

مقایسه نحوه تغییرات رفتار خمیری و نفوذپذیری بنتونیت در حضور آلاینده‌های آلی و فلز سنگین

وحیدرضا اوحدی^{۱*}، محمدسعید فخیم‌جو^۲ و سیدتقی امیدنائینی^۳

^۱ عضو هیأت علمی وابسته دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران و

استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

^۳ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

* نویسنده مسئول

دریافت ۹۴/۱۱/۲۹ پذیرش ۹۴/۸/۶

چکیده

نفوذپذیری کم و قابلیت جذب آلاینده‌های گوناگون، بنتونیت را به عنوان مصالحی مناسب در مراکز دفن مهندسی زباله مطرح کرده است. حضور آلاینده در سیال منفذی و اندرکنش آلاینده با پولک‌های رسی، خصوصیات فیزیکی و رفتاری خاک را تغییر می‌دهد. آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین دو دسته عمده از آلاینده‌های زیست‌محیطی در خاک به شمار می‌آیند. تحقیقات گذشته نشان می‌دهند که آلاینده آلی با کاهش ثابت دی‌الکتریک و فلز سنگین با افزایش ظرفیت و غلظت الکترولیت، لایه دوگانه را فشرده می‌کنند. لایه دوگانه فشرده‌تر، نفوذپذیری بیش‌تر و خاصیت خمیری کم‌تری را ایجاد می‌کند. با وجود توجه ویژه محققین و تحقیقات مختلفی که در خصوص فرایند اندرکنش آلاینده‌های آلی و فلز سنگین با کانی‌های رسی انجام شده است، در زمینه مقایسه تغییر خصوصیات مهندسی بنتونیت در اندرکنش با آلاینده‌های فوق تحقیقات محدودی انجام گرفته است. هدف این مقاله مقایسه تغییر رفتار خمیری و نفوذپذیری بنتونیت آلوده شده با آلاینده‌های آلی (متانول، اتانول، استیک اسید و دی‌اکسید و فلز سنگین (روی و سرب) می‌باشد. به این منظور، آزمایشات حدود اثربرگ و تحکیم بر نمونه‌های بنتونیت آلوده شده با غلظت‌های مختلف آلاینده آلی انجام شد و با نتایج موجود بنتونیت آلوده شده با فلز سنگین مقایسه شد. نتایج حاصل با مدل تئوریک لایه دو گانه گوی-چپمن مقایسه شده و تأثیر پارامترهای مختلف مدل شامل ثابت دی‌الکتریک، ظرفیت کاتیون، شعاع هیدراته و غلظت فلز سنگین و تأثیر آن‌ها بر خصوصیات خمیری و نفوذپذیری بنتونیت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش غلظت در حضور آلاینده آلی سبب کاهش خصوصیات خمیری و افزایش ضریب هدایت هیدرولیکی بنتونیت می‌شود. به طوری که افزایش غلظت آلاینده آلی از ۱۰ درصد به ۴۰ درصد در نسبت تخلخل^۲، نفوذپذیری را برای اتانول در حدود ۱۰ برابر، متانول ۷ برابر و در حضور استیک اسید ۴ برابر افزایش داده است. به طوری که ثابت دی‌الکتریک، لزجت سینماتیکی و اندازه مولکولی تغییر رفتار بنتونیت را در حضور سیال آلی کنترل می‌کند. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهند که تفاوت حد روانی بنتونیت در ثابت دی‌الکتریک یکسان به ازای سیالات آلی متفاوت با لحاظ کردن اثر تفاوت در لزجت نسبی سیال قابل توجه بوده که عدم تطابق نتایج آزمایشگاهی با نظریه لایه دوگانه، از این منظر قابل تجزیه و تحلیل است.

واژگان کلیدی: بنتونیت، آلاینده آلی، آلاینده فلز سنگین، رفتار خمیری، نفوذپذیری، ثابت دی‌الکتریک.

۱- مقدمه

استفاده در مراکز دفن زباله‌های خطرناک توسط سازمان حفاظت منابع و عملیات بازیافت آمریکا (RCRA) 10^{-9} m/s بوده است [۱]. با این وجود تکیه بر پایین بودن ضریب هدایت هیدرولیکی برای اطمینان از عدم آلودگی منابع آب زیرزمینی کافی نخواهد بود. نتایج مطالعات آزمایشگاهی و تئوریک انجام شده توسط Bolt [۲]، Mesri و Olson [۳]، Fernandez و Quigley [۴]، [۵]، Barbour و Fredlund [۶]، Chen و

جلوگیری از نفوذ آلاینده‌ها به منابع آب‌های زیرزمینی برای تضمین سلامت و کیفیت این منابع مهم، ضروری است. نفوذپذیری بسیار کم (10^{-12} تا 10^{-7} cm/s) خاک‌های رسی، استفاده از این مصالح را برای جلوگیری از ورود آلاینده‌های گوناگون به سفره آب زیرزمینی بسیار متداول کرده است. از این رو در مراکز دفن مهندسی زباله از بسترهای رسی به عنوان مصالح آب‌بند به صورت گسترده استفاده می‌شود. بیش‌ترین ضریب نفوذپذیری مجاز پیشنهاد شده برای خاک‌های مورد

1- U.S. Resource Conservation and Recovery

شده در بنتونیت در حضور آلاینده‌های آلی و فلز سنگین نبوده و علاوه بر متغیرهای مورد توجه این نظریه، عوامل دیگری رفتار رس در اندرکنش با آلاینده را کنترل می‌کنند.

خاک‌های رسی به صورت اتفاقی، ناشی از نشت از مخازن و خصوصاً در مواقعی که در بستر مراکز دفن زباله استفاده می‌شوند ممکن است در معرض مواد شیمیایی مختلفی قرار گیرند. در چنین مواردی روغن‌ها، حلال‌ها یا سایر مواد شیمیایی آلی امکان جایگزینی با آب منفذی را پیدا می‌کنند. ثابت دی الکتریک این مواد معمولاً بسیار کم‌تر از ثابت دی الکتریک آب می‌باشد [۱۱].

Mesri و Olson [۳] افزایش 10^6 برابری نفوذپذیری مونت‌موریلونیت را در حضور آلاینده آلی کربن تتراکلرید گزارش کرده‌اند. اندرکنش سیال آلی با کانی خاک باعث تغییر فابریک شده به صورتی که عبور آسان‌تر سیال منفذی را فراهم می‌کند.

Gilligan [۱۲] و Gilligan و Clemence [۱۳] پیشنهاد کردند که افزودن مایع آلی به خاک‌های غنی از رس باعث شکل‌گیری تکتوئید در خاک و ساختار دانه‌ای تر با فضای منافذ بزرگ‌تر و عبور آسان جریان می‌شوند. Quigley و Fernandez [۵] دریافته‌اند که لزجت سیال، در کاهش هدایت هیدرولیکی غلظت‌های کم تا متوسط محلول‌های آلی نقش مهمی دارد.

Budhu و همکاران [۱۴] اختلاف ثابت دی الکتریک آب و سیال آلی را در تغییر نفوذپذیری خاک رسی نسبت به سایر متغیرها مؤثرتر دانسته‌اند. اندرکنش کانی‌های رسی با مواد آلی دارای ثابت دی الکتریک کم‌تر از آب منجر به فضای بین لایه‌ای نازک‌تر به دلیل جمع شدگی سیستم آب-خاک می‌شود [۱۵]. با فشرده شدن لایه یون پخشیده، دافعه بین ذره‌ای در خاک‌های رسی کاهش یافته و به نیروهای جاذبه اجازه می‌دهد که بیش‌تر غالب باشند [۱۶]. کاهش ثابت دی الکتریک و افزایش نسبت سیال آلی به آب، حد روانی و شاخص خمیری خاک‌های رسی را کاهش می‌دهد [۱۷].

از سوی دیگر، فلزات سنگین از معمول‌ترین و فراوان‌ترین مواد موجود در شیرابه اکثر مواد جامد زائد شهری-صنعتی و پساب معادن و کارخانجات محسوب می‌گردند. مطالعه انجام شده توسط Mesri و Olson [۲] نشان می‌دهد افزایش غلظت الکترولیت و تعویض یون‌های دو ظرفیتی کلسیم با یون تک ظرفیتی سدیم در مایع منفذی افزایش ۲۸ برابری میزان نفوذپذیری را در یک نسبت تخلخل ثابت به دنبال دارد. Sridharan و همکاران [۱۸] افزایش ۸ برابری نفوذپذیری خاک را هنگام جایگزینی کلسیم به جای سدیم گزارش کرده‌اند. در

همکاران [۷]، Spagnoli و همکاران [۸]، Yildız و Olgun [۹] نشان می‌دهد که تغییر در خواص فیزیکی و شیمیایی سیال منفذی مانند تغییر ثابت دی الکتریک، تغییر غلظت یا ظرفیت نمک به صورت قابل توجه‌ای خواص خاک‌های رسی از جمله ضریب نفوذپذیری خاک را دچار تغییر می‌کند.

چنین رفتاری ناشی از وجود چگالی بار الکتریکی در سطح ذره‌ی رسی می‌باشد. جایگزینی یون‌ها با یون‌های کم‌ظرفیت دیگر در شبکه رس و نقص سطحی ناشی از پیوندهای شکسته به ویژه در گوشه‌ها منجر به ایجاد بارهای منفی در ذرات رسی می‌شود [۱]. وجود بار مذکور، رس را به ماده‌ای فعال در محیط‌های شیمیایی تبدیل می‌کند. وابستگی ویژگی‌های رفتاری به خواص محیط و تغییر خواص خاک‌های رسی ناشی از تغییر مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیال اطراف ذره، با استفاده از نظریه لایه‌ی دوگانه تا حدودی قابل توصیف می‌باشد. مطابق این نظریه، سطح باردار کانی رسی و توزیع بارهای الکتریکی (یون‌ها) اطراف آن به عنوان لایه دوگانه شناخته می‌شود. مرکز گرانی این بارها به فاصله $\frac{1}{k}$ از سطح کانی رسی به عنوان ضخامت لایه دوگانه تعریف شده که از معادله (۱) قابل محاسبه است.

$$\frac{1}{k} = \left(\frac{\epsilon_0 DKT}{2n_0 e^2 v^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

در معادله اخیر، D ثابت دی الکتریک سیال، T دما، n_0 غلظت الکترولیت، e بار الکتریکی الکترون، و v ظرفیت یون می‌باشد. با توجه به معادله (۱)، ضخامت لایه دوگانه به صورت مستقیم با جذر ثابت دی الکتریک سیال منفذی رابطه دارد و کاهش ثابت دی الکتریک منجر به کاهش ضخامت لایه دوگانه خواهد شد. برای مواد با ثابت دی الکتریک کم‌تر از آب ($D=8.0/4$)، در نتیجه کاهش نیروهای دافعه، نحوه قرارگیری پولک‌های رسی در خاک تغییر می‌کند و این موضوع موجب تغییر در نفوذپذیری خاک خواهد شد. حضور و غلظت کاتیون‌ها در سیستم آب و خاک، تأثیر عمده‌ای را در کنترل نفوذپذیری خاک‌های رسی اسمکتیتی مانند مونت‌موریلونیت دارد [۱]. محققین نشان داده‌اند که وقتی سیال منفذی با سیال آلی جایگزین می‌شود و یا در معرض الکترولیت فلز سنگین قرار می‌گیرد، خواص خاک‌های ریزدانه از جمله رفتار خمیری و هدایت هیدرولیکی، به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. درک میزان تغییرات نفوذپذیری در بهینه‌سازی طراحی موانع هیدرولیکی و کنترل عملکرد بلند مدت آن‌ها بسیار مهم می‌باشد [۱۰]. نتایج تحقیق فوق نشان داد که نظریه لایه دوگانه قادر به توصیف کامل تفاوت رفتاری مشاهده

جدول ۲- برخی مشخصات ژئوتکنیک زیست محیطی بنتونیت

مقدار در نمونه بنتونیت مورد آزمایش		خاصیت
فلز سنگین [۱۹]	مواد آلی	
۸	۸/۲۵	درصد کربنات
۶۸/۲	۱۰۶/۴۸	ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol/kg soil)
۴۸/۵	۵۶/۸۹	سدیم تبدالی
۱۴/۲	۴۴/۵۳	کلسیم تبدالی
۳/۴	۴/۸۶	منیزیم تبدالی
۲/۱	۰/۲	پتاسیم تبدالی

بنتونیت به علت داشتن سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی بزرگ، تمایل زیادی برای اندرکنش با آلاینده‌های زیست محیطی از خود نشان می‌دهد. بخشی از مشخصات ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست محیطی نمونه بنتونیت مورد استفاده در جدول-های (۱) و (۲) ارائه شده است. چهار ماده آلی مختلف با ثابت-های دی‌الکتریک متفاوت شامل متانول، اتانول، استیک‌اسید و ۱ و ۴- دایوکسان به عنوان آلاینده آلی و آلاینده‌های سرب و روی به صورت نمک نیترات، تهیه شده از شرکت مرک، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مشخصات آلاینده‌های مذکور در جدول (۳) آورده شده است.

۲-۲- روش‌های انجام آزمایش‌ها

برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی، سه روش دیوار صلب، روش قالب تراکم و روش سلول تحکیم در مراجع پیشنهاد شده است [۱ و ۱۱]. در این تحقیق نتایج روش سلول تحکیم برای محاسبه ضریب نفوذپذیری خاک مورد استفاده قرار گرفته است. تعیین هدایت هیدرولیکی از آزمایش تحکیم با استفاده از ادومتر استاندارد توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۳، ۱۴، ۱۹، ۲۰].

برای تهیه نمونه بنتونیت آلوده شده به آلاینده آلی، محلول‌هایی با غلظت‌های وزنی ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ از هر نوع آلاینده تهیه شده و با نسبت سیال به خاک ۱:۸ با ۱۰۰ گرم بنتونیت مخلوط شدند. به منظور رسیدن به تعادل و انجام کامل واکنش بین خاک و آلاینده، سوسپانسیون تهیه شده به مدت ۹۶ ساعت نگهداری شد و در هر ۲۴ ساعت به مدت ۲ ساعت توسط دستگاه لرزاننده به هم زده شدند. پس از گذشت مدت زمان تعادل، نمونه‌ها برای آماده‌سازی انجام آزمایش تحکیم در قالب-های پلی‌اتیلنی تو در تو ریخته شدند تا ابتدا تحت اثر وزن خود ته‌نشین شوند و در ادامه تا تنش حدود ۵۰ kPa به صورت

رس با قابلیت تورم بالا مثل مونت‌موریلونیت نیروی غالب دافعه است. لذا افزایش غلظت نمک یا جایگزینی کاتیون تبدالی دو ظرفیتی با تک ظرفیتی که منجر به کاهش دافعه می‌شود حد روانی را کاهش می‌دهد [۱۶]. با وجود توجه ویژه محققین و تحقیقات مختلفی که در خصوص فرایند اندرکنش آلاینده‌های آلی و فلز سنگین با کانی‌های رسی انجام شده است، در زمینه مقایسه تغییر مشخصات مهندسی بنتونیت در اندرکنش با آلاینده‌های فوق تحقیقات محدودی انجام گرفته است. در این تحقیق با پیش آلوده نمودن نمونه رسی بنتونیت با آلاینده‌های آلی دارای ثابت دی‌الکتریک متفاوت و پیش‌بارگذاری سوسپانسیون فوق، نمونه‌های رسی تحکیم عادی یافته همگن تهیه شد و امکان مطالعه خاصیت خمیری و نفوذپذیری نمونه بنتونیت آلوده و همگن و مقایسه نتایج با نتایج به دست آمده از پژوهش انجام شده توسط Ouhadi و همکاران [۱۹] فراهم شد. هدف اصلی این تحقیق مقایسه تغییر رفتار بنتونیت در حضور آلاینده آلی و فلز سنگین و مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف مدل لایه دوگانه گوی-چپمن شامل ثابت دی‌الکتریک، ظرفیت کاتیون، شعاع هیدراته و غلظت فلز سنگین و اثر آن‌ها بر خصوصیات خمیری و نفوذپذیری بنتونیت می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

در این تحقیق به منظور مقایسه اثر حضور آلاینده آلی و فلز سنگین در سیال منفذی بر تغییرات رفتار خمیری و ضریب نفوذپذیری خاک‌های رسی، از نمونه رسی بنتونیت تهیه شده از شرکت «باریت فلات ایران» استفاده شده است.

جدول ۱- برخی مشخصات ژئوتکنیکی نمونه بنتونیت

مقدار در نمونه بنتونیت مورد آزمایش		خاصیت
فلز سنگین [۱۹]	مواد آلی	
۷۷	۶۵	درصد رس
۲۳	۳۵	درصد سیلت
۳۱۴/۵	۱۷۵	حد روانی
۳۱/۲	۳۱	حد خمیری
۲۸۲/۳	۱۴۴	دامنه خمیری
CH	CH	طبقه‌بندی
۷/۱	۸	درصد رطوبت طبیعی (خشک شده در گرم‌خانه)
۲/۷۹	۲/۷۱	چگالی دانه‌های جامد

جدول ۳- مشخصات فیزیکی و شیمیایی آب مقطر و مواد آلی در دمای ۲۰°C [۳۱، ۳۲]

نام ماده	ثابت دی الکتریک	وزن مخصوص (g/cm ³)	لزجت (mPa s)	وزن مولکولی (g/mol)
آب مقطر	۸۰/۱	۰/۹۹۸۲	۱/۰۰۲	۱۸/۰۲
متانول	۳۳/۱	۰/۷۹۱۷	۰/۵۹۷	۳۲/۰۴
اتانول	۲۴/۳	۰/۷۸۹۳	۱/۲	۴۶/۰۷
استیک اسید	۶/۲	۱/۰۵	۱/۲۲	۶۰/۰۵
۱ و ۴- داپوکسان	۲/۲۵	۱/۰۳۴	۱/۳۷	۸۸/۱۱

بارگذاری افزایشی تدریجی پیش تحکیم شدند. تهیه نمونه به این روش، سبب دستیابی به نمونه‌های رسی تحکیم عادی یافته با جهت‌یافتگی همگن می‌شود [۱۹]. به طوری که ناهمگنی ناشی از ساخت نمونه حذف شده و متغیر اصلی قابل مقایسه، تغییر ساختار ناشی از حضور آلاینده‌های مختلف خواهد بود. پس از اتمام پیش تحکیمی، نمونه‌ها از قالب پلی‌اتیلنی خارج شده و درون حلقه تحکیم قرار داده شدند. برای حصول اطمینان از برقراری شرایط اشباع، درون سلول تحکیم با استفاده از سیال با غلظت مشابه نمونه پر شد. به منظور جلوگیری از تبخیر از سلول تحکیم، سطح با استفاده از روکش پلاستیکی پوشانده شد. سپس نمونه تحت بارگذاری افزایشی تا تنش ۴۰۰ kPa مطابق استاندارد ASTM-2435 قرار گرفت. آزمایش حدود اتربرگ با افزودن الکترولیت حاوی آلاینده در حدود حد خمیری و نگهداری نمونه‌ها به مدت ۹۶ ساعت درون بسته‌های پلاستیکی برای دستیابی به حالت تعادل مطابق با استاندارد ASTM D 4318-00 انجام شد. نمونه‌های آلوده به آلاینده فلز سنگین با استفاده از نمک‌های نیترات روی و سرب در غلظت‌های ۰/۰۰۵، ۰/۰۱، ۰/۱ و ۱ مولار مشابه روش ذکر شده مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نتایج آزمایشات مربوط به آلاینده‌های فلز سنگین از مراجع موجود نقل شده است [۱۹].

۳- نتایج، بحث و بررسی

۳-۱- رفتار خمیری بنتونیت

مقادیر حد خمیری، حد روانی و نشانه خمیری بنتونیت در حضور سیال آلی و فلز سنگین در جدول (۴) ارائه شده است. نتایج جدول نشان می‌دهند افزایش غلظت آلاینده آلی و فلز سنگین منجر به کاهش قابل ملاحظه حد روانی بنتونیت شده در حالی که حد خمیری تغییرات کمی در مقابل تغییر غلظت

آلاینده از خود نشان داده است. از این رو با ثابت ماندن تقریبی حد خمیری، دامنه خمیری کاهش یافته است. با توجه به تئوری لایه‌ی دوگانه گوی-چپمن و معادله (۱)، تغییر ضخامت لایه دوگانه متأثر از عوامل مختلفی از جمله غلظت یون، ظرفیت یون، و ثابت دی الکتریک سیال منفذی می‌باشد. از این رو افزایش غلظت الکترولیت (یون فلز سنگین)، منجر به کاهش ضخامت و فشرده شدن لایه دوگانه و در نتیجه کاهش نیروهای دافعه بین ذره‌ای می‌شود. کاهش ضخامت به معنای تجمع مولکول‌ها و یون‌ها در نزدیکی سطح کانی رسی و کاهش تعداد مولکول‌های آب موجود در لایه دوگانه بوده که منجر به کم شدن تمایل جذب آب توسط بنتونیت می‌شود. از طرف دیگر، به طور مشابه، افزایش غلظت سیال آلی با ثابت دی الکتریک پایین منجر به کاهش ثابت دی الکتریک سیال منفذی، فشرده شدن لایه دوگانه و کاهش نیروهای بین ذره‌ای خواهد شد. در صورتی که تغییرات حد روانی در مورد یک نوع آلاینده آلی یا فلز سنگین خاص مورد بررسی قرار گیرد توجه ارائه شده با استفاده از تئوری لایه دوگانه مناسب به نظر می‌رسد. حال اگر مقایسه‌ای در مورد کاهش حد روانی در حضور غلظت‌های یکسان کاتیون سرب و روی صورت گیرد، افت بیش‌تر حد روانی در حضور کاتیون سرب نتیجه می‌شود. اما بر اساس تئوری لایه دوگانه نباید تفاوتی در حد روانی خاک با تغییر نوع کاتیون‌های هم ظرفیت ملاحظه شود [۱۹]. در حالی که با تغییر شعاع هیدراته کاتیون‌های هم ظرفیت، حدود روانی خاک دچار تغییر شده است. سرب به دلیل کوچک‌تر بودن شعاع هیدراته در مقایسه با روی، چگالی بار واحد حجم بزرگ‌تری داشته و آب هیدراته را با قدرت بیش‌تری جذب می‌کند و به سطح کلئیدی رس نزدیک‌تر می‌شود [۱۹]. لذا ضخامت لایه دو گانه و نیروی دافعه بین ذره‌ای و نتیجتاً جذب آب کم‌تر می‌شود. با مقایسه تغییرات حد روانی در حضور سیالات آلی متفاوت نیز عدم کارایی مناسب تئوری لایه دوگانه در توجیه رفتار مشاهده شده، بیش‌تر مشهود می‌شود.

جدول ۴- مقادیر حد خمیری، حد روانی و نشانه خمیری بنتونیت در حضور غلظت‌های مختلف آلاینده آلی و فلز سنگین

ماده	درصد وزنی یا mol/l	PL	LL	PI
آب	۰	۳۳	۱۷۵	۱۴۲
	۱۰	۳۱	۱۴۹	۱۱۸
	۲۰	۲۸	۱۳۷	۱۰۹
	۳۰	۳۲	۱۲۰	۸۸
	۴۰	۳۲	۱۰۶	۷۴
اتانول	۱۰	۳۱	۱۴۳	۱۱۲
	۲۰	۳۶	۱۳۲	۹۶
	۳۰	۳۷	۱۱۶	۷۹
	۴۰	۳۷	۱۰۷	۷۰
متانول	۱۰	۳۶	۹۹	۶۳
	۲۰	۳۱	۹۷	۶۶
	۳۰	۳۴	۹۵	۶۱
	۴۰	۳۴	۹۰	۵۶
اسید استیک	۱۰	۶۶	۸۵	۱۸
	۲۰	۶۴	۸۲	۱۹
	۳۰	غیر قابل تعیین	۷۸	-
	۴۰	غیر قابل تعیین	۷۳	-
دایوکسان	۰/۰۰۵	۳۶/۳	۳۱۰/۹	۲۷۴/۶
	۰/۰۱	۳۷/۵	۲۴۷/۴	۲۰۹/۹
	۰/۱	۳۹/۲	۱۲۱/۳	۸۲/۱
	۰/۵	۴۳/۹	۱۰۱/۷	۵۷/۸
	۱	۴۵/۸	۹۳/۲	۴۷/۴
Zn ^{2+*}	۰/۰۰۵	۳۵/۹	۲۶۸/۱	۲۳۲/۲
	۰/۰۱	۳۷/۱	۲۴۳/۶	۲۰۶/۵
	۰/۱	۳۸/۹	۱۱۵/۱	۷۶/۲
	۰/۵	۴۳/۷	۹۳/۴	۴۹/۷
	۱	۴۶/۲	۸۲/۷	۳۶/۵
Pb ^{2+*}	۰/۰۰۵	۳۵/۹	۲۶۸/۱	۲۳۲/۲
	۰/۰۱	۳۷/۱	۲۴۳/۶	۲۰۶/۵
	۰/۱	۳۸/۹	۱۱۵/۱	۷۶/۲
	۰/۵	۴۳/۷	۹۳/۴	۴۹/۷
	۱	۴۶/۲	۸۲/۷	۳۶/۵

* [۲۱]

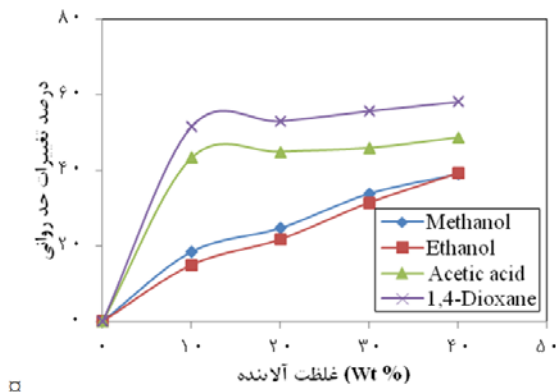
بر اساس نظریه لایه دوگانه، در حضور سیال آلی با ثابت دی‌الکتریک کمتر از آب، رس‌ها تمایل به ساختار درهم و نشان دادن رفتار مشابه لای دارند [۹].

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۱- الف) برای یک آلاینده خاص، حد روانی به صورت خطی کاهش یافته است. به طوری که برای اتانول و متانول به ازای هر واحد کاهش ثابت دی‌الکتریک، حد روانی در حدود ۲/۵ واحد کاهش از خود نشان می‌دهد در حالی که این مقدار برای استیک اسید و دایوکسان در حدود ۰/۴۲ واحد بوده است. شیب خط مذکور بسته به نوع ماده متفاوت است و برای متانول، اتانول، استیک اسید و ۱ و ۴- دایوکسان به ترتیب ۲/۳، ۲/۷، ۰/۴۲ و ۰/۴۲ به دست می‌آید.

بر اساس این نظریه و با توجه به معادله (۱)، ثابت دی‌الکتریک پارامتر کلیدی مؤثر در اندرکنش رس و ماده آلی می‌باشد و با کاهش ثابت دی‌الکتریک، ضخامت لایه دو گانه کاهش می‌یابد. تغییرات حد روانی بنتونیت در مقابل تغییرات ثابت دی‌الکتریک سیال منفذی در شکل (۱- الف) نمایش داده شده است.

همان طور که در شکل (۱- الف) مشهود است، در مورد یک نوع آلاینده مشخص، با کاهش ثابت دی‌الکتریک (افزایش غلظت آلاینده آلی از ۱۰٪ تا ۴۰٪)، حد روانی کاهش یافته است. مطابق آنچه از تئوری لایه دوگانه استنباط می‌شود کاهش ثابت دی‌الکتریک، کاهش ضخامت لایه دوگانه، کاهش دافعه بین ذرات و در نتیجه کاهش دامنه خمیری را در پی خواهد داشت.

متانول که در غلظت‌های کم (کم‌تر از ۱۰ درصد) اثر کمی بر رفتار خمیری بنتونیت داشته و با افزایش غلظت، این اثر افزایش می‌یابد. به طوری که محلول ۱۰ درصد اتانول، حد روانی را ۱۵ درصد کاهش داده و محلول ۴۰ درصدی آن باعث کاهش ۳۹ درصد در حد روانی شده است. اما گروه دوم شامل استیک اسید و دایوکسان، که بیشترین تغییرات را در غلظت‌های کم (کم‌تر از ۱۰ درصد) بر رفتار خمیری داشته به طوری که محلول ۱۰ درصدی دایوکسان، تا ۴۳ درصد حد روانی را کاهش داده در حالی که محلول ۴۰ درصد آن کاهش حد روانی را به ۴۸ درصد رسانده است (شکل (۲)).

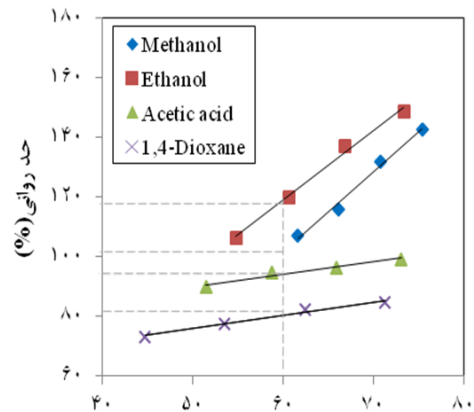


شکل ۲- نمودار درصد تغییرات حد روانی در برابر تغییر غلظت آلاینده‌های آلی

برای توضیح این رفتار می‌توان تغییرات لزجت سیال منفذی را مورد بررسی قرار داد. مطابق شکل (۳- الف) و (۳- ب)، با افزایش غلظت سیال آلی، لزجت سینماتیکی و ثابت دی‌الکتریک محلول به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند. به عبارت دیگر در محدوده غلظت ۱۰٪ تا ۴۰٪، این دو کمیت در جهت عکس یکدیگر عمل می‌کنند. بنابر این به نظر می‌رسد با افزایش غلظت آلاینده آلی، دو مکانیزم متفاوت رخ داده است:

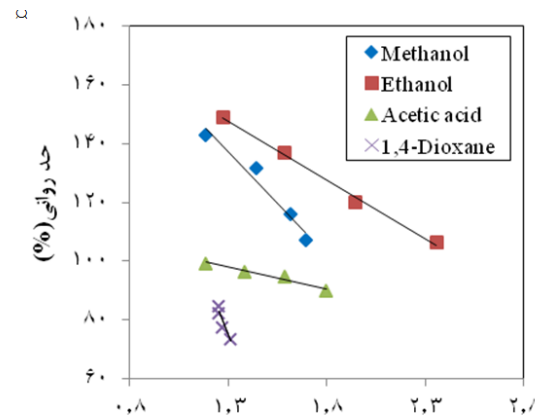
(۱) ثابت دی‌الکتریک کاهش یافته و با توجه به معادله (۱) منجر به فشرده شدن لایه دوگانه و کاهش جذب آب بنتونیت شده‌است. بنابر این، آب اضافه شده، بیشتر به صورت آب آزاد بوده و در نتیجه در مقادیر کم‌تر رطوبت، خاک به حالت روان در می‌آید (کاهش حد روانی، شکل (۱- الف)).

(۲) لزجت سینماتیکی سیال افزایش یافته که منجر به مقاومت بیشتر محلول در برابر روان شدن شده است و لذا برای



ثابت دی الکتریک سیال منفذی

(الف)



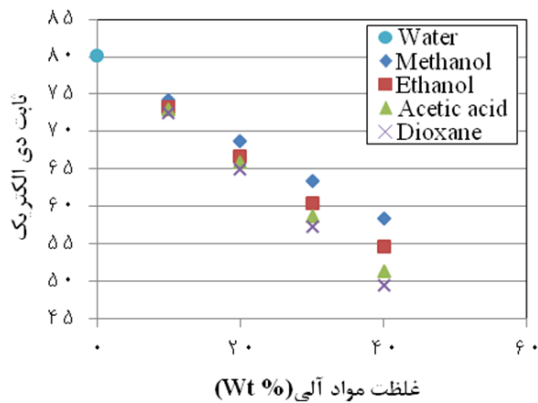
و بسکوز بته سینماتیکی سیال منفذی (cSt)

(ب)

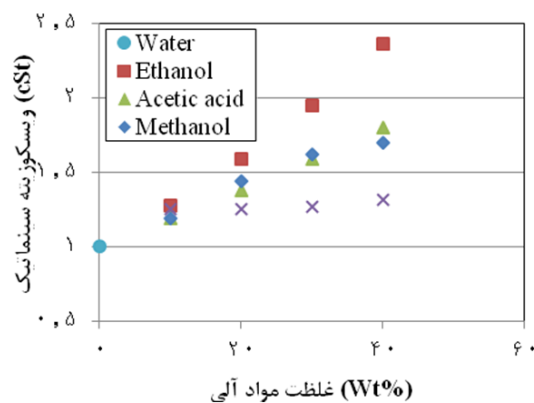
شکل ۱- الف) تغییرات حد روانی با تغییر ثابت دی‌الکتریک ناشی از تغییر غلظت آلاینده‌های آلی، ب) تغییرات حد روانی بنتونیت با تغییر لزجت سینماتیکی سیال منفذی

به نظر می‌رسد شیب خط حد روانی مرتبط با خاصیت ژل‌گرایی در حد روانی باشد. شیب تندتر معادل توانایی بیش‌تر کانی رسی برای تشکیل ژل دارد [۲۲]. همان‌طور که در شکل (۱- الف) نشان داده شده است، حد روانی بنتونیت به ازای مقادیر یکسان ثابت دی‌الکتریک با تغییر نوع سیال منفذی تغییرات زیادی از خود نشان می‌دهد. برای مثال به ازای ثابت دی‌الکتریک ۶۰، مقادیر حد روانی ۱۱۹، ۱۰۲، ۹۴ و ۸۱ به ترتیب برای اتانول، متانول، استیک‌اسید و دایوکسان به دست آمده است. در نتیجه تغییر خاصیت خمیری بنتونیت را نمی‌توان تنها به کاهش ثابت دی‌الکتریک آن نسبت داد.

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان دو نوع رفتار مشابه را در آلاینده‌های مذکور مشاهده کرد. گروه اول شامل اتانول و

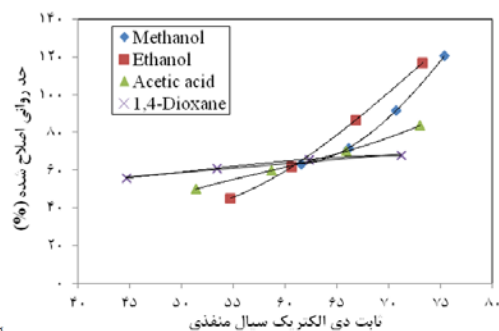


(الف)



(ب)

شکل ۳- الف) تغییرات ثابت دی الکتریک، ب) تغییرات لزجت سینماتیکی سیال منفذی با تغییر غلظت آلاینده آلی



شکل ۴- تغییرات حد روانی اصلاح شده (حد روانی نسبت به لزجت سیال) در برابر ثابت دی الکتریک سیال

در شکل (۵) داده‌های اخذ شده از آزمایشات حدود انتربرگ برای نمونه‌های حاوی آلاینده‌های آلی و فلز سنگین بر نمودار خمیری کاساگرانده ترسیم شده است. با توجه به شکل (۵-الف) و (۵-ب) مشخص می‌شود که افزایش غلظت آلاینده‌های آلی و فلز سنگین منجر به نزدیک شدن نقاط به خط 'A' شده است. در غلظت‌های کم‌تر از ۰/۱ مولار نقاط بالای خط 'A' قرار گرفته

رسیدن به حد روانی، رطوبت بیش‌تری مورد نیاز است (افزایش حد روانی، شکل (۱-ب)).

همان‌طور که در شکل (۳-الف) نشان داده شده است بیش‌ترین تغییرات لزجت مربوط به اتانول و کم‌ترین تغییرات مربوط به دایوکسان می‌باشد. از طرف دیگر اتانول و دایوکسان به ترتیب به ازای غلظت یکسان، بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین مقدار لزجت را دارا می‌باشند. با این تفسیر می‌توان رفتار مشاهده شده در شکل (۱) بهتر توصیف نمود. به این منظور مقادیر حد روانی بر لزجت سینماتیکی نسبی سیال به آب تقسیم شده و مقادیر حد روانی اصلاح شده نسبت به لزجت سینماتیکی به دست آمده در برابر ثابت دی الکتریک سیال منفذی ترسیم شده است (شکل (۴)).

بر اساس نتایج شکل (۴)، با حذف اثر لزجت، مقادیر حد روانی به ازای ثابت دی الکتریک یکسان به هم نزدیک‌تر می‌باشد به طوری که برای ثابت دی الکتریک ۶۰، مقادیر حد روانی ۶۶، ۶۹، ۶۸ و ۵۷ به ترتیب برای اتانول، متانول، استیک‌اسید و دایوکسان به دست می‌آید. این تغییرات نشان‌دهنده تأثیر نسبتاً یکسان ثابت دی الکتریک برای سیال‌های آلی متفاوت می‌باشد و تطابق نتایج با نظریه لایه دوگانه بهتر مشهود می‌شود.

نتایج ارائه شده در جدول (۳) نیز نشان می‌دهد که به جز در مورد دایوکسان، با افزایش غلظت آلاینده آلی و فلز سنگین، تغییرات کمی در حد خمیری بنتونیت مشاهده می‌شود. به طوری که در بیش‌ترین حالت، در حضور محلول متانول ۳۰٪، حد خمیری تنها ۴٪ افزایش یافته است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در حضور هر دو نوع آلاینده-های آلی و فلز سنگین بر خلاف حد روانی، حد خمیری حساسیت کمی به تغییر مشخصات سیال منفذی از خود نشان داده است. همان‌طور که از مقادیر جدول (۳) مشخص است خاصیت خمیری بنتونیت در حضور سیال با ثابت دی الکتریک کم کاهش یافته و رفتار بنتونیت به سمت رفتار خاک‌های دانه‌ای (سیلنتی) تمایل پیدا کرده است به طوری که در حضور محلول ۳۰٪ و ۴۰٪ دایوکسان، چسبندگی خاک از بین رفته، و حد خمیری قابل تعیین نبوده است. کاهش خواص خمیری بنتونیت در حضور آلاینده‌های آلی و فلز سنگین به گونه‌ای است که منجر به تغییر طبقه‌بندی خاک از رس با خاصیت خمیری زیاد (CH) به لای با خاصیت خمیری زیاد (ML) شده است.

۳-۲- رفتار نفوذپذیری بنتونیت

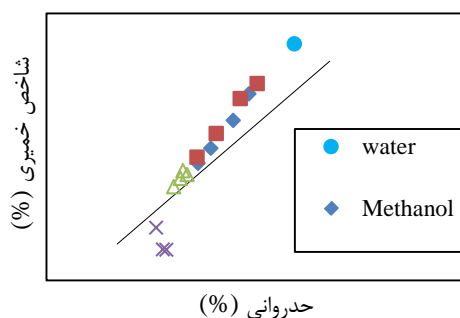
نتایج حاصل از آزمایش تحکیم یک بعدی برای محاسبه ضریب نفوذپذیری و مطالعه تغییرات آن تحت تأثیر آلاینده‌های آلی و فلز سنگین مورد استفاده قرار گرفت. این روش اندازه‌گیری مقرون به صرفه بوده و با توجه به ضخامت کم نمونه، سریع‌تر است [۱]. مطابق نظریه تحکیم یک بعدی ترزاقی، ضریب نفوذپذیری خاک‌های ریزدانه با ضریب تحکیم حاصل از آزمایش تحکیم در ارتباط است. لذا می‌توان ضریب نفوذپذیری را با استفاده از معادله (۲) محاسبه کرد. از این نظر آزمایش تحکیم روش مفیدی برای به دست آوردن نفوذپذیری خاک رس است [۲۵].

$$C_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad (2)$$

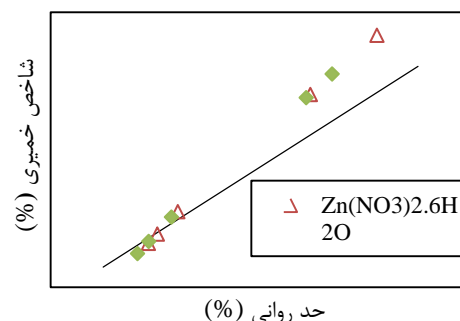
در معادله اخیر، k ضریب نفوذ پذیری، m_v ضریب تغییر حجم، C_v ضریب تحکیم و γ_w وزن مخصوص سیال می‌باشد. رس‌های با ضریب نفوذپذیری کم‌تر از 10^{-9} عملاً به عنوان رس‌های نفوذناپذیر تلقی می‌شوند [۲۶]. مقادیر بسیار بزرگ ضریب نفوذپذیری برای خاک‌های رسی که در آن هیدروکربن‌ها بر فاز مایع آن‌ها حاکم بوده‌اند، گزارش شده است [۴]. نتایج به دست آمده برای مقادیر ضریب نفوذپذیری در غلظت‌های مختلف چهار نوع آلاینده آلی در شکل (۶) ارائه شده است. همان‌گونه که از نمودارها مشخص است، به ازای یک نسبت تخلخل ثابت، با افزایش غلظت آلاینده آلی، نفوذپذیری خاک افزایش یافته است. به طوری که با افزایش غلظت اتانول از ۱۰ درصد به ۴۰ درصد (۴ برابر شدن غلظت) در نسبت تخلخل ۲، نفوذپذیری در حدود ۱۰ برابر افزایش داشته است. در مورد متانول افزایش ۷ برابری و در خصوص استیک اسید میزان افزایش ضریب نفوذپذیری در حدود ۴ برابر به ازای همان مقدار افزایش غلظت و نسبت تخلخل بوده است.

ضریب نفوذپذیری بنتونیت با افزایش غلظت دایوکسان از 20×10^{-4} به 40×10^{-4} درصد تنها $1/6$ برابر شده است. بنابر این هرچه ثابت دی‌الکتریک سیال از طریق افزایش غلظت آلاینده‌های آلی کم‌تر می‌شود، نفوذپذیری خاک افزایش می‌یابد. در این مورد Kaya و Fang [۲۳] افزایش ضریب نفوذپذیری را از 10^{-9} m/s به 10^{-4} m/s با کاهش ثابت دی‌الکتریک از ۸۰ به ۲ گزارش کرده‌اند. نتایجی مشابه برای نفوذپذیری توسط محققین مختلف در این زمینه ارائه شده است [۳، ۴]. از آن‌جا که با کاهش ثابت

و با افزایش غلظت، موقعیت نقاط به زیر خط 'A' منتقل شده است. در واقع افزایش غلظت اتانول و متانول منجر به کاهش تدریجی رفتار خمیری شده است، با این حال در غلظت ۴۰٪ نیز نقاط نظیر نمونه‌ها در بالای خط 'A' قرار دارند. نتایج ارائه شده در شکل (۵-الف) نشان می‌دهند که در مورد استیک اسید، افزایش غلظت تأثیر چندانی بر تغییر خاصیت خمیری نداشته و افزودن مقادیر کم (۱۰٪) ۱ و ۴- دایوکسان خاصیت خمیری را به شدت کاهش داده به طوری که خاک به عنوان لای با خاصیت خمیری کم (ML) طبقه‌بندی می‌شود. این نوع تغییر رفتار توسط محققین مختلف گزارش شده است [۹، ۲۳]. Spagnoli و همکاران [۸] نیز قادر به تعیین حد روانی سدیم-اسمکتیت در حضور ۷۵ و ۲۵ درصد اتانول نبودند. به واسطه نفوذپذیری کم، خاک‌هایی که مشخصات آن‌ها در نمودار خمیری، بالای خط 'A' قرار می‌گیرد، مصالح مناسبی از نظر هدایت هیدرولیکی به عنوان نگهدارنده در کاربردهای زیست‌محیطی می‌باشند و خاک‌هایی که پایین خط 'A' هستند، مصالح مناسبی از نظر نفوذپذیری و خصوصیات خمیری محسوب نمی‌شوند [۲۴].



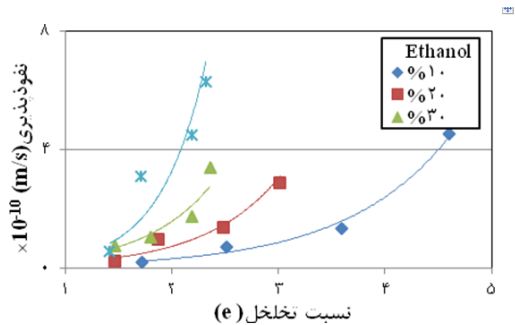
(الف)



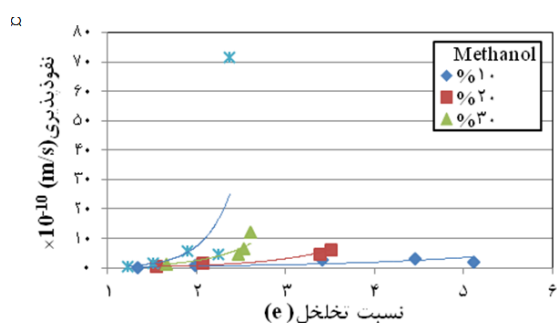
(ب)

شکل ۵- موقعیت نظیر نمونه‌های حاوی آلاینده‌های با غلظت مختلف بر نمودار خمیری کاساگرانده برای غلظت‌های مختلف:

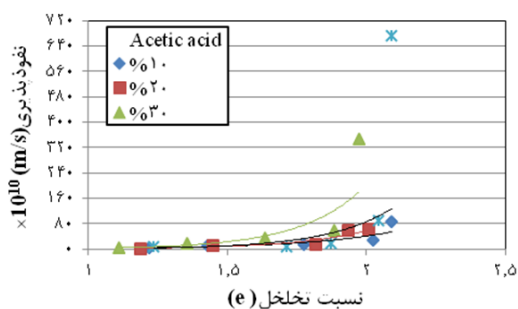
الف) آلاینده آلی، ب) آلاینده فلز سنگین [۲۱]



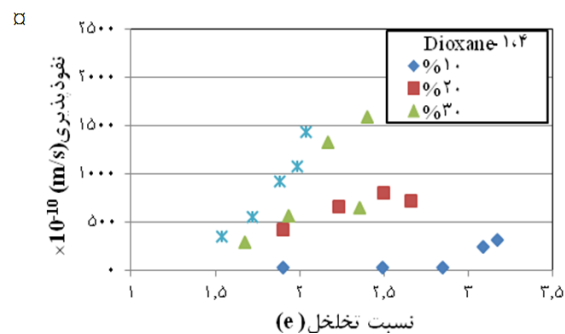
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۶- تغییرات ضریب نفوذپذیری در مقابل نسبت تخلخل برای غلظت‌های مختلف آلاینده‌های آلی: الف) متانول، ب) اتانول، ج) استیک اسید، د) دایوکسان

دی‌الکتریک ضخامت لایه دوگانه کاهش می‌یابد، نیروی دافعه بین ذرات نیز کاهش یافته و متعاقب آن تغییر ساختار خاک از قرارگیری ذرات به صورت پراکنده به ساختار درهم و افزایش نفوذپذیری را در پی داشته است (معادله (۱)) [۵، ۲۷]. با این حال کاهش ثابت دی‌الکتریک توجیه کننده تفاوت رفتار مشاهده شده بین آلاینده‌های مختلف نمی‌باشد. چرا که دایوکسان بیش‌ترین کاهش ثابت دی‌الکتریک را در مقایسه با سایر آلاینده‌های آلی داشته (شکل (۳- الف)) در حالی که کم‌ترین تغییر در نفوذپذیری را با افزایش غلظت نشان می‌دهد. از طرف دیگر با مقایسه مقادیر ضریب نفوذ پذیری به دست آمده در شکل (۶) برای سیالات آلی مختلف مشاهده می‌شود که به عنوان مثال به ازای نسبت تخلخل ۲ و در حضور غلظت ۴۰٪ اتانول، ضریب نفوذپذیری در حدود $3/26 \times 10^{-10}$ m/s و در مورد متانول 7×10^{-10} m/s بوده است. این در حالی است که افزودن ۴۰٪ استیک اسید، مقدار ضریب نفوذپذیری را تا 82×10^{-10} m/s افزایش داده و حضور دایوکسان ضریب نفوذپذیری را به 10^{-10} m/s رسانده است.

چنین تفاوت رفتاری با توجه به تغییر محدود ثابت دی‌الکتریک به ازای آلاینده‌های آلی مختلف با تکیه بر تئوری لایه دوگانه قابل توجیه نیست. علت این تفاوت رفتار را می‌توان با بررسی هم‌زمان سه عامل تشریح کرد:

(۱) کاهش ثابت دی‌الکتریک که منجر به کاهش ضخامت لایه دوگانه و کاهش نیروی دافعه بین ذرات شده و با ایجاد ساختار درهم نفوذپذیری را افزایش می‌دهد [۴، ۲۸].

(۲) تغییرات لزجت سیال با تغییر در غلظت آلاینده آلی مستقیماً نفوذپذیری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از آن‌جاکه لزجت آلاینده نقش مهمی در کاهش ضریب نفوذپذیری برای غلظت‌های کم و متوسط سیال آلی انحلال‌پذیر در آب دارد [۵]، پایین بودن لزجت دایوکسان حرکت سیال در بین ذرات خاک را تسهیل کرده و بیش‌ترین نفوذپذیری را از خود نشان می‌دهد. حال آن‌که اتانول بیش‌ترین لزجت را در بین آلاینده‌های مورد مطالعه داشته و بر این اساس کم‌ترین ضریب نفوذپذیری را نیز نشان داده‌است (شکل‌های (۳) و (۶)).

(۳) مواد آلی از طریق موارد ذیل با رس واکنش می‌دهند: ۱-۳ جذب به سطح ذره، برای مثال از طریق پیوند هیدروژنی و تبادل یونی

به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد به طوری که خاصیت خمیری رس که ناشی از حضور مولکول‌های آب لایه دوگانه است را از بین برده و مشابه خاک‌های سیلتی نفوذپذیری بالایی از خود نشان می‌دهد.

در همین راستا، مطالعه تغییرات ضریب نفوذپذیری با افزایش غلظت الکترولیت‌های حاوی فلز سنگین در نسبت منافذ مختلف در نشان داده شده است [۲۱]، که با افزایش غلظت الکترولیت در نسبت‌های منافذ یکسان مقدار ضریب نفوذپذیری کاملاً افزایش یافته است. در غلظت‌های بیش‌تر از ۰/۰۱ مولار، خاک به شدت تحت تأثیر غلظت کاتیون و حضور فلزات سنگین، ساختار نفوذپذیری یافته است. ضریب نفوذپذیری با افزایش غلظت الکترولیت‌های حاوی فلز سنگین در حدود ۷/۵ برابر در مورد سرب و ۵ برابر در مورد روی، در بازه غلظت‌های ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۱ مولار افزایش یافته است. حضور فلزات سنگین در مایع منفذی باعث کاهش pH محیط شده و تأثیر مضاعفی را علاوه بر تأثیرات غلظت و ظرفیت کاتیون باعث شده است [۱۹].

در مجموع مطابق نظریه لایه دوگانه، افزایش غلظت آلاینده فلز سنگین کاهش ضخامت لایه دوگانه و نیروی دافعه بین ذره‌ای را به دنبال خواهد داشت در نتیجه ساختار خاک از حالت پراکنده به حالت درهم تغییر می‌کند. لایه دوگانه نازک‌تر و کانال‌های ایجاد شده بین خوشه‌ای در ساختار درهم، فضای بیشتری برای جریان سیال در میان ذرات رس در اختیار می‌گذارد که منجر به افزایش نفوذپذیری خاک می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

با وجود تحقیقات مختلفی که در خصوص فرایند اندرکنش آلاینده‌های آلی و فلز سنگین با کانی‌های رسی انجام شده است، در خصوص مقایسه تغییر خصوصیات مهندسی بنتونیت در اندرکنش با آلاینده‌های فوق تحقیقات محدودی انجام گرفته است. تحقیق حاضر با هدف مقایسه تغییر رفتار خمیری و نفوذپذیری بنتونیت آلوده شده با آلاینده‌های آلی (متانول، اتانول، استیک اسید و دایوکسان) و فلز سنگین (روی و سرب) انجام شد. در این راستا، آزمایشات حدود اتربرگ و تحکیم بر نمونه‌های بنتونیت آلوده شده با غلظت‌های مختلف آلاینده آلی انجام و با نتایج موجود بنتونیت آلوده شده با فلز سنگین مقایسه شد.

نتایج اخذ شده از تحقیق حاضر حاکی از آن است که:

۳-۲) جذب مولکول‌های آلی بزرگ از طریق نیروهای واندروالس و ورود به فضای بین لایه‌های سیلیکات
۳-۳) تأثیر وزن مولکول آلی در فرایند اندرکنش با پولک رسی. وزن مولکول به صورت ترکیبی با عامل اول بر رفتار رس مؤثر است.

مهم‌ترین مشخصات مرتبط با اندرکنش مولکول‌های آلی و رس‌ها قطبیت، قطبش‌پذیری، انحلال‌پذیری، اندازه‌ی مولکولی و شکل مولکول‌های آلی می‌باشد [۱۱، ۲۹]. در واقع اگرچه ساختار پراکنده رس که این ماده را نفوذناپذیر ساخته ناشی از دافعه بین ذره‌ای است و همان‌طور که اشاره شد با کاهش ثابت دی‌الکتریک کاهش می‌یابد، اما بزرگی نیروی جاذبه واندروالس در محیط‌های آبی کم‌تر، متأثر از غلظت الکترولیت بوده و عمدتاً تحت تأثیر اندازه و ترکیب ذرات می‌باشد [۳۰]. از سوی دیگر از آن‌جا که به ازای دافعه یکسان، ذرات سنگین‌تر جاذبه بیشتری دارند، حضور مولکول‌های سنگین‌تر ساختار پراکنده رس را به ساختار درهم تبدیل کرده و نفوذپذیری را افزایش می‌دهد. به طوری که نیروی جاذبه واندروالس در مولکول‌های بزرگ‌تر بیش‌تر بوده و این مولکول‌ها در صورت جذب، جایگزین تعداد زیادی از مولکول‌های آب شده و سطح وسیعی از کانی رسی را اشغال می‌کنند. در نتیجه، فضای کم‌تری در اختیار مولکول‌های آب قرار می‌گیرد. به عنوان یک قانون کلی با افزایش وزن مولکولی سیال آلی، مولکول‌های آب بیش‌تری توسط مولکول آلی جایگزین شده و مولکول‌های بزرگ نقاط تماس بیش‌تری با سطح فعال خاک پیدا می‌کنند. نتایج تحقیقات دیگر محققین نیز نشان داده است که در جذب مولکول‌های بلند زنجیر، اندرکنش‌های واندروالس مهم بوده و آن‌گونه که اشاره شد این نیروها تجمعی بوده و تمایل به باز آرای مولکول‌های آلی برای بیش‌ترین نقاط تماس با سطح خاک را دارند [۱]. در این تحقیق، مولکول‌های آلی مورد آزمایش از نظر وزن مولکولی به ترتیب متانول > اتانول > استیک‌اسید > دایوکسان از کوچک به بزرگ مرتب می‌شوند. از نظر میزان تأثیر بر نفوذپذیری نیز می‌توان با جابه‌جا کردن متانول و اتانول، به دلیل لزجت بیش‌تر اتانول، به همین ترتیب آن‌ها را دسته‌بندی نمود. اتانول و متانول دارای مولکول‌های نسبتاً کوچک‌تر و قطبی هستند، از این رو از طریق پیوند با مولکول آب، جذب سطح رس می‌شوند و لایه دوگانه را کم‌تر تحت تأثیر قرار می‌دهند. اما استیک‌اسید و دایوکسان دارای مولکول‌های بزرگ هستند. دایوکسان مولکولی غیر قطبی داشته و لایه دوگانه که ناشی از خاصیت قطبی سیال ایجاد می‌شود را

- Conductivity of Clayey Soils Permeated with Water-Soluble Organics", Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25 (3), 582-589.
- [6] Barbour, S. L., Fredlund, D. G., "Mechanisms of Osmotic Flow and Volume Change in Clay Soils", Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26 (4), 551-562.
- [7] Chen, J. S., Cushman, J. H., Low, P. F., "Rheological Behaviour of Na-Montmorillonite Suspension at Low Electrolyte Concentration", Clays and Clay Minerals, 1990, 38 (1), 57-62.
- [8] Spagnoli, G., Stanjek, H., Sridharan, A., "Influence of Ethanol/Water Mixture on the Undrained Shear Strength of Pure Clays", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2012, 71 (2), 389-398.
- [9] Olgun, M., Yıldız, M., "Influence of Acetic Acid on Structural Change and Shear Strength Of Clays", Iranian Journal of Science and Technology Transaction B- Engineering, 2012, 36 (C1), 25-36.
- [10] Hueckel, T., Kaczmarek, M., Caramuscio, P., "Theoretical Assessment of Fabric and Permeability Changes in Clays Affected By Organic Contaminants", Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34 (4), 588-603.
- [11] Mitchell, J. K., Soga, K., "Fundamentals of Soil Behavior", John Wiley & Sons, New Jersey, 2005.
- [12] Gilligan, E. D., "The Effect of Organic Pore Fluids on the Fabric and Geotechnical Behavior of Clays", PhD Thesis, Syracuse, New York, 1983.
- [13] Gilligan, E. D., Clemence, S. P., "Fabric and Engineering Behavior of Organic-Saturated Clays", Bulletin of the Association of the Engineering Geologists, 1984, 21, 515-529.
- [14] Budhu, M., Giese Jr, R. F., Campbell, G., Baumgrass, L., "The Permeability of Soils with Organic Fluids", Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28 (1), 140-147.
- [15] Yong, R. N., "Geoenvironmental Engineering: Contaminated Soils, Pollutant Fate and Mitigation", CRC Press, 2001.
- [16] Yong, R. N., Warkentin, B. P., "Soil Properties and Behaviour", Elsevier, New York, 1975.
- [17] Olgun, M., Yıldız, M., "Effect of Organic Fluids on the Geotechnical Behavior of a Highly Plastic Clayey Soil", Applied Clay Science, 2010, 48 (4), 615-621.
- [18] Sridharan, A., Rao, S. M., Murthy, N. S., "Compressibility Behaviour of Homoionized
- ۱- آلاینده آلی و فلز سنگین از طریق مکانیزم‌های متفاوت بر رفتار خاک‌های رسی تأثیر می‌گذارند. ضمن آن که تئوری لایه دوگانه گوی-چپمن قادر به توصیف کامل تغییر رفتار حاصل از حضور آلاینده‌های آلی و فلز سنگین در خاک‌های رسی نمی‌باشد. با این حال وقتی یک نوع آلاینده خاص مورد بررسی قرار می‌گیرد تفسیر خوبی از تغییر رفتار ارائه می‌دهد.
- ۲- در فرایند اندرکنش آلاینده آلی و خاک رس، ثابت دی الکتریک، لزجت سینماتیکی و اندازه مولکولی تغییر رفتار بنتونیت را در حضور سیال آلی کنترل می‌کنند. در این راستا کاهش ثابت دی الکتریک، کاهش لزجت سینماتیکی و افزایش اندازه مولکول‌ها، دامنه خمیری رس‌ها را کاهش داده و نفوذپذیری را افزایش می‌دهند. به طوری که غلظت ۴۰ درصد دایوکسان نفوذپذیری بنتونیت را ۲۰۰۰ برابر کرده است. همچنین به ازای سیالات آلی متفاوت و در ثابت دی الکتریک یکسان، تفاوت حد روانی بنتونیت با لحاظ کردن اثر تفاوت لزجت نسبی سیال، با تقسیم مقادیر حد روانی بر نسبت لزجت آلاینده به آب مقطر، قابل توجیه می‌باشد. به طوری که در ثابت دی الکتریک ۶۰، تفاوت حداکثر ۳۲ درصدی در حد خمیری در حضور سیالات آلی مختلف با اعمال اصلاح ذکر شده به ۱۷ درصد کاهش می‌یابد و در این حالت تطابق نظریه لایه دوگانه با نتایج ارائه شده بهتر مشهود می‌شود.
- ۳- در مجموع آلاینده‌های آلی و فلز سنگین، پس از نفوذ به محیط خاک منجر به کاهش قابل توجه در خواص خمیری و افزایش نفوذپذیری خاک‌های رسی می‌شوند. این وضعیت، ریسک احتمال آلوده شدن منابع آب زیرزمینی بر اثر تماس دائم بستر رسی با شیرابه مراکز دفن زباله را افزایش می‌دهد.

۵- مراجع

- [1] Yong, R. N., Mohamed, A. M. O., Warkentin, B. P., "Principles of Contaminant Transport in Soils", Elsevier, New York, 1992.
- [2] Bolt, G. H., "Physicochemical Analysis of the Compressibility of Pure Clays", Géotechnique, 1956, 6 (2), 86-93.
- [3] Mesri, G., Olson, R. E., "Consolidation Characteristics of Montmorillonite", Géotechnique, 1971, 21 (4), 341-352.
- [4] Fernandez, F., Quigley, R. M., "Hydraulic Conductivity of Natural Clays Permeated with Simple Liquid Hydrocarbons", Canadian Geotechnical Journal, 1985, 22 (2), 205-214.
- [5] Fernandez, F., Quigley, R. M., "Viscosity and Dielectric Constant Controls on the Hydraulic

- Colloid Chemistry: For Clay Technologists, Geologists, and Soil Scientist", Krieger, Marabal, Florida, 1991.
- [31] Weast, R. C., "CRC Handbook of Chemistry and Physics: A Ready-Reference Book of Chemical And Physical Data", CRC Press, 1973.
- [32] Perry, R. H., Green, D. W., "Perry's Chemical Engineers Handbook", McGraw - Hill Professional Publishing, 8th Edition, 2008.
- Bentonites", *Géotechnique*, 1986, 36 (4), 551-564.
- [19] Ouhadi, V. R., Yong, R. N., 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.
- [20] Newland, P. L., Allely, B. H., "A Study of The Consolidation Characteristics of a Clay", *Géotechnique*, 1960, 10 (2), 62-74.
- [۲۱] صدیقی، م.، "رفتار تراکم پذیری اسمزی و خصوصیات تحکیمی بنتونیت در اثر اندرکنش با آلاینده‌های حاوی فلز سنگین"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ۱۳۸۲.
- [22] White, W. A., "Water Sorption Properties of Homoionic Clay Minerals", Illinois State Geological Survey Report of Investigations 208, University of Illinois, Illinois, 1958.
- [23] Kaya, A., Fang, H. Y., "The Effects of Organic Fluids on Physicochemical Parameters of Fine-Grained Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37 (5), 943-950.
- [24] Murray, E., Rix, D., Humphrey, R., "Evaluation of Clays as Linings to Landfill", *Engineering Geology Special Publications*, 1996, 11 (1), 251-258.
- [۲۵] بهنیا، ک.، طباطبایی، ا. م.، "مکانیک خاک"، مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، ۱۳۸۴، جلد اول، ص. ۴۵۷.
- [26] Somerville, S. H., Large, D. S., "Control of Groundwater for Temporary Works", *Construction Industry Research and Information Association*, Vol. 113 of CIRIA Report, 1986.
- [27] Chen, J., Anandarajah, A., "Influence of Pore Fluid Composition on Volume of Sediments In Kaolinite Suspensions", *Clays and Clay Minerals*, 1998, 46 (2), 145-152.
- [28] Arasan, S., "Effect of Chemicals on Geotechnical Properties o Clay Liners: A Review", *Research Journal of Applied Science, Engineering and Technology*, 2010, 2 (8), 765-775.
- [29] Cheng, H., Hu, E., Hu, Y., "Impact of Mineral Micropores on Transport and Fate of Organic Contaminants: A Review", *Journal of Contaminant Hydrology*, 2012, 80-90.
- [30] Van Olphen, H., "An Introduction to Clay

EXTENDED ABSTRACT

The Comparison of Plastic and Permeability Behavior of Bentonite in the Presence of Organic and Heavy Metal Contaminants

Vahid Reza Ouhadi ^{a,*}, Mohammad Saeed Fakhimjoo ^b, Seyed Taghi Omid Naeini ^b

^a *Faculty of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Iran*

^b *School of Civil Engineering, University of Tehran, Iran*

Received: 18 April 2015; **Accepted:** 28 October 2015

Keywords:

Bentonite, Organic contaminant, Heavy metal contaminant, Plastic behavior, Permeability, Dielectric constant

1. Introduction

Bentonite is a suitable material in engineering landfills due to its low permeability and contaminant sorption ability. The presence of contaminant in pore fluid and its interaction with clay particles, changes the physical and behavioral properties of clays. Organic and heavy metal contaminants are two types of environmental contaminants. Prior researches have shown that organic contaminants compress the double layer due to their low dielectric constant. A compressed double layer makes a larger permeability and lower plasticity properties. In spite of several researches that have been done about organic and heavy metal contaminant interactions with clay minerals, there is lack of study about the difference between the influences of these two contaminants upon soil behaviour. The objective of this paper is to compare the plasticity and permeability changes of bentonite upon interaction with organic (Methanol, Ethanol, Acetic Acid, Dioxane) and heavy metal (Pb and Zn) contaminants.

2. Methodology

To achieve the objective of this paper, several experiments including Atterberg limits and consolidation tests were performed upon contaminated bentonite at different concentration of organic contaminants. The achieved results were compared with the available results for heavy metal-bentonite interaction. Furthermore, the effect of different parameters of theoretical model such as dielectric constant, valance of cation, hydrated radius of cations, concentration of heavy metal and their effects on plasticity behavior and permeability have been studied. The geotechnical properties of soil were determined based on the ASTM Standard [1]. The geo-environmental engineering properties of soil were measured by the method presented by Yong et al. [2]. The pore fluid analysis was determined by application of GBC 932 Plus atomic absorption spectrophotometer. Tables 1 and 2 show the geotechnical and geo-environmental engineering parameters of bentonite sample which was used to study the clay-organic contaminant interaction.

To prepare the organic-contaminated bentonite, several solutions with concentrations of 10%, 20%, 30%, and 40% of each organic contaminant were prepared. Then, they were mixed with 100 g of bentonite sample with the soil: electrolyte ratio of 1:8. After achieving equilibrium conditions, the required experiments was performed on samples.

* Corresponding Author

E-mail addresses: vahidouhadi@yahoo.ca (Vahid Reza Ouhadi), saeedfakhimjoo@yahoo.com (Mohammad Saeed Fakhimjoo), stnaeini@ut.ac.ir (Seyed Taghi Omid Naeini).

Table 1. Geotechnical properties of bentonite sample

Characteristics	Quantity Measured
Liquid Limit, %	314.5
Plasticity Index, %	283.3
Soil classification	CH
Clay fraction, %	77
Silt fraction, %	23

Table 2. Geo-environmental engineering properties of bentonite sample

Characteristics	Quantity Measured
Carbonate Content (%)	8
pH	9.01
Na ⁺ , (cmol /kg)	48.5
Ca ²⁺ , (cmol /kg)	14.2
Mg ²⁺ , (cmol /kg)	3.4
K ⁺ , (cmol /kg)	2.1
CEC, (cmol /kg)	68.2

3. Results and discussion

The achieved results indicate that in terms of plasticity behaviour of bentonite after its interaction with organic contaminant, two types of behaviour can be seen. In the first type, the interaction of bentonite with Ethanol and Methanol show that at organic concentration less than 10%, these two organic contaminant have very low influence upon bentonite behaviour. However, as the concentration of organic contaminant increases, more impact of organic contaminant upon bentonite plasticity behaviour observed.

As an example, while 10% Ethanol causes 15% reduction in liquid limit of bentonite, the presence of 40% Ethanol concentration causes 39% reduction in its liquid limit. The second type of organic contaminant-bentonite interaction belongs to Acetic Acid and Dioxane. In this type of organic contaminant, the presence of 10% Dioxane causes 43% reduction in bentonite liquid limit. Furthermore, if the Dioxane concentration increases to 40%, the liquid limit of bentonite shows only 48% reduction. These types of behaviour can be explained with the concept of viscosity of organic contaminants.

In addition, the plotting of atterberg limits of organic contaminated bentonite and heavy metal contaminated bentonite in ASTM plasticity Figure shows that an increase in the concentration of these two series of contaminant in pore fluid of bentonite for low concentration of contaminant keeps the assigned point of soil on the top of the "A" line. However, as the concentration of contaminant increases, the assigned point gets closer to the "A" line. At the very high concentration of contaminant, one observes that the assigned point drops to the lower part of "A" line. These behaviours are explained from theoretical and micro-structural points of view.

4. Conclusions

The results of this paper show that an increase in contaminant concentration causes a reduction in plastic behavior of soil. Moreover, an increase in soil hydraulic conductivity happens upon soil contaminant interaction. For instance, an increase in organic contaminant concentration from 10% to 40% in void ratio equal to 2 causes an increase in soil hydraulic conductivity which was 10 times larger for ethanol, 7 times larger for methanol and 4 times larger for acetic acid, respectively.

In addition, with an increase in concentration of Zn and Pb from 0.001M to 0.01M, the soil hydraulic conductivity increased 5 and 7.5 times for Pb and Zn, with respect to non-contaminated soil, respectively. It is shown that dielectric constant, kinematic viscosity and molecule size control the bentonite behaviour in the presence of organic fluid. The results of this study show that the difference between the liquid limits of bentonite in the presence of different organic contaminants, which had similar dielectric constant, can be interpreted by relative viscosity of electrolytes. Furthermore, the discrepancy of experimental results with double layer theory can be explained by the use of relative viscosity of electrolytes.

5. References

- [1] ASTM, "Annual Book of ASTM Standards", Philadelphia, 2003.
- [2] Yong, R. N., Mohamed, A. M. O., Warkentin, B. P., "Principles of Contaminant Transport in Soils", Elsevier, 1992,.
- [3] Yong, R. N., Ouhadi, V. R., Goodarzi, A. R., "Effect of Cu^{2+} Ions and Buffering Capacity on Smectite Microstructure and Performance", Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2009, 135, 1981-1985.