

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر مشخصات سیال منفذی بر رفتار هسته رسی سدهای خاکی از منظر ریزساختاری

محمد امیری*^۱، رحیم زارع^۲

^۱ دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

دریافت: ۱۳۹۸/۵/۷، پذیرش: ۱۳۹۹/۲/۳۱، نشر آنلاین: ۱۳۹۹/۲/۳۱

چکیده

پیدایش و انحلال نمک‌های محلول در مخزن سدهای خاکی از مسائل مهم در طراحی مخزن سدها است که می‌تواند موجب تغییر رفتار در هسته رسی شود. این تغییرات رفتاری ممکن است باعث ایجاد خطرات عمده برای سازه سدهای خاکی شود. از این‌رو هدف پژوهش حاضر بررسی تأثیر نمک‌های محلول (سیال منفذی) بر رفتار ژئوتکنیکی هسته رسی سدهای خاکی با نگرش به تغییرات ضریب نفوذپذیری از منظر ریزساختاری است. در این راستا سیال منفذی سدیم کلرید (NaCl) با ۸ غلظت مختلف (۰، ۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۸، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۸، ۱/۷ مولار) به خاک مورد مطالعه افزوده شده است و مکانیزم تغییر رفتار ژئوتکنیکی هسته رسی تحت تأثیر نمک‌های محلول با نگرش به تغییرات حدود اتبرگ (Atterberg Limits)، تغییرات پارامترهای مقاومتی، تغییرات ضریب نفوذپذیری و بررسی احتمال پدیده واگرایی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای ارزیابی تأثیر تغییر مشخصات سیال منفذی بر مشخصات ژئوتکنیکی خاک از منظر ریزساختاری، آزمون ارزیابی پراش پرتو ایکس ((X-ray Diffraction (XRD)) و تصویر میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) از نمونه‌ها تهیه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. براساس نتایج پژوهش حاضر به‌طور کلی پیدایش و انحلال نمک‌های محلول در مخزن سدهای خاکی هرچند در کوتاه‌مدت ممکن است باعث کاهش ۷۰٪ ضریب نفوذپذیری شود اما در درازمدت و با تغییر غلظت نمک موجود در مخزن ممکن است میزان ضریب نفوذپذیری تا ۹ برابر افزایش یابد. در حقیقت براساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی و آنالیز پراش اشعه ایکس رسوب بلورهای نمک، مانند هالیت (Halite) در کوتاه‌مدت موجب کاهش نفوذپذیری می‌شود. از سوی دیگر تشکیل ساختار مجتمع و شسته شدن بلورهای نمک هالیت رسوب کرده در ساختار موجب افزایش ضریب نفوذپذیری در درازمدت شده است.

کلیدواژه‌ها: سیال منفذی، سدهای خاکی، نفوذپذیری، SEM، XRD.

۱- مقدمه

از سوی دیگر فراوانی آب‌های شور در سطح زمین و پیشروی آن‌ها به سمت منابع آب شیرین و خشکی‌ها، ورود مواد شیمیایی ناشی از شیرابه محل‌های دفن زباله یا مواد زائد ناشی از کارخانه‌های صنعتی به خاک‌ها از جمله عوامل دیگری هستند که می‌توانند باعث تغییر در میزان و نوع شوری خاک‌ها و در نتیجه خواص ژئوتکنیکی آن‌ها شوند (Ouhadi و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین باید در نظر داشت خاک ایده‌آل مورد استفاده در هسته سدهای خاکی بایستی غیرواگرا با نفوذپذیری پایین و مقاومت برشی زیاد باشد (Rahimi، ۲۰۱۵).

خاک‌های رسی به دلیل ساختمان لایه‌ای و داشتن سطح مخصوص بزرگ، قادر به اندرکنش با مواد موجود در سیال حفره‌ای بوده همچنین تبادل کاتیونی بین کاتیون‌های موجود در سیال

کشور ایران به دلیل قرار گرفتن در مناطق خشک و نیمه-خشک، با مشکلات شوری و قلیائیت روبرو است. حدود ۱۵ درصد کل ایران را خاک‌های شور فرا گرفته و حدود ۱۰ درصد آب‌های ایران شور است (Saboor و همکاران، ۲۰۱۵). با توجه به گستردگی مخازن سدهای بزرگ و عدم امکان تغییر محور سدها به دلیل محدودیت‌های مختلف، امکان دارد که پس از آبیگری، آب دریاچه سد با سازندهای کارستی (که می‌تواند متشکل از لایه‌های آهکی، گچی و یا نمکی باشند) در تماس قرار گیرد و به دلیل انحلال‌پذیری زیاد این تشکیلات خصوصاً اگر حاوی نمک باشند، باعث بروز خطرانی از جمله تغییر رفتار ژئوتکنیکی هسته رسی، پس از بهره‌برداری از سدهای خاکی شوند.

* نویسنده مسئول: شماره تماس: ۰۹۱۷۷۲۹۲۸۹۶

Goodarzi و Ouhadi (۲۰۰۶) با استفاده از مخلوط خاک بنتونیت^۱ و نمک‌های سدیم با منشأ آنیونی متفاوت مجموعه‌ای از نمونه‌های مصنوعی خاک-الکترولیت را تهیه و سپس تغییر رفتار خاک را بررسی کردند و دریافتند که وجود کاتیون سدیم در غلظت‌های کم باعث ایجاد ساختمان پراکنده و در غلظت زیاد موجب ایجاد ساختمان فلوکوله^۲ می‌شود.

Mansour و همکاران (۲۰۰۸) بیان نمودند حضور کاتیون‌های قابل تبادل با ظرفیت زیاد (مثل Ca^{2+} و Mg^{2+}) در آب شور دریای مرده^۳، به واسطه کاهش نیروی دافعه بین ذرات، فاصله بین ذرات را کاهش می‌دهد. این عمل باعث غلبه نیروی جاذبه و اندروالسی شده و سرانجام موجب تجمع ذرات می‌شود. از طرفی تجمع ذرات، سطح تماس آن‌ها با آب را کاهش داده و بنابراین تأثیر کاهنده‌ای بر روی حدود اتربرگ دارد.

Nguyen و همکاران (۲۰۱۳) تأثیرات شیمیایی آب حفره‌ای بر رفتار مکانیکی خاک رس طبیعی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها معتقدند هرچه آب منفذی دارای شوری بیشتری باشد باعث افزایش نفوذپذیری خاک می‌شود. آن‌ها علت افزایش نفوذپذیری را به تغییر ریزساختاری ذرات رس نسبت داده‌اند.

Chang و Yan (۲۰۱۵) معتقدند افزایش غلظت یونی باعث تضعیف پیوند میان ذرات خاک می‌شود که به نوبه خود باعث کاهش حد روانی می‌شود. نتایج مطالعات Sen و همکاران (۲۰۱۷) بیانگر این است که تغییرات در رفتار خاک‌های رسی ناشی از نمک‌های محلول می‌تواند با تغییرات در تئوری پراکندگی لایه دوگانه توضیح داده شود. همچنین با افزایش غلظت یون، ضخامت لایه دوگانه کاهش می‌یابد که باعث فلوکوله شدن ذرات رس می‌شود.

Garakani و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر نمک‌های $CaCl_2$ ، $NaCl$ و KCl را بر روی خاک غیراشباع بررسی کردند. نتایج حاکی از آن است که افزودن نمک $NaCl$ به خاک بیش‌ترین تأثیر در افزایش مقاومت در مقابل خاک بدون محلول‌های نمک را دارد. در ادامه Tongwei و همکاران (۲۰۱۹)، به بررسی اثر شوری آب منفذی بر رفتار مجتمع شدن و ترک خوردگی کائولن^۴ و بنتونیت پرداختند.

با توجه به مطالعات گسترده‌ای که بر روی تأثیر سیال منفذی بر خاک‌های رسی انجام شده است، اما مطالعه جامعی از منظر ریزساختاری با نگرش به تغییرات ضریب نفوذپذیری بر خاک‌های رسی انجام نشده است. بر این اساس هدف این مطالعه بررسی تغییرات ضریب نفوذپذیری و خواص مهندسی خاک‌های رسی با نگرش ویژه به تغییرات ضریب نفوذپذیری هسته رسی سدهای

حفره‌ای و کاتیون‌های تبدالی کانی رسی موجب تغییر رفتار ژئوتکنیکی خاک می‌شود (Ouhadi و همکاران، ۲۰۱۵).

به‌طور کلی، تغییر رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه (خاک رس) تحت تأثیر نمک‌های معدنی به نوع کانی رسی تشکیل‌دهنده خاک و مایع منفذی بستگی دارد (Sen و همکاران ۲۰۱۷). از این رو نوع مایع منفذی ممکن است به‌طور قابل توجهی ترکیبات شیمیایی و ساختار ریخت‌شناسی خاک رس را با استفاده از کاتیون‌های تبدالی تغییر دهد (Yukselen و همکاران، ۲۰۰۸). به‌طور کلی، غلظت یون‌ها بر نیروهای بین مولکولی خاک (یعنی دافعه لایه دوگانه و جاذبه و اندروالسی) و ساختار مواد تأثیر می‌گذارد (Weimin و همکاران، ۲۰۱۴ و Zhu و همکاران، ۲۰۱۵). در نتیجه چنین تغییراتی در ساختار خاک خواص مهندسی آن را تغییر می‌دهد (Chang و Yan، ۲۰۱۵). این تغییر عمدتاً از تغییرات در وضعیت فیزیکی-شیمیایی ذرات خاک ایجاد می‌شود و باعث تغییر در ضخامت لایه دوگانه می‌شود.

شیمی سیال منفذی یکی از عواملی است که ضخامت لایه آب جذب‌شده در محیط اطراف خاک رس را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر، غلظت کاتیون، ظرفیت بالای کاتیون و محیط اسیدی به‌طور چشمگیری ضخامت لایه دوگانه در اطراف ذرات رس را کاهش می‌دهد (Chang و Yan، ۲۰۱۵ و Wang و همکاران، ۲۰۱۲). در حالت کلی مطالعات قبلی نشان داده است که شوری سیال منفذی به‌شدت بر رفتار خاک‌های ریزدانه تأثیرگذار است (Soga و Mitchell، ۲۰۰۵ و Yan و Chang، ۲۰۱۵). لذا با توجه به حضور آلاینده‌ها که گاهی اوقات غیرقابل اجتناب است درک مکانیزم‌های پایه در اصلاح خواص فیزیکی و مهندسی خاک تحت تأثیر مواد شیمیایی یا نمک‌های شیمیایی ضروری است (Sen و همکاران ۲۰۱۷). در خصوص بررسی و تعیین اثر محلول‌ها و نمک‌های مختلف بر خواص مهندسی خاک‌های رسی تحقیقات پراکنده و متنوعی توسط محققان مختلف انجام گرفته است. Lambe (۱۹۵۸) معتقد است در یک نسبت تخلخل معین، هر تغییری در سیستم آب-خاک که لایه دوگانه را متورم کند، در جهت کاهش مقاومت عمل می‌کند.

Mitchell (۱۹۹۳) بیان می‌کند که علاوه بر نوع و میزان رس موجود در خاک، مشخصات شیمیایی آن نظیر میزان، نوع آنیون و کاتیون‌های موجود نیز تأثیر بسزایی در رفتار فیزیکی و مکانیکی خاک نظیر ساختمان، مقاومت برشی، تحکیم‌پذیری و به‌ویژه خاصیت تورم‌پذیری دارد. همچنین در مطالعاتی که توسط Chaudhari (۲۰۰۱) انجام شده است با افزایش غلظت سیال منفذی، ضریب نفوذپذیری افزایش یافته است. آن‌ها این تغییر را به کاهش ضخامت لایه دوگانه نسبت داده‌اند.

حاوی غلظت‌های مختلف نمک سدیم کلرید تحت نفوذ آب مقطر قرار گرفت و میزان ضریب نفوذپذیری اندازه‌گیری شد. در آزمایش نفوذپذیری ابتدا نمونه‌ها با رطوبت بهینه و وزن واحد حجم اکتباس شده از آزمایش تراکم درون محفظه دستگاه نفوذپذیری متراکم شده و سپس کاغذ صافی و سنگ تخلخل در پایین و بالای آن‌ها قرار گرفته است و پس از اطمینان از اشباع شدن نمونه‌ها آزمون نفوذپذیری انجام شد.

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره طبق استاندارد ASTM D2166 بر روی نمونه‌های حاوی غلظت‌های مختلف سیال منفذی سدیم کلرید انجام شده است. در این آزمون از دستگاه مدل S051 با سرعت اعمال تنش ۰/۱ میلی‌متر بر ثانیه استفاده شد. برای تعیین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک^۶ (CEC) از محلول باریم کلرید ۰/۱ مولار استفاده شد (Handershot, ۱۹۸۶). جهت تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک (C و ϕ) و تأثیر افزودن سیال منفذی سدیم کلرید از آزمایش برش مستقیم استفاده شد. آزمون برش مستقیم بر روی خاک حاوی غلظت‌های مختلف سیال منفذی سدیم کلرید طبق استاندارد ASTM D3080 انجام شده است. برای تعیین درصد واگرایی نمونه‌ها از آزمایش‌های هیدرومتری دوگانه و کرامب^۷ استفاده شد. آزمایش هیدرومتری دوگانه طبق استاندارد ASTM D4221-1999 انجام شد. در این آزمون دانه‌بندی خاک ابتدا مطابق با استاندارد آزمایش هیدرومتری (ASTM D422) با استفاده از همزن مکانیکی و ماده پراکنده‌ساز شیمیایی بر روی ۱۰۰ گرم از نمونه خاک با رطوبت طبیعی عبوری از الک دو میلی‌متر انجام گرفت. سپس آزمایش دیگری بر روی نمونه‌ای مشابه اما این بار بدون استفاده از همزن مکانیکی و ماده پراکنده‌ساز صورت پذیرفت. درصد واگرایی خاک در آزمایش هیدرومتری دوگانه به‌صورت نسبت درصد ذرات کوچک‌تر از ۰/۰۰۵ میلی‌متر در آزمایش دوم به آزمایش اول بیان می‌شود.

آزمایش کرامب طبق استاندارد ASTM D6572-2000 صورت پذیرفت. در ابتدا نمونه‌هایی از خاک رد شده از الک ۲ میلی‌متر به‌صورت مکعبی شکل به ابعاد تقریباً ۱۵ میلی‌متر ساخته و با دقت درون ۲۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر قرار داده شدند. سپس مشاهدات طبق چهار حالت غیرواگرا، نیمه‌واگرا، واگرا و به‌شدت واگرا در زمان‌های دو دقیقه، یک ساعت و شش ساعت مشاهده شده و درصد واگرایی ثبت شده است. آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) بر روی خاک طبیعی و خاک طبیعی حاوی غلظت‌های مختلف سیال منفذی سدیم کلرید انجام شده است. بدین منظور از نمونه‌های موردنظر یک گرم خاک خشک‌شده در مجاورت هوا با دقت ۰/۰۰۱ وزن شده و در تیوب سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتر ریخته شد. سپس

خاکی در حضور نمک محلول سدیم کلرید به‌عنوان سیال منفذی از منظر ریزساختاری است.

۲- مواد و روش‌ها

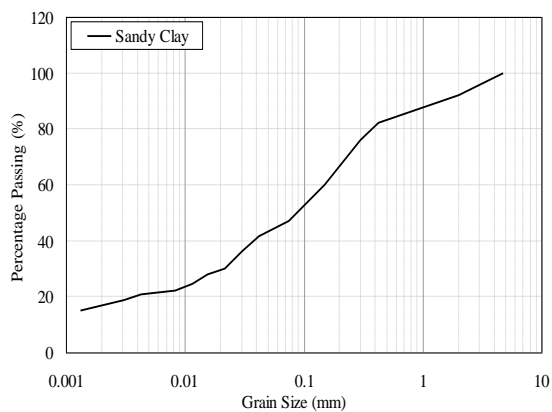
از آنجایی که مصالح استفاده‌شده در هسته سدهای خاکی باید تراوایی کمی داشته باشند معمولاً از رس‌های ماسه‌دار یا ماسه‌هایی با میزان رس زیاد، رس‌های شن‌دار و یا شن رس‌دار استفاده می‌شود. برای ساخت هسته‌های رسی در سدهای خاکی معمولاً از رس‌هایی با شاخص خمیری ۱۵ تا ۲۵ استفاده می‌شود (Rahimi, ۲۰۱۵). لذا باتوجه به رعایت نکات اجرایی مذکور در ساخت هسته سدهای خاکی، خاک مورد استفاده در این مطالعه، ماسه رس‌دار (SC) با منحنی دانه‌بندی ارائه‌شده در شکل (۱) است. برای بررسی تأثیر غلظت نمک سیال منفذی بر خواص ژئوتکنیکی و ریزساختاری خاک مورد مطالعه از نمک سدیم کلرید (NaCl) ساخت شرکت مرک آلمان استفاده شده است. شایان‌ذکر است در پژوهش حاضر غلظت‌های انتخاب شده براساس طبقه‌بندی میزان شوری موجود در آب‌های شور است (جدول (۱)). بدین منظور، محلول سدیم کلرید با غلظت‌های ۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۸، ۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۸ و ۱/۷ مولار تهیه شد. پس از آماده‌سازی محلول‌های کلرید سدیم، محلول‌ها با نسبت ۱ به ۲ (۱ خاک، ۲ سیال منفذی) با خاک مخلوط شد و به‌مدت ۴۸ ساعت جهت جذب سیال در کانی‌های رسی بر روی لرزاننده الکتریکی قرار داده شدند. پس از عمل مخلوط‌سازی، هر یک از نمونه‌های ترکیب‌شده در دمای طبیعی خشک شده و در انتها مورد آزمایش قرار گرفت. مشخصات محلول مصرفی در جدول (۱) و برخی از مشخصات ژئوتکنیکی خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر در جدول (۲) ارائه شده است. به‌منظور تعیین حدود اتربرگ، نمونه‌های آماده‌شده، با آب مقطر مرطوب شده و درون کیسه‌های نایلونی به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شده است. آزمایش حدود اتربرگ طبق استاندارد ASTM D4318-10 با استفاده از جام کاساگرانده^۵ و از روش‌تر به خشک صورت گرفت. آزمایش نفوذپذیری طبق استاندارد ASTM D2434-87 با روش بار افتان بر روی نمونه‌ها انجام شد. در این مقاله برای بررسی تأثیر غلظت نمک سیال منفذی بر میزان نفوذپذیری از دو روش استفاده شد.

آزمایش نفوذپذیری در بخش اول بر روی خاک طبیعی تحت نفوذ غلظت‌های مختلف محلول سدیم کلرید انجام شد و میزان ضریب نفوذپذیری در طی بازه زمانی ۵۰۴ ساعت اندازه‌گیری شد. شایان‌ذکر است در این روش پس از اتمام آزمون، نمونه‌ها از سلول نفوذپذیری خارج و مشخصات ژئوتکنیکی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش دوم، آزمون نفوذپذیری بر روی خاک طبیعی

7. Crumb

5. Casgrande

6. Cation Exchange Capacity



شکل ۱- منحنی دانه بندی خاک مورد استفاده (ماسه رس دار)

محلول مورد نظر توسط لرزاننده الکتریکی هم زده شده و جهت اطمینان از به دست آمدن شرایط تعادل، نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند. در نهایت ۵ تا ۷ قطره از محلول بر اسلاید شیشه ای ریخته می شود (Yong و Ouhadi, ۲۰۱۳). طیف XRD با اسکن ۲θ و محدوده ۲ تا ۶۰ درجه مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین جهت تحلیل منحنی های حاصل از پراش پرتو ایکس از نرم افزار 3 Xpert- استفاده شده است. آزمایش پراش پرتو ایکس با استفاده از دستگاه مدل D8 advance ساخت کمپانی Bruker کشور آلمان تهیه شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی پویشی (SEM) با استفاده از دستگاه TESCAN-Vega3 ساخت کمپانی TESCAN جمهوری چک تهیه شده است. شایان ذکر است کلیه آزمایش های ریزساختاری (XRD و SEM) در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شیراز انجام گرفته است.

جدول ۱- مشخصات غلظت های محلول مورد استفاده در پژوهش

آب نمک	آب با شوری بسیار زیاد	آب با شوری زیاد	آب شور	آب با شوری کم	آب شیرین	آب مقطر
۱/۷	۰/۸	۰/۴	۰/۲	۰/۰۸	۰/۰۴	۰
۷/۶۵	۸/۵	۸	۷/۸۱	۷/۶۵	۷/۶۲	۷/۲۸
۱۲۵	۶۹/۸	۳۸/۳	۱۹/۵	۸/۳	۴/۵	۰/۱۳

جدول ۲- برخی مشخصات ژئوتکنیکی خاک مورد استفاده در پژوهش

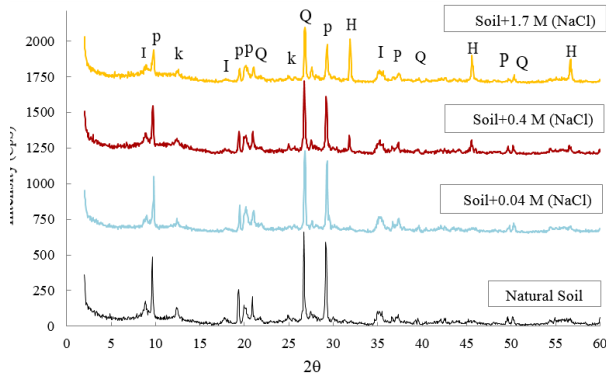
مراجع مورد استفاده	مقدار اندازه گیری شده	خصوصیات فیزیکی خاک
ASTM D422	۴۵	درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰ (#۲۰۰) (%)
ASTM D422-87	SC	طبقه بندی خاک
ASTM D4318	۳۷	حد روانی (%)
ASTM D4318	۲۰	حد خمیری (%)
ASTM D4318	۱۷	شاخص خمیری (%)
ASTM D698	۱۳/۵	میزان رطوبت بهینه (%)
ASTM C575	۶	درصد کرنات
ASTM D4972	۸/۲	pH (1:10; soil: water)
ASTM D1125-95	۰/۴۸	هدایت الکتریکی (ms/cm)
Handershot, 1986	۲/۴	ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol/kg-soil)
ASTM D3080	۰/۶۷	چسبندگی (kg/cm ²)
ASTM D3080	۲۴/۸	زاویه اصطکاک داخلی (φ°)
ASTM D698	۱/۹	وزن مخصوص خشک (g/cm ³)
ASTM D2166	۲/۶۳	مقاومت محصور نشده (kg/cm ²)
ASTM D2216	پیروفیلیت، ایلیت، کائولینیت، کوآرتز	ترکیبات کانی خاک با استفاده از آنالیز اشعه ایکس (XRD)

۳- بحث و بررسی

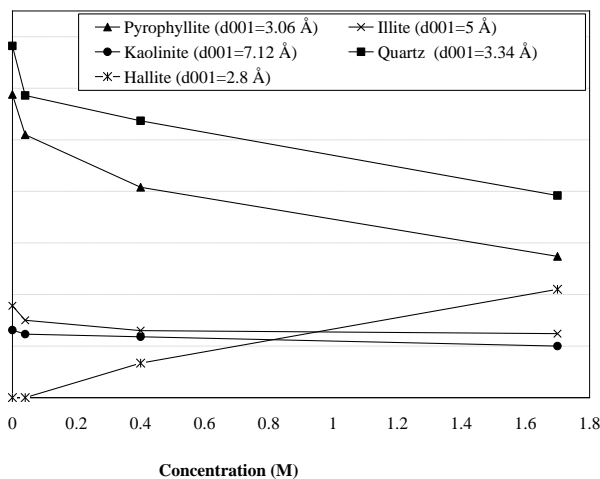
۳-۱- بررسی ریزساختاری و تغییرات شدت قله کانی ها

ارزیابی پراش پرتو ایکس (XRD) به عنوان یک معیار در تعیین ریزساختار خاک ها شناخته شده است. به منظور امکان تفسیر رفتار مشاهده شده از دیدگاه ریزساختاری، پراش پرتو ایکس خاک طبیعی و نمونه های خاک طبیعی حاوی غلظت های مختلف سیال

منفذی سدیم کلرید تهیه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. مقایسه نتایج آنالیز XRD انجام گرفته بر روی خاک طبیعی در شکل (۲) نشان می دهد که بخش قابل توجه این خاک از کانی های رسی مربوط به کانی پیروفیلیت (کانی گروه اسمکتیت (Smectite) با ساختار لایه ای (۲:۱) ۴۹٪، کانی ایلیت ۱۲٪، کانی کائولینیت ۵٪ و کانی غیر رسی کوآرتز ۳۴٪ تشکیل شده است. به منظور مقایسه



شکل ۲- منحنی پراش پرتو ایکس نمونه خاک طبیعی و خاک حاوی غلظت‌های مختلف نمک سدیم کلرید، I: ایلیت، P: پیروفیلیت، K: کائولینیت، Q: کوارتز، H: هالیت

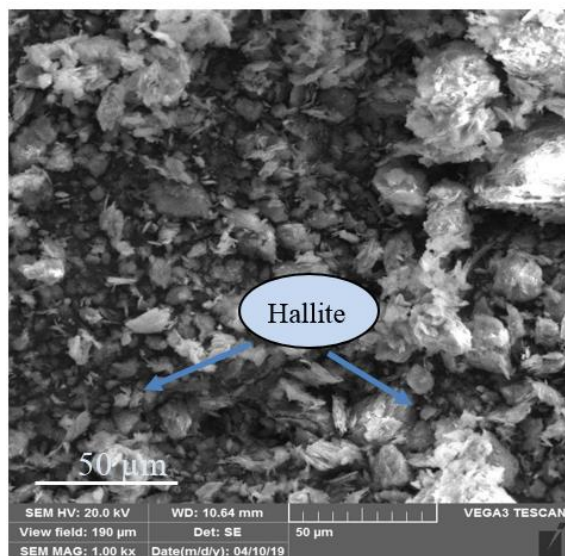


شکل ۳- تأثیر غلظت‌های مختلف سیال منفذی سدیم کلرید بر شدت قله کانی‌های رسی

در ادامه برای بررسی روند تغییرات ریزساختاری نمونه‌های رسی در حضور غلظت‌های مختلف سیال منفذی سدیم کلرید تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی پوششی (SEM) مطابق شکل (۴) از نمونه‌ها تهیه شد. در شکل (۴-الف) تصویر خاک طبیعی ارائه شده است. همان‌طور که براساس ریخت‌شناسی خاک طبیعی قابل‌مشاهده است، خاک طبیعی دارای ساختار ناپیوسته با منافذ زیاد و همچنین ساختار لایه‌ای پیروفیلیت و کائولینیت در خاک قابل‌مشاهده است. در شکل (۴-ب) تصویر خاک طبیعی حاوی غلظت ۰/۰۴ مولار سیال منفذی سدیم کلرید ارائه شده است. با توجه به تصویر (۴-ب) مشاهده می‌شود با افزودن ۰/۰۴ مولار محلول سدیم کلرید به خاک طبیعی، از منافذ خاک کاسته و ساختار کمی کلوخه‌ای شده است.

تأثیر غلظت‌های مختلف سیال منفذی بر ریزساختار نمونه‌های حاوی غلظت‌های مختلف نمک سدیم کلرید، پراش پرتو ایکس نمونه‌ها بعد از اندرکنش با غلظت‌های مختلف سیال منفذی تهیه شده است. نتایج تأثیر غلظت سیال منفذی سدیم کلرید بر شدت قله کانی‌های رسی در شکل (۳) ارائه شده است. بر اساس نتایج پراش اشعه ایکس (XRD) ارائه‌شده در شکل (۲) شدت قله اصلی کانی‌های رسی پیروفیلیت در فاصله $d_{001}=3/06 \text{ \AA}$ حدود ۵۸۸ CpS، ایلیت در فاصله $d_{001}=5 \text{ \AA}$ حدود ۱۷۸ CpS و کائولینیت در فاصله $d_{001}=7/12 \text{ \AA}$ حدود ۱۳۱ CpS است. بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل‌های (۲) و (۳) با افزایش غلظت سیال منفذی از صفر به ۰/۰۴ مولار محلول سدیم کلرید (آب با شوری کم) شدت قله اصلی کانی‌های پیروفیلیت، ایلیت و کائولینیت به ترتیب ۱۳/۲، ۱۵/۷ و ۶/۱ درصد کاهش یافته است و به مقدار ۵۱۰ CpS، ۱۵۰ و ۱۲۳ CpS رسیده است. با افزایش غلظت سیال منفذی به ۰/۴ مولار محلول سدیم کلرید (آب با شوری زیاد) شدت قله اصلی کانی‌های رسی (پیروفیلیت، ایلیت و کائولینیت) به ترتیب ۳۰/۶، ۲۶/۹ و ۹/۹ درصد کاهش و به مقدار ۴۰۸ CpS، ۱۳۰ CpS و ۱۱۸ رسیده است. همچنین با افزایش غلظت سیال منفذی به ۱/۷ مولار (آب نمک) شدت قله اصلی کانی‌های رسی (پیروفیلیت، ایلیت و کائولینیت) به ترتیب حدود ۵۳/۵، ۳۰/۳ و ۲۶/۶ درصد کاهش یافته و به کم‌تر از ۲۷۴CpS، ۱۲۴CpS و ۱۰۰CpS رسیده است. به‌طور کلی افزایش غلظت نمک سیال منفذی موجب تشکیل ساختار مجتمع در نمونه‌ها شده که در نتیجه آن شدت قله اصلی کانی‌های رسی پیروفیلیت، ایلیت و کائولینیت کاهش یافته است. شایان‌ذکر است با توجه به پایداری ساختار کائولینیت نسبت به دو کانی پیروفیلیت و ایلیت میزان نرخ کاهش شدت قله در این کانی کم‌تر است.

براساس نتایج پراش پرتو ایکس (XRD) ارائه‌شده درحالی‌که با افزایش غلظت نمک سدیم کلرید از شدت قله کانی‌های رسی کاسته شده است، اما در غلظت‌های ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۷ مولار قله‌های بلور نمک سدیم کلرید ظاهر شده است. این امر را می‌توان به رسوب نمک در بافت خاک نسبت داد. شدت قله بلور نمک سدیم کلرید با توجه به شکل (۳) در غلظت ۰/۴ مولار حدود ۶۷ CpS است که با افزایش غلظت نمک سدیم کلرید به ۱/۷ مولار به حدود ۲۱۰CpS افزایش یافته است. شایان‌ذکر است با افزایش غلظت نمک به دلیل انرژی بیشتر ترکیبات نمکی شدت قله کانی کوارتز کاهش یافته است در واقع میزان کوارتز موجود در خاک به دلیل حضور نمک تغییر نکرده است.

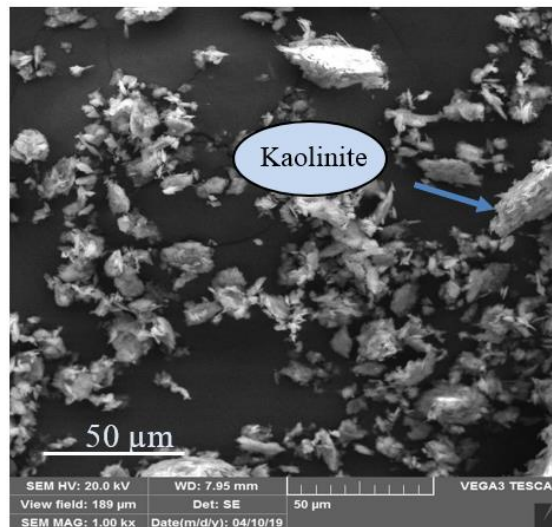


(د)

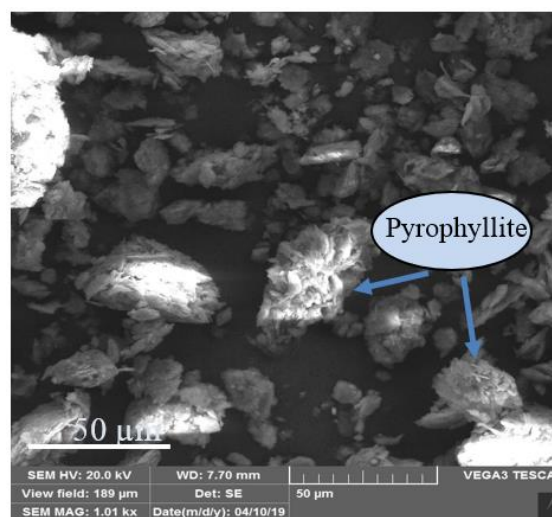
شکل ۴- الف) تصویر میکروسکوپ الکترونیکی پوششی خاک طبیعی، ب) خاک حاوی غلظت ۰/۴ مولار سیال منفذی سدیم کلرید، ج) خاک حاوی غلظت ۰/۴ مولار سیال منفذی سدیم کلرید، د) خاک حاوی غلظت ۱/۷ مولار سیال منفذی سدیم کلرید

تصویر (۴-ج) مربوط به خاک طبیعی حاوی غلظت ۰/۴ مولار سیال منفذی سدیم کلرید است، تغییر ساختار خاک به حالت مجتمع و تشکیل بلور نمک سدیم کلرید در این تصویر واضح است. شایان ذکر است که براساس نتایج پراش اشعه ایکس ارائه شده در شکل (۲) نیز با افزایش غلظت سیال منفذی از شدت قله کانی‌های رسی کاسته و قله‌های ضعیف‌هالیت قابل مشاهده بود. در تصویر (د) خاک طبیعی حاوی غلظت ۱/۷ مولار سیال منفذی سدیم کلرید آورده شده است، افزایش بلورهای نمک‌هالیت در ساختار و مجتمع شدن ساختار از نکات مهم است. با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی پوششی می‌توان دریافت ساختار خاک تحت تأثیر غلظت کاتیونی سیال منفذی است به طوری که با افزایش غلظت سیال منفذی سدیم کلرید، ساختار مجتمع با منافذ کوچک‌تر شکل گرفته است، این مشاهدات با نتایج سایر محققین تطبیق دارد (Garakani, ۲۰۱۸).

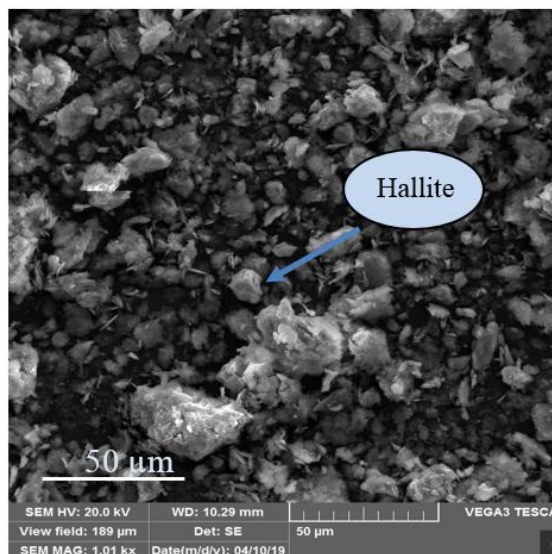
طبق نظریه گوی چپمن^۸ (Li و همکاران، ۲۰۱۵ و Taheri و همکاران ۲۰۱۹) علت این امر، کاهش ضخامت لایه دوگانه و نیروی دافعه است که منجر به لخته شدن ذرات رسی خاک می‌شود (Ouhadi و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین با توجه به تصاویر افزایش غلظت نمک سیال منفذی باعث تشکیل بلور نمک سدیم کلرید (هالیت)^۹ در بین منافذ خاک شده است. این روند را می‌توان



(الف)



(ب)



(ج)

9. Hallite

8. Gouy-chapman

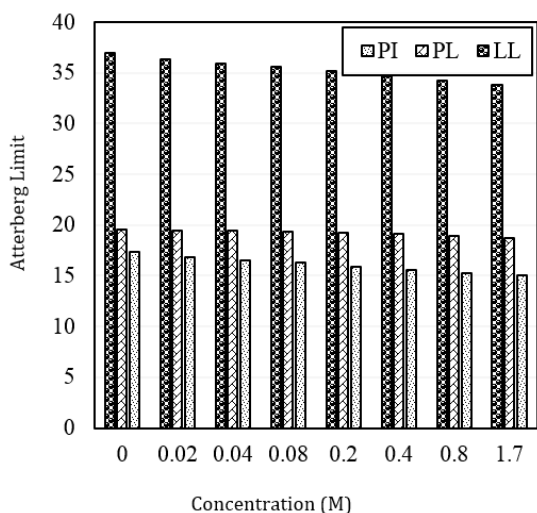
همچنین به‌طور گسترده‌ای پذیرفته شده است که حد روانی (LL) اساساً حداکثر مقدار جذب آب در اطراف یک ذره است، که با ضخامت لایه دوگانه رابطه مستقیم دارد (Tongue و همکاران، ۲۰۱۹)، از سوی دیگر نتایج پراش پرتو ایکس (شکل (۲)) و تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی پوششی (شکل (۴)) بیانگر این نکته است که حضور سیال منفذی سدیم کلرید در نمونه‌ها باعث ایجاد ساختار مجتمع خاک (کاهش شدت قله‌های کانی رسی) شده است. از این‌رو روند کاهشی حدود اتربرگ را می‌توان به جانشینی مولکول‌های آب توسط نمک‌ها که باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه در نتیجه فلوکوله شدن ذرات رس می‌شود نسبت داد (Manasseh, ۲۰۰۴). قابل توجه است که نتایج ارائه‌شده با نتایج پژوهش‌های Yan و Chang (۲۰۱۵) و Sen و همکاران (۲۰۱۷) هم‌خوانی مناسبی دارد.

در شکل (۶) تغییرات حدود اتربرگ خاک طبیعی (خارج‌شده از سلول دستگاه نفوذپذیری) که در معرض غلظت‌های مختلف سدیم کلرید به‌عنوان محلول عبوری قرار گرفته است ارائه شده است. هدف از این کار مدل‌سازی با هسته رسی سد است. شایان‌ذکر است نمونه‌های خارج‌شده از سلول نفوذپذیری طی ۵۰۴ ساعت تحت نفوذ غلظت‌های مختلف سدیم کلرید به‌عنوان سیال نفوذپذیر قرار گرفته است. بر اساس نتایج حدود اتربرگ ارائه‌شده با افزایش غلظت نمک سیال نفوذپذیر سدیم کلرید حد روانی و حد خمیری کاهش می‌یابد به‌طوری‌که با افزایش غلظت از صفر به ۰/۰۴ مولار محلول سدیم کلرید حد روانی و حد خمیری به ترتیب از ۳۷ و ۲۰ واحد برای خاک طبیعی به ۱۹/۴ و ۳۵/۹ واحد رسیده است. همچنین با افزایش غلظت به ۱/۷ مولار سیال سدیم کلرید مقدار حد روانی و حد خمیری به ترتیب ۳۳/۸ و ۱۸/۷ واحد کاهش یافته است.

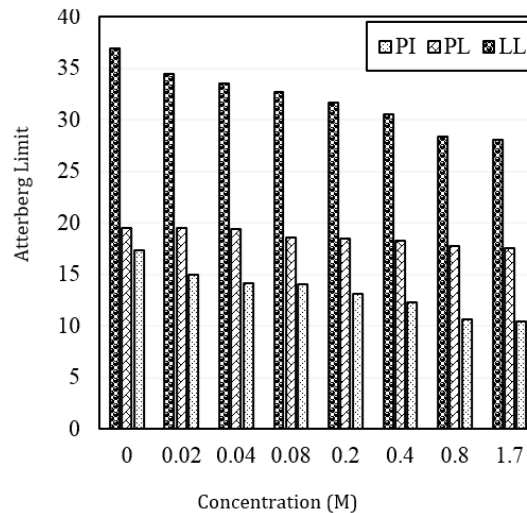
به رسوب نمک در غلظت‌های بالاتر از ۰/۴ مولار محلول سدیم کلرید در بین منافذ خاک نسبت داد. این موضوع در نتایج آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) که در شکل (۲) ارائه شده بود، کاملاً مشهود است.

۲-۳- تأثیر غلظت نمک سیال منفذی بر خواص خمیری

در شکل (۵) تغییرات حدود اتربرگ برای نمونه‌های حاوی غلظت‌های مختلف محلول سدیم کلرید (NaCl) به‌عنوان سیال منفذی ارائه شده است. براساس نتایج ارائه‌شده در حالت کلی با افزودن سیال منفذی سدیم کلرید به نمونه‌ها حد روانی و حد خمیری کاهش یافته است. مقدار حد روانی و حد خمیری برای خاک طبیعی (ترکیب‌شده با آب مقطر) به ترتیب برابر ۳۶/۹۴ و ۱۹/۵۷ واحد است. با افزایش غلظت سیال منفذی از صفر به ۰/۰۴ مولار محلول سدیم کلرید (آب با شوری کم) مقدار حد روانی و حد خمیری به ترتیب ۳/۳ و ۰/۱۵ واحد کاهش یافته است و به-مقدار ۳۳/۵۷ و ۱۹/۴۲ واحد رسیده است. در حقیقت در این غلظت خواص خمیری خاک تغییر قابل‌توجهی نداشته است. با افزایش غلظت ۰/۴ مولار محلول سدیم کلرید (آب با شوری زیاد) مقدار حد روانی و حد خمیری به ترتیب ۶/۳ و ۱/۳۱ واحد کاهش یافته است و به‌مقدار ۳۰/۵۵ و ۱۸/۲۶ واحد رسیده است. با افزایش غلظت سیال منفذی به ۱/۷ مولار محلول سدیم کلرید (آب نمک) مقدار حد روانی و حد خمیری به ترتیب ۸/۸ و ۱/۹ واحد کاهش یافته است و به مقادیر ۲۸/۰۷ و ۱۷/۵۹ واحد رسیده است. اگرچه تأثیر شیمی مایع منفذی بر رفتار مهندسی خاک رس در بسیاری از موارد هنوز مشخص نیست و حتی برخی از موارد بحث‌برانگیز است، اما به‌طور کلی می‌توان آن را با توجه به تغییرات در لایه دوگانه بیان کرد (Sen و همکاران ۲۰۱۷).



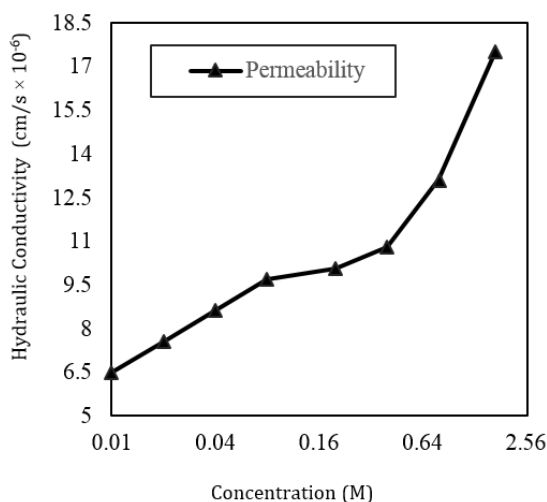
شکل ۶- تأثیر غلظت‌های مختلف محلول سدیم کلرید بر حدود اتربرگ در طی زمان



شکل ۵- تأثیر غلظت‌های مختلف سیال منفذی سدیم کلری بر حدود اتربرگ خاک مورد مطالعه

همچنین مشاهده شد با گذشت حدود ۴۰۰ ساعت از شروع آزمایش از نرخ کاهش ضریب نفوذپذیری کاسته شده و ضریب نفوذپذیری تقریباً ثابت شده است. به بیان دیگر با گذشت زمان ذرات نمک سیال نفوذپذیر در بین منافذ خاک رسوب کرده و باعث کاهش ضریب نفوذپذیری خاک شده است. همچنین نتایج پراش پرتو ایکس در شکل (۲) و تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی پوششی در شکل (۴) گواه بر رسوب نمک در بین منافذ خاک است. در حقیقت درحالی که با تغییر ساختار نمونه رسی پیش‌بینی می‌شود که میزان ضریب نفوذپذیری باید افزایش یابد اما به دلیل رسوب نمک در ساختار خاک ضریب نفوذپذیری کاهش یافته است. با توجه به این که ساختار نمک موجود در خاک پایدار نیست و ممکن است در طی زمان با توجه به تغییر میزان شوری آب مخزن سد شسته شود بر این اساس در بخش دوم آزمایش نفوذپذیری بر روی نمونه‌های حاوی غلظت‌های مختلف نمک که به صورت سوسپانسیون تهیه شده انجام شده است.

آزمون نفوذپذیری در بخش دوم بر روی خاک طبیعی حاوی غلظت‌های مختلف نمک سدیم کلرید تحت نفوذ آب مقطر قرار گرفت و میزان ضریب نفوذپذیری اندازه‌گیری شد. براساس نتایج ارائه شده در شکل (۸) خاک حاوی نمک محلول (خاک شور) از ضریب نفوذپذیری بیشتری نسبت به خاک فاقد نمک محلول برخوردار است به طوری که با افزایش غلظت سیال منفذی از صفر به ۰/۰۴ مولار محلول سدیم کلرید ضریب نفوذپذیری حدود ۱/۳ برابر افزایش یافته است و از $6/5 \times 10^{-6}$ cm/s برای خاک طبیعی به $8/6 \times 10^{-6}$ cm/s رسیده است. همچنین با افزایش غلظت سیال منفذی به ۰/۴ و ۱/۷ مولار محلول سدیم کلرید ضریب نفوذپذیری ۱/۶۶ و ۲/۶ برابر افزایش یافته است و به مقادیر $1/08 \times 10^{-5}$ cm/s و $1/7 \times 10^{-5}$ cm/s رسیده است.

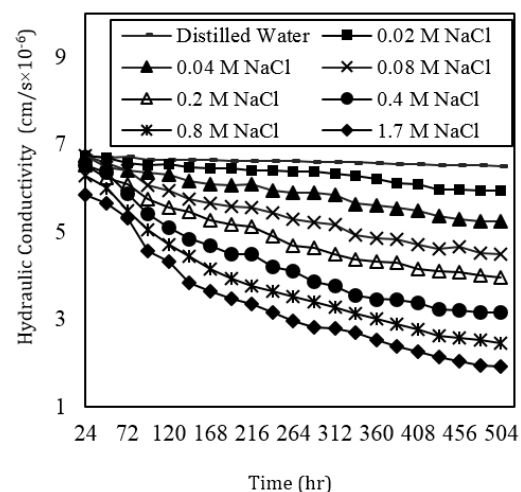


شکل ۸- تغییرات ضریب نفوذپذیری خاک طبیعی حاوی غلظت‌های مختلف سیال منفذی سدیم کلرید

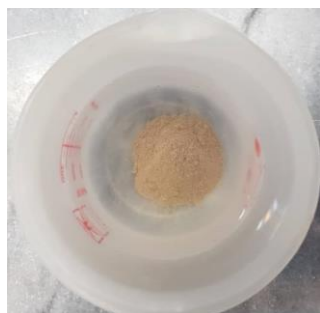
با بررسی نتایج تغییرات حدود اتربرگ با حالت نمونه‌های سوسپانسیون مشاهده می‌شود که میزان تغییرات نسبت به حالت سوسپانسیون کمتر بوده است. در حقیقت در حالت سوسپانسیون تغییرات به دلیل تغییر ساختار و نحوه قرارگیری پولک‌های رسی و تغییر ضخامت لایه دوگانه است. اما در حالت نمونه‌های قرار گرفته در سلول‌های دستگاه نفوذپذیری نقش تغییر ساختار و ضخامت لایه دوگانه تا حدودی کاهش یافته و نقش رسوب نمک افزایش می‌یابد. پیش‌بینی می‌شود در واقعیت با گذشت زمان و شسته شدن رسوب نمک‌ها حدود اتربرگ به حالت سوسپانسیون نزدیک شود.

۳-۳- تأثیر غلظت نمک سیال منفذی بر نفوذپذیری

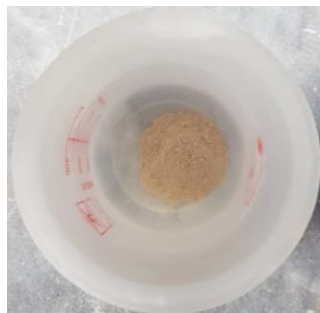
در مقاله حاضر برای بررسی تأثیر غلظت نمک سیال منفذی بر ضریب نفوذپذیری از دو روش استفاده شد. در این بخش آزمون نفوذپذیری بر روی خاک طبیعی طی بازه زمانی ۵۰۴ ساعت تحت نفوذ غلظت‌های مختلف محلول سدیم کلرید قرار گرفت و میزان ضریب نفوذپذیری اندازه‌گیری شد. نتایج این آزمون در شکل (۷) ارائه شده است. براساس نتایج ارائه شده ضریب نفوذپذیری برای نمونه خاک تحت نفوذ آب مقطر تقریباً میزان ثابتی برابر با $6/5 \times 10^{-6}$ cm/s است. اما با افزایش غلظت نمک سیال نفوذپذیر به ۰/۰۴ مولار محلول سدیم کلرید (آب با شوری کم) ضریب نفوذپذیری خاک پس از ۵۰۰ ساعت حدود ۲۰٪ کاهش یافته است و به مقدار $5/2 \times 10^{-6}$ cm/s رسیده است. با افزایش غلظت سیال نفوذپذیر به ۰/۴ (آب با شوری زیاد) و ۱/۷ مولار محلول سدیم کلرید (آب نمک)، ضریب نفوذپذیری ۵۲٪ و ۷۰٪ کاهش یافته است و به مقدار $3/1 \times 10^{-6}$ cm/s و $1/9 \times 10^{-6}$ cm/s رسیده است.



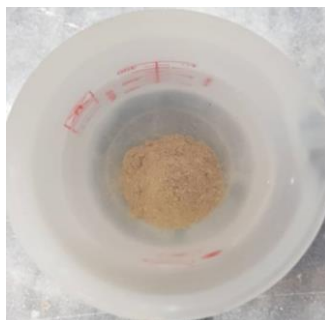
شکل ۷- تأثیر غلظت‌های مختلف سیال منفذی سدیم کلرید بر ضریب نفوذپذیری خاک مورد مطالعه در طی زمان



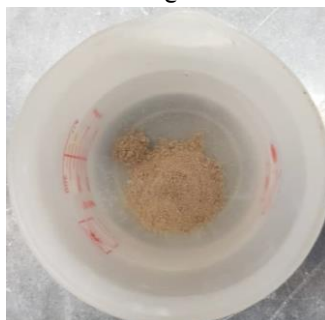
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۹- نمایی از آزمون کرامب بعد از گذشت ۶ ساعت،
 (الف) خاک طبیعی، (ب) خاک حاوی غلظت ۰/۰۴ مولار سیال
 منفذی سدیم کلرید، (ج) خاک حاوی غلظت ۰/۴ مولار سیال
 منفذی سدیم کلرید، (د) خاک حاوی غلظت ۱/۷ مولار سیال
 منفذی سدیم کلرید

در سوی دیگر آزمایش هیدرومتری دوگانه بر روی تمامی نمونه‌های حاوی غلظت‌های مختلف سیال منفذی سدیم کلرید انجام شد. براساس نتایج حاضر، برای کلیه نمونه‌ها درصد واگرایی کوچک‌تر از ۱۵ درصد به‌دست آمد که براساس کمیت درصد

در حقیقت حضور محلول‌های الکترولیتی با غلظت زیاد (مثل محلول آب نمک)، باعث جمع‌شدگی ذرات رس می‌شود (Sen و همکاران ۲۰۱۷). از طرفی تجمع ذرات خاک در حضور سیال منفذی سدیم کلرید در تصاویر ریخت‌شناسی در شکل (۴) کاملاً مشهود است. از سوی دیگر مجتمع شدن خاک ناشی از افزایش غلظت محلول نمک، اندازه منافذ خاک را افزایش می‌دهد که به‌تبع آن افزایش نفوذپذیری را به‌همراه دارد (Nguyen, ۲۰۱۳). همچنین در خاک‌های ترکیب‌شده با محلول سدیم کلرید (NaCl) به‌دلیل پیوند ضعیف تولیدشده ناشی از جذب کاتیون تک‌ظرفیتی به لایه‌های رسی، ضریب نفوذپذیری افزایش می‌یابد (Sen و همکاران ۲۰۱۷). از طرفی کلرید سدیم نمکی بسیار انحلال‌پذیر است و در خاک به‌سرعت هیدرولیز می‌شود و یون‌های Na^+ و Cl^- را ایجاد می‌کند. یون کلر پس از ترکیب شدن با کلسیم موجود در محلول خاک، نمک بسیار انحلال‌پذیر کلرید کلسیم را به‌وجود می‌آورد. بدین ترتیب در اثر افزایش کلرید سدیم به خاک، نمک حاصل از واکنش، کلرید کلسیم خواهد بود که انحلال‌پذیری زیادی دارد و سریعاً هیدرولیز می‌شود و به فاز محلول باز می‌گردد. به‌علت باقی‌ماندن محصولات واکنش در فاز محلول، غلظت محلول خاک افزایش و در نهایت باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه و ایجاد ساختمان فلوکوله در خاک می‌شود. به‌تبع این امر ضریب نفوذپذیری خاک افزایش می‌یابد (Mojallali, ۱۹۹۴). براین‌اساس در طراحی سدهای خاکی، غلظت سیال حفره‌ای به‌شدت بر پارامتر نفوذپذیری تأثیرگذار است. به‌طوری‌که در کوتاه‌مدت میزان ضریب نفوذپذیر حدود ۷۰٪ کاهش یافته ولی در درازمدت افزایش ۹ برابری ضریب نفوذپذیری مشاهده شد.

۳-۴- تأثیر غلظت نمک سیال منفذی بر واگرایی خاک

یکی از مشکلات مهم در سدهای خاکی احتمال واگرایی هسته رسی به‌دلیل افزایش غلظت یون سدیم در لایه دوگانه خاک است. براین‌اساس در این بخش احتمال وقوع واگرایی در حضور غلظت‌های مختلف نمک سدیم کلرید بررسی شده است. در پژوهش حاضر، تأثیر سیال منفذی سدیم کلرید بر پتانسیل واگرایی با انجام آزمون کرامب و هیدرومتری دوگانه موردبررسی قرار گرفت. آزمون کرامب بر روی تمامی غلظت‌ها صورت پذیرفت. در شکل (۹) نمایی از واکنش خاک طبیعی و خاک طبیعی حاوی غلظت‌های مختلف سیال منفذی سدیم کلرید در زمان ۶ ساعت ارائه شده است. از آنجایی‌که در کلیه آزمایش‌ها، هیچ کدورتی در اطراف خاک مشاهده نگردید و تغییری در رنگ آب ایجاد نشد، آزمون کرامب بر غیر واگرا بودن تمامی نمونه‌ها تحت غلظت‌های مختلف سیال منفذی سدیم کلرید اشاره دارد.

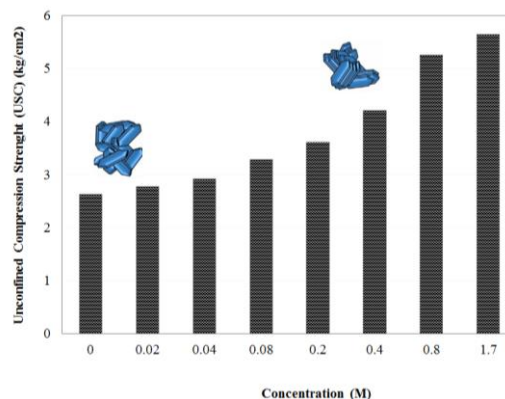
کاهش ضخامت لایه دوگانه و افزایش نیروی جاذبه بین ذرات با افزایش غلظت محلول است (Sen, ۲۰۱۷). از این سو با کاهش درصد رطوبت بهینه در نمونه‌ها ساختار خاک تمایل به تغییر شکل از حالت مجتمع وجه به گوشه به حالت مجتمع وجه به وجه با افزایش غلظت نمک سیال منفذی دارد (Lambert, ۱۹۵۸). در نتیجه، تحت عمل تراکم، ذرات رس بیشتر تمایل به فشردگی دارند و وزن واحد خشک افزایش می‌یابد. همچنین افزایش مقاومت را می‌توان به حضور نمک‌های محلول که نقش چسبندگی بین ذرات رس را به همراه دارند نسبت داد. از طرف دیگر نمک‌ها باعث مجتمع شدن ساختار خاک می‌شود (Koslanant, ۲۰۰۶). لذا به دنبال این دو رفتار نمونه‌ها مقاومت بیشتری را از خود نشان می‌دهند. نتایج مطالعات تعدادی از محققین در خصوص تغییر رفتار پارامتر مقاومت فشاری هنگام اضافه شدن نمک محلول نشان داد، با افزایش غلظت، وزن مخصوص خشک خاک افزایش یافته است. دلیل این تغییرات مقادیر پارامترهای برشی خاک (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی $(c$ و ϕ) نمونه‌های حاوی غلظت‌های مختلف سیال منفذی سدیم کلرید در جدول (۴) ارائه شده است. براساس نتایج حاضر، مقادیر چسبندگی با افزایش غلظت نمک سیال منفذی سدیم کلرید افزایش یافته است به طوری که با افزایش غلظت از صفر به 0.04 مولار میزان چسبندگی از 0.67 kg/cm^2 برای خاک پایه به 0.77 kg/cm^2 رسیده است. با افزایش غلظت به 0.4 و $1/7$ مولار سیال منفذی سدیم کلرید چسبندگی نمونه‌ها به 0.85 kg/cm^2 و 1.07 kg/cm^2 افزایش یافته است. این روند برای زاویه اصطکاک داخلی نیز مشاهده شده است به طوری که با افزایش غلظت سیال منفذی از صفر به 0.04 مولار محلول سدیم کلرید زاویه اصطکاک داخلی از $24/8$ درجه برای خاک طبیعی به $25/3$ درجه رسیده است. همچنین با افزایش غلظت به 0.4 و $1/7$ مولار سیال منفذی سدیم کلرید زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب به $29/3$ درجه و 32 درجه افزایش یافته است. از سوی دیگر نتایج پراش پرتو ایکس (XRD) و تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی پویشی (SEM) نشان داد خاک طبیعی در تماس با سیال منفذی سدیم کلرید دچار تغییر ساختار شده است. با توجه به نتایج آزمون ریزساختاری XRD و SEM با افزایش غلظت سیال منفذی ساختار خاک دچار تغییر شده و به حالت مجتمع در آمده است. از این سو افزایش مقاومت برشی را می‌توان به تغییر در ساختار خاک یا به عبارت دیگر تغییر ساختار ورقه‌های رسی از حالت موازی به حالت فلوکوله یا مجتمع نسبت داد. ساختار فلوکوله دارای مقاومت برشی بیشتری نسبت به حالت موازی است. دلیل این موضوع جاذبه بین ذره‌ای و سختی ایجاد تغییر مکان در حالتی است که ذرات نسبت به یکدیگر آرایش تصادفی دارند (Zhang, ۲۰۱۶).

واگرایی در آزمایش هیدرومتری دوگانه کلیه نتایج بر عدم واگرایی دلالت دارند. شایان ذکر است در طول روند آزمایش سیلندرهای محتوای نمونه‌های خاک حاوی سیال منفذی سدیم کلرید پس از گذشت حدود ۶۰ دقیقه از شروع آزمایش شفاف شد. این امر ممکن است در اثر افزایش نیروی جاذبه در بین ذرات و در نتیجه کلوخه شدن آن‌ها باشد.

Abbasi و Nazifi (۲۰۱۳) معتقدند علت واگرا نشدن خاک در تماس با محلول سدیم کلرید را می‌توان این گونه بیان کرد که آنیون کلر برخلاف کاتیون سدیم، به عنوان یک فاکتور انعقاد کننده نقش دارد. کلیه نتایج واگرایی آزمون هیدرومتری دوگانه و کرامب در جدول (۳) ارائه شده است.

۳-۵- تأثیر غلظت نمک سیال منفذی بر پارامترهای مقاومتی خاک

در شکل (۱۰) نمودار نتایج مقاومت فشاری خاک مورد مطالعه حاوی غلظت‌های مختلف نمک سدیم کلرید ارائه شده است. مقاومت فشاری برای خاک پایه برابر $2/63 \text{ kg/cm}^2$ است. با توجه به نتایج در حالت کلی با افزایش غلظت سیال منفذی سدیم کلرید مقاومت فشاری افزایش یافته است به طوری که با افزایش غلظت از صفر به 0.04 مولار مقاومت فشاری ۱۰ درصد افزایش یافته است و مقدار مقاومت فشاری به $2/93 \text{ kg/cm}^2$ رسیده است. در ادامه با افزایش غلظت سیال منفذی به 0.4 و $1/7$ مولار محلول سدیم کلرید مقاومت فشاری به ترتیب ۳۷ و ۵۳ درصد افزایش یافته است. مقادیر مقاومت فشاری برای غلظت‌های 0.4 و $1/7$ به ترتیب برابر $4/21 \text{ kg/cm}^2$ و $5/65 \text{ kg/cm}^2$ است. نتایج نشان داد حضور یون‌های نمک باعث تغییرات قابل توجهی در عملکرد و بهبود مقاومت داشته است. نمک محلول، وزن مخصوص خشک را افزایش و مقدار رطوبت بهینه مخلوط را کاهش می‌دهد (Sen, ۲۰۱۷).



شکل ۱۰- تأثیر غلظت‌های مختلف سیال منفذی سدیم کلرید بر مقاومت فشاری خاک مورد مطالعه

جدول ۳- نتایج آزمایش کرامب و هیدرومتری دوگانه خاک طبیعی و خاک طبیعی حاوی غلظت‌های مختلف سیال منفذی سدیم کلرید

آب نمک	آب با شوری بسیار زیاد	آب با شوری زیاد	آب شور	آب با شوری کم	آب شیرین	آب مقطر
۱/۷	۰/۸	۰/۴	۰/۲	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۲
عدم واگرایی	عدم واگرایی	عدم واگرایی	عدم واگرایی	عدم واگرایی	عدم واگرایی	عدم واگرایی
۱۲/۴	۱۱/۵۸	۱۰/۷۱	۹/۶۹	۹/۰۹	۱۰/۵	۱۱/۶۱

جدول ۴- تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نمونه‌های حاوی غلظت‌های مختلف سیال منفذی سدیم کلرید

آب نمک	آب با شوری بسیار زیاد	آب با شوری زیاد	آب شور	آب با شوری کم	آب شیرین	آب مقطر
۱/۷	۰/۸	۰/۴	۰/۲	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۲
۱/۰۷	۰/۹	۰/۸۵	۰/۸۱	۰/۷۹	۰/۷۷	۰/۶۷
۳۲	۳۰/۸	۲۹/۳	۲۷/۵	۲۶/۲	۲۵/۳	۲۴/۸

۴- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج مقاله حاضر را می‌توان به شرح ذیل بیان نمود:
 (۱) به‌طور کلی پیدایش و انحلال نمک‌های محلول در مخزن سدهای خاکی هرچند در کوتاه‌مدت ممکن است باعث کاهش حدود ۷۰٪ ضریب نفوذپذیری شود اما در درازمدت و با تغییر غلظت نمک موجود در مخزن ممکن است باعث افزایش ۹ برابری ضریب نفوذپذیری شود که این امر ممکن است موجب تخریب و عدم کارایی سد خاکی شود. در حقیقت حضور محلول‌های الکترولیتی با غلظت زیاد (مثل محلول آب نمک)، باعث جمع-شدگی ذرات رس می‌شود و از طرفی تجمع ذرات خاک ناشی از افزایش غلظت محلول نمک، اندازه منافذ خاک را افزایش می‌دهد که به‌تبع آن افزایش نفوذپذیری را به‌همراه دارد.

(۲) براساس نتایج ریزساختاری XRD، ریزساختار و نحوه قرارگیری ذرات رسی تحت تأثیر تغییرات غلظت الکترولیت سیال منفذی است. به‌طوری‌که با افزایش غلظت سیال منفذی سدیم کلرید شدت قله اصلی کانی‌های رسی کاهش یافت، اما با افزایش غلظت به بیش از ۰/۴ مولار قله‌های جدید بلورهای نمک هالیت قابل مشاهده است.

(۳) براساس نتایج حدود اتربرگ با افزایش غلظت سیال منفذی سدیم کلرید، حد روانی کاهش یافته است. اما افزایش غلظت تأثیر ناچیزی بر حد خمیری دارد. در حقیقت در حالت سوسپانسیون تغییرات به‌دلیل تغییر ساختار و نحوه قرارگیری پولک‌های رسی و تغییر ضخامت لایه دوگانه است. اما در حالت نمونه‌های قرار گرفته در سلول‌های دستگاه نفوذپذیری نقش تغییر ساختار و ضخامت لایه دوگانه تا حدودی کاهش یافته و نقش رسوب نمک افزایش می‌یابد.

(۴) نتایج آزمایش مقاومت فشاری حاکی از افزایش مقاومت با افزایش غلظت سیال منفذی سدیم کلرید است. با افزایش غلظت نمک سیال منفذی ساختار خاک تمایل به تغییر شکل از حالت وجه به گوشه مجتمع به حالت وجه به وجه مجتمع دارد که به‌تبع این امر مقاومت فشاری افزایش یافته است.

۵- مراجع

- Abbasi N, Nazifi MH, "Assessment and modification of sherard chemical method for evaluation of dispersion potential of soils", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2013, 31 (1), 337-346.
- Chaudhari SK, "Saturated hydraulic conductivity, dispersion, swelling, and exchangeable sodium percentage of different textured soils as influenced by water quality", *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, 32 (15-16), 2439-2455.
- Deng Y, Zhang T, Cui Y, Chen Y, Deng T, Zhou X, "Pore water salinity effect on the intrinsic compression behaviour of artificial soft soils", *Applied Clay Science*, 2018, 166, 299-306.
- Garakani AA, Haeri SM, Cherati DY, Givi FA, Tadi MK, Hashemi AH, Chiti N, Qahremani F, "Effect of road salts on the hydro-mechanical behavior of unsaturated collapsible soils", *Transportation Geotechnics*, 2018, 17, 77-90.
- Handershot WH, Duquette M, "A simple barium chloride method for determining cation exchange capacity and exchangeable cations", *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50 (3), 605-608.
- Koslanant S, "Influence of storage conditions on geotechnical properties of Ariake clay and on its chemical stabilization", PhD diss, Dissertation, Saga University, Japan, 2006.
- Lambe TW, "The engineering behavior of compacted clay", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1958, 84 (2), 1-35.
- Li JS, Xue Q, Wang P, Li ZZ, "Effect of lead (II) on the

- "Experimental study on the swelling behaviour of bentonite/claystone mixture", *Engineering Geology*, 2012, 124, 59-66.
- Weimin MY, Zhang F, Chen B, Chen YG, Wang Q, Cui YJ, "Effects of salt solutions on the hydro-mechanical behavior of compacted GMZ01 bentonite", *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72 (7), 2621-2630.
- Yan WM, Chang J, "Effect of pore water salinity on the coefficient of earth pressure at rest and friction angle of three selected fine-grained materials", *Engineering Geology*, 2015, 2, 153-157.
- Yukselen-Aksoy Y, Kaya A, Ören AH, "Seawater effect on consistency limits and compressibility characteristics of clays", *Engineering Geology*, 2008, 102 (1-2), 54-61.
- Zhang Long, De'an Sun, and Di Jia, "Shear strength of GMZ07 bentonite and its mixture with sand saturated with saline solution", *Applied Clay Science* 132, 2016, 24-32.
- Zhu CM, Ye WM, Chen YG, Chen B, Cui YJ, "Impact of cyclically infiltration of CaCl₂ solution and deionized water on volume change behavior of compacted GMZ01 bentonite", *Engineering Geology*, 2015, 184, 104-110.
- mechanical behavior and microstructure development of a Chinese clay", *Applied Clay Science*, 2015, 105, 192-196.
- Mahasneh BZ, "Dead Sea water as a soil improvement agent", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 9 (1).
- Mansour ZM, Taha MR, Chik Z, "Fresh-Brine Water Effect on the Basic Engineering Properties of Lisan", *Journal of Applied Sciences*, 2008, 8 (20), 3603-3611.
- Mansouri, H, "Investigating the effect of solar water use on the treatment of dam dams (Case of study: Karchay dam, east of Tabriz) ", Master's Thesis, Faculty of Science, University of Isfahan, 2012.
- Mitchell JK, Soga K, "Fundamentals of soil behavior", 3rd Edition, NJ, John Wiley and Sons, 2005, 111-130.
- Mitchell JK, Soga K, "Fundamentals of soil behavior", John Wiley and Sons, Inc, New York, 1993, 422.
- Mojallali H, "Salt mineralogy in a selected salorthid of texas high plains as a function of seasonal temperature variations", *Iran Agricultural Research*, 1994, 13 (2), 111-124.
- Nguyen XP, Cui YJ, Tang AM, Deng YF, Li XL, Wouters L, "Effects of pore water chemical composition on the hydro-mechanical behavior of natural stiff clays", *Engineering Geology*, 2013, 166, 52-64.
- Ouhadi VR, Goodarzi AR, "Assessment of the stability of a dispersive soil treated by alum", *Engineering Geology*, 2006, 85 (1-2), 91-101.
- Ouhadi VR, Hamidi S, Amirii M, "The Effect of heavy metal pollution on the coefficient of variation of the values of density index, expansion index and permeability coefficient of bentonite from a microstructure perspective", *Journal of Civil and Environmental Engineering, University of Tabriz*, 2015, 45 (4), 7-17.
- Ouhadi VR, Yong RN, "Experimental and theoretical evaluation of impact of clay microstructure on the quantitative mineral evaluation by XRD analysis", *Applied Clay Science*, 2003, 23 (1-4), 141-148.
- Rahimi H, "Soil Dams", Tehran University Press, 2015, 671.
- Saboor M R, Ajam M, Dazvare G, "Investigating the effect of pore water salinity on shear strength and plasticity properties of clay soils", First National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei University, Tehran, 2015.
- Sen P, Dixit M, Chitra R, "Effect of chemicals on index properties of soil", *International Journal of Engineering Research and General Science*, 2017, 4 (1), 352-359.
- Taheri S, Ebadi T, Maknon R, Amiri M, "Microstructural assessment of the simultaneous effect of heavy metal and lead petroleum on the resistance parameters of sand-bentonite mixture", *Journal of Civil and Environmental Engineering, University of Tabriz*, 2018, 48 (1), 35-42 (In Persian).
- Tongwei Z, Yongfeng D, Yujun C, Hengxing L, Fanyu Z, Huyuan Z, "Porewater salinity effect on flocculation and desiccation cracking behaviour of kaolin and bentonite considering working condition", *Engineering Geology*, 2019, 11-23.
- Wang Q, Tang AM, Cui YJ, Delage P, Gatmiri B,

EXTENDED ABSTRACT

An Experimental Study on The Effects of Pore-Fluid Parameters on Microstructural Behavior of Clay Core Materials in Embankment Dams

Mohammad Amiri *, Rahim Zare

University of Hormozgan, Faculty of Engineering, Bandar Abbas, Iran

Received: 29 July 2019; Accepted: 20 May 2020

Keywords:

Pore fluid, Embankment dams, Permeability, XRD, SEM.

1. Introduction

The abundance of saline water at ground level and their progression to freshwater and onshore sources, landfill leachate chemicals, or industrial plant effluents into the soil are factors that can change the amount and type of soil salinity and, as a result, their geotechnical properties (Ouhadi et al, 2015). Also, due to the size of the large dams reservoirs and the impossibility of changing the axis of the dams due to different constraints, it is possible that after the filling, the dam lake water will come into contact with the salt formations and may cause risks such as changing the geotechnical behavior of the clay core, after exploiting embankment dams. Therefore, due to the presence of contaminants, which is sometimes unavoidable, an understanding of basic mechanisms in modifying the physical and engineering properties of soils under the influence of chemicals or chemical salts is essential (Sen et al, 2017). In general, the concentration of ions affects the intermolecular forces of the soil (ie double-layer repulsion and van der Waals attraction) and the structure of the materials (Weimin et al, 2014; Zhu et al, 2015). As a result, such changes in soil structure alter its engineering properties (Yan and Chang, 2015).

According to the extensive studies on the influence of pore fluid on clay soils, however, a comprehensive study from the microstructural perspective with regard to permeability coefficient changes on clay soils has not been conducted. The purpose of this study was to investigate the permeability coefficients and engineering properties of clay soils with a special attitude to clay core in the presence of sodium chloride solution salt as a pore fluid from a microstructural perspective.

2. Materials and methods

Since the materials used in embankment dams core must have a low permeability, sandy clays or high clay sand, and clay sands are commonly used (Rahimi, 2015). Therefore, in accordance with the aforementioned executive points in the construction of the embankment dams core, the soil used in this study was sand clay (SC) with the specifications presented in Table (1). To study the effect of pore fluid concentration on geotechnical and microstructural properties of the studied soil, sodium chloride (NaCl) salt with 8 different concentrations (0, 0.02, 0.04, 0.08, 0.2, 0.4, 0.8, and 1.7 M) were used. The characteristics of the solution concentrations used in the study along with pH and E_c are presented in Table (2). The mechanism of alteration of geotechnical behavior of clay core under the influence of dissolved salts has been investigated with regard to changes in Atterberg limits, permeability coefficients, resistance parameters and probability of divergence phenomena according to ASTM standard.

* Corresponding Author

E-mail addresses: amirii@hormozgan.ac.ir (Mohammad Amiri), zare.rahim1993@gmail.com (Rahim Zare).

Table 1. Some geotechnical properties of the soil used in the study

Physical properties of soil	Quantity measured	References for method of measurement
Percentage of the passage of 200 sieve (%)	45	ASTM D422
Classification	SC	ASTM D422-87
Liquid limit (%)	37	ASTM D4318
Plastic Limit (%)	20	ASTM D4318
Plasticity Index (%)	17	ASTM D4318
Optimum water content (%)	13.5	ASTM D698
Carbonate content (%)	6	ASTM C575
pH (1:10; soil: water)	8.2	ASTM D4972
Electrical Conductivity (ms/cm)	0.48	ASTM D1125-95
CEC (cmol/kg-soil)	2.4	Handershot, 1986
Strength Parameters	C (kg/cm ²)	0.67
	φ^0	24.8
Maximum dry density (g/cm ³)	1.9	ASTM D698
Unconfined Compression Strength (kg/cm ²)	2.63	ASTM D2166
Mineral Composition using XRD analysis	Pyrophyllite, Illite, Kaolinite, Quartz	

Table2. Characteristics of the solution concentrations used in the study

	Distilled water	Fresh Water	Low Salinity	Brackish	High Salinity	Extreme high Salinity	Salt Water
Concentration (M)	0	0.02	0.04	0.08	0.2	0.4	0.8
pH	7.28	7.62	7.65	7.72	7.81	8	8.5
EC (ms)	0.13	2.6	4.5	8.3	19.5	38.3	69.8

3. Results and discussion

Fig. (1) shows the variations of the Atterberg limits for samples containing different concentrations of sodium chloride (NaCl) as a pore fluid. Based on the results presented, by adding sodium chloride pore fluid to the samples, the liquid limit (LL) and paste limit (PL) were both reduced. The amounts of liquid limit and paste limit for natural soil (combined with distilled water) were 36.94 and 19.57 units, respectively. Increasing the pore fluid concentration from zero to 0.04 M of sodium chloride solution (low salinity water) caused the amounts of liquid limit and paste limit to decrease from 36.94 and 19.57 units to 33.57 and 19.42 units respectively. Increasing the pore fluid concentration to 1.7 M of sodium chloride (brine) caused the amounts of liquid limit and paste limit to decrease to from 36.94 and 19.57 units to 28.07.07 and 17.59 units, respectively. Although the effect of pore fluid chemistry on clay engineering behavior in many cases is still unclear and even controversial in some cases, it can generally be explained by changes in the double layer (Sen et al, 2017). It is also widely accepted that the liquid limit (LL) is essentially the maximum amount of water absorption around a particle, which is directly related to the thickness of the double layer (Tongwei et al., 2019). In fact, the presence of sodium chloride pore fluid in the specimens caused the structure of the soil complex to exist (a decrease in the severity of clay mineral peaks). Hence the decreasing trend of the Atterberg limit can be attributed to the substitution of water molecules by salts which reduces the thickness of the double layer due to the flocculation of the clay particles (Manasseh, 2004).

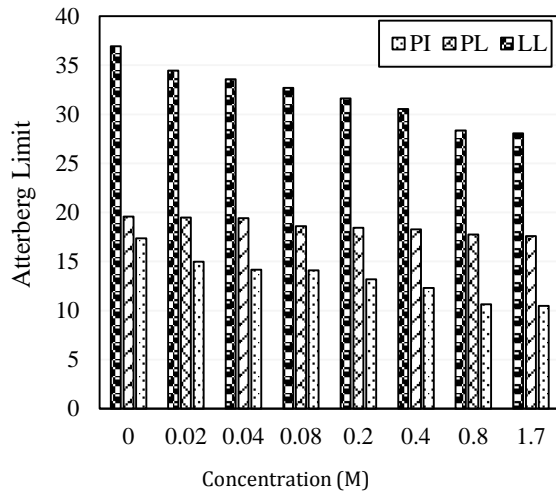


Fig. 1. The effect of different concentrations of sodium chloride pore fluid on the soil Atterberg limit

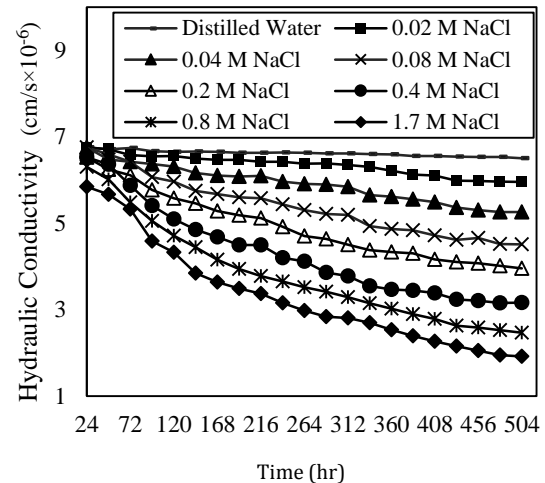


Fig. 2. The effect of different concentrations of sodium chloride pore fluid on soil permeability coefficient over time

In Fig. 2, the results of the permeability test on natural soils over a period of 504 hours under the influence of different concentrations of sodium chloride solution are presented. Based on the results, the permeability coefficient for the soil sample under the influence of distilled water was approximately a constant value of $6.5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$. By increasing the permeable fluid concentration to 1.7 M of sodium chloride (brine), the permeability coefficient decreased by about 70% and reached $1.9 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$. It was also observed that about 400 hours after the start of the experiment the permeability coefficient decreased and remained almost constant. In other words, over time, permeable fluid salt particles were deposited between the pores of the soil and reduced the permeability coefficient.

4. Conclusions

1. Overall, although the emergence and dissolution of salts in the reservoir of embankment dams, may reduce the permeability coefficient by about 70% in the short term, but in the long term, it can increase the permeability coefficient by 9 times by changing the salt concentration in the reservoir; this may cause damage to embankment dam and dam inefficiency.
2. Based on the results of the Atterberg limit, the concentration of sodium chloride pore fluid decreased by increasing concentration. But the increase in concentration had little effect on the paste limit. In fact, in suspension mode, the variations were due to the change in the structure, the arrangement of the clay particles, and the thickness of the double layer.

5. References

Mahasneh BZ, "Dead Sea water as a soil improvement agent", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 9, 1.

Ouhadi VR, Hamidi S, Amiri M, "The Effect of heavy metal pollution on the coefficient of variation of the values of density index, expansion index and permeability coefficient of bentonite from a microstructure perspective", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, University of Tabriz, 2015, 45 (4), 7-17.

Rahimi H, "Soil Dams", Tehran University Press, 2015, 671.

Sen P, Dixit M, Chitra R, "Effect of chemicals on index properties of soil", *International Journal of Engineering Research and General Science*, 2017, 4 (1), 352-359.

Tongwei Z, Yongfeng D, Yujun C, Hengxing L, Fanyu Z, Huyuan Z, "Porewater salinity effect on flocculation and desiccation cracking behaviour of kaolin and bentonite considering working condition", *Engineering Geology*, 2019, 11-23.

Weimin MY, Zhang F, Chen B, Chen YG, Wang Q, Cui YJ, "Effects of salt solutions on the hydro-mechanical behavior of compacted GMZ01 Bentonite", *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72 (7), 2621-2630.

Yan WM, Chang J, "Effect of pore water salinity on the coefficient of earth pressure at rest and friction angle of three selected fine-grained materials", *Engineering Geology*, 2015, 2, 153-157.

Zhu CM, Ye WM, Chen YG, Chen B, Cui YJ, "Impact of cyclically infiltration of CaCl₂ solution and deionized water on volume change behavior of compacted GMZ01 bentonite", *Engineering Geology*, 2015, 184, 104-110.