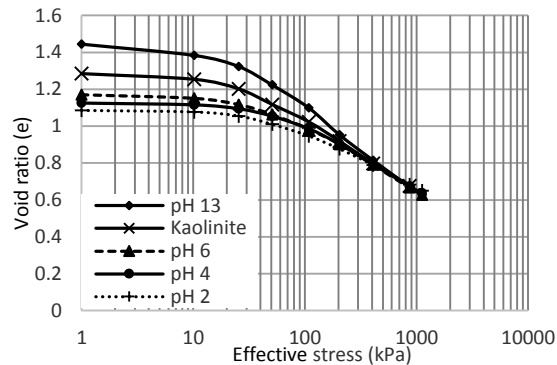


Fig. 4. Consolidation performance of kaolinite samples with stable initial pHs

Availability of Hydrogen ion from Hydrochloride acid solution with the purpose of reducing soil initial pH, leads to an increase in inter-particle pure repulsive. According to previous studies, the effective tension among soil particles has been increased, and the soil gets denser under pre-consolidation tension.

4. Conclusions

Investigating the results presented in three sections of X-ray diffraction, sedimentation and laser granulation indicates an appropriate overlap between the results. In general, these results indicate a change in the structure of the kaolinite and the progression of the soil structure from dispersed to the folliculated structure, and ultimately increasing the measured size of clay particles by reducing the initial soil pH.

The results of the one-dimensional consolidation show that the structure of the specimens has become denser under initial constant stress by decreasing the initial pH of the kaolinite. Also, regarding the changes in the compression index of samples, the results indicate that with decreasing the initial pH of the samples, their compression index was decreased.

5. References

- American Society for Testing and Materials, "ASTM, 1992 American Society for Testing and Materials, ASTM, Annual Book of ASTM Standards", 1992, P.A., Philadelphia 4, 08.
- Olgun M, Yildiz M, "Influence of acetic acid on structural change and shear strength of clays", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2012, 36 (C1), 25-38.
- Gratchev I, Towhata I, "Stress-strain characteristics of two natural soils subjected to long-term acidic contamination", *Soils and foundations*, 2013, 53 (3), 469-76.