

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و دوم، شماره سه، خرداد ماه ۹۹

## تأثیر هیدراتاسیون اولیه بنتونیت بر تغییر خصوصیات خمیری آن در اندرکنش با آلاینده آلی

وحیدرضا اوحدی<sup>\*۱</sup>

[vahidouhadi@yahoo.ca](mailto:vahidouhadi@yahoo.ca)

زینب آقایی<sup>۲</sup>

کامبیز بهنیا<sup>۳</sup>

تاریخ پذیرش: ۹۵/۸/۱۱

تاریخ دریافت: ۹۴/۴/۲۵

### چکیده

زمینه و هدف: آستر خاک رسی متراکم (CCLs) به دلیل ضریب نفوذپذیری کم و قابلیت مناسب در جذب و نگهداری آلاینده، در مراکز دفن مهندسی زباله مورد استفاده قرار می‌گیرد. تغییر ویژگی‌های سیال منفذی در خاک، تأثیر بسزایی بر مشخصات مهندسی و رفتاری خاک‌های رسی دارد. با وجود تحقیقاتی که در خصوص فرآیند اندرکنش رس و مواد آلی صورت گرفته، در زمینه تأثیر هیدراتاسیون اولیه بنتونیت و تغییر در ثابت دی‌الکتریک آلاینده آلی بر خصوصیات ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی بنتونیت تحقیقات محدودی انجام شده است. در حالی که چنین فرآیند اندرکنشی در بسیاری از پروژه‌های صنعتی و دفن مهندسی زباله به عنوان یک عملکرد مورد انتظار به وفور رخ می‌دهد.

روش بررسی: در این تحقیق از خاک سدیم-بنتونیت در معرض ۲ نوع ماده آلی (اتانول و اسید استیک) با ثابت دی‌الکتریک مختلف تحت شرایط هیدراتاسیونی متفاوت استفاده شده است. پس از حصول تعادل، تأثیر فرآیند هیدراتاسیون اولیه و همچنین تغییر در ثابت دی‌الکتریک بر خصوصیات خمیری بنتونیت در اندرکنش با مواد آلی توسط آزمایش حدود اتربرگ مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است.

یافته‌ها: نتایج حاکی از آن است که در نمودار خمیری کاساگرانده، نمونه‌های سدیم-بنتونیت با هیدراتاسیون اولیه و قرار گرفته در معرض اتانول و اسید استیک به ترتیب، همچنان به عنوان خاک CH و انتقال یافته از ناحیه CH به MH طبقه بندی شده‌اند. نتیجه‌گیری: تغییر در ثابت دی‌الکتریک و شرایط متفاوت هیدراتاسیونی منجر به تغییر در ضخامت لایه دوگانه شده است که این عامل، موجب تغییرات قابل توجهی در ساختار و تغییر رفتار خاک رسی شده است. این تغییرات بر اساس روابط تئوریک موجود مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و محدودیت‌های نظری در روابط تئوریک در تفسیر پاسخ‌های خاک به تفکیک بحث شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: سدیم-بنتونیت، آلاینده آلی، هیدراتاسیون اولیه، ثابت دی‌الکتریک.

۱- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا؛ عضو هیئت علمی وابسته دانشکده عمران، دانشگاه تهران\* (مسوول مکاتبات)

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران-ژئوتکنیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.

## Impact of Initial Hydration of Bentonite on Its Plasticity Properties Change in Interaction with Organic Contaminant

Vahid Reza Ouhadi<sup>1\*</sup>

[vahidouhadi@yahoo.ca](mailto:vahidouhadi@yahoo.ca)

Zeinab Aghaei<sup>2</sup>

Kambiz Behnia

Acceptance Date: November 1, 2016

Date Received: July 16, 2015

### Abstract

**Background and Objective:** The compacted clay liners (CCLs) due to their low permeability and suitable capability for contaminant retention are widely used in engineering waste disposal sites. Generally, the change in properties of soil pore fluid has a very distinguished impact on the behaviour of clayey soils. In spite of several researches, which have been performed on the process of clay and organic contaminant interaction, there are few researches on the influence of dielectric constant of organic contaminant and initial hydration of bentonite on the geotechnical and geo-environmental properties of organic contaminated bentonite. Such a process is very common in many industrial and waste disposal projects.

**Methods:** This research was performed on sodium-bentonite soil samples which were exposed to two different organic materials (Ethanol and Acetic Acid) which have different dielectric constant. Furthermore, two different pre-hydration and post-hydration conditions were studied in this research. After achieving equilibrium condition, the influence of initial hydration and change on the dielectric constant of pore fluid upon interaction of organic material and bentonite was investigated. The investigation focuses attention on the plasticity properties of bentonite by the use of Atterberg limit tests.

**Findings:** The achieved results indicate that in Casagrande's plasticity chart, two pre-hydrated sodium-bentonite soil samples which were exposed further to ethanol and acetic acid are classified as CH and shifted from CH to MH, respectively.

**Discussion and Conclusion:** The change on the dielectric constant of pore fluid and different hydration conditions cause a change on the thickness of the double layer of clay fraction of the soil. This causes a noticeable change on the structure and behaviour of clay fraction of the soil sample. This variation on bentonite behaviour has been discussed based on the current available theory of double layer. Furthermore, the theoretical limitation for interpretation of results has been addressed.

**Key words:** Sodium-Bentonite; Organic Contaminant; Initial Hydration; Di-Electric Constant.

---

1- Professor, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran; Adjunct Prof., University of Tehran, College of Engineering, School of Civil Engineering, Tehran, Iran. \*(Corresponding Author)

2- M.Sc. in Geotechnical Engineering, University of Tehran, College of Engineering, School of Civil Engineering, Tehran, Iran

3- Associate Professor, University of Tehran, College of Engineering, School of Civil Engineering, Tehran, Iran

## مقدمه

بین پولک‌ها، تمایل خاک به جذب آب کم‌تر شده و حد روانی خاک رسی چرب کاهش می‌یابد، بنابراین شاخص خمیری خاک نیز به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد که سبب می‌شود نقطه نظیر خاک CH مورد مطالعه پس از اندرکنش با مواد آلی، در زیر خط A قرار گیرد و طبقه‌بندی خاک به MH یا ML تغییر کند (۱۳). هرچه سطح مخصوص خاک رسی بیش‌تر باشد، نیروهای دافعه بیش‌تر بوده و در نتیجه درصد رطوبت نظیر حد روانی خاک افزایش می‌یابد (۱۴).

لیو و همکاران دریافتند که با افزایش غلظت اسیدسولفوریک به عنوان سیال منفذی بنتونیت، مقادیر حد روانی کاهش یافت در حالی که در مقادیر حد خمیری تغییرات اندکی ایجاد شد (۱۵). نسبت سیال آلی به آب در انجام آزمایش حدود اتربرگ اثر بسزایی دارد چنان‌که در مقادیر بسیار زیاد ماده آلی، انجام آزمایش حتی غیرقابل اجرا می‌شود. در نسبت سیال آلی به آب برابر ۸۰٪، آزمایش حد روانی و حد خمیری به سختی روی نمونه اجرا می‌شود (۱۳). به طور مشابه در مورد سدیم-بنتونیت در سیال منفذی با نسبت اتانول به آب ۷۵/۲۵ و اتانول خالص آزمایش حد روانی انجام‌پذیر نبود (۱۶).

به منظور بررسی خواص خاک رسی می‌توان از معادله گوی-چپمن که در معادله (۱) آورده شده است استفاده نمود. به کمک این معادله، ضخامت لایه دوگانه ذره رسی که با ثابت دی‌الکتریک سیال منفذی رابطه دارد، 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 دی‌الکتریک سیال، T دما،  $n_0$  غلظت الکترولیت، e بار الکتریکی الکترون و v ظرفیت یون است. با توجه به معادله (۱)، ضخامت لایه دوگانه به صورت مستقیم با جذر ثابت دی‌الکتریک سیال منفذی رابطه دارد و کاهش ثابت دی‌الکتریک منجر به کاهش ضخامت لایه دوگانه خواهد شد (۱۷).

تغییر ویژگی‌ها و خواص سیال نفوذی در خاک، تأثیر بسزایی بر رفتار مهندسی خاک دارد. این تأثیرات تابعی از خواص سیال نافذ و کانی‌شناسی خاک است (۱). ویژگی‌های خاک رس به شدت تحت تأثیر تغییرات سیال منفذی قرار دارد، این موضوع به دلیل تغییر در نیروی سطحی ذرات خاک و تغییر کلی خواص مهندسی خاک است. تعیین تغییرات خواص مهندسی خاک و در نظر گرفتن اقدامات احتیاطی با توجه به رفتار خاک، زمانی که به عنوان خاک پایه و اساس و یا خاک‌ریز استفاده می‌شود، بسیار مهم است. تأثیر سیال آلی بر رفتار ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی خاک رس توسط بسیاری از محققان بررسی شده است. نتایج حاصله حاکی از آن بوده که رفتار مونت‌موریلونیت وابسته به تغییرات در نیروی "لایه دوگانه" است (۲).

نیروی دافعه‌ی لایه دوگانه و نیروی جاذبه‌ی واندروالسی، دو عامل مهم و تعیین‌کننده در رفتار خاک‌های رسی هستند (۳). مکانیزم‌های کنترل‌کننده در تغییرات حد روانی رس‌ها (خاک‌های حاوی مونت‌موریلونیت) نشان داده است که عوامل مؤثر بر کاهش ضخامت لایه دوگانه مانند ثابت دی‌الکتریک سیال منفذی، ظرفیت و تمرکز کاتیون‌های قابل تبادل اثر مهمی بر حدود روانی خاک‌های با کانی غالب مونت‌موریلونیت دارد (۴). کاهش ثابت دی‌الکتریک سیال حفره‌ای، سبب کاهش ضخامت لایه دوگانه و به نوبه خود کاهش در نیروهای دافعه الکترواستاتیکی می‌تواند موجب ایجاد ساختار مجتمع در رس‌ها شوند (۵). به طور کلی تغییرات در خواص مهندسی خاک رسی می‌تواند به علت انقباض لایه دوگانه پخشیده بنتونیت به دلیل افزایش در غلظت و کاهش ثابت دی‌الکتریک آلاینده در سیال منفذی (۶، ۷)، انحلال کربنات و یا سمناسیون بین ذرات رس در اثر شرایط اسیدی (۸، ۹)، تغییرات ژئوشیمیایی پیچیده و همچنین تغییر در ساختار کانی‌ها (۱۰، ۱۱) رخ دهد.

مقادیر حد روانی با نسبت ثابتی با کاهش ثابت دی‌الکتریک سیال حفره‌ای کاهش می‌یابد (۱۲). بر اثر کاهش نیروهای دافعه

در جدول ۱ ارایه شده است. لازم به یادآوری است که تعیین مقادیر ارایه شده در جدول ۱ با استناد به استاندارد ASTM (۱۹) انجام شده است.

#### جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی سدیم-بنتونیت مورد

##### استفاده

Table 1. Physical properties of Sodium-Bentonite sample

Characteristic	Quantity
Clay (%)	۷۳
Silt (%)	۲۶
Sand (%)	۱
Liquid Limit (%)	۳۱۵
Plastic Limit (%)	۳۸
PI (%)	۲۷۷
Activity	۳/۷۹
Soil Classification	CH

در تعیین مشخصات ژئوتکنیک زیست‌محیطی نمونه‌ها (جدول ۲)، CEC خاک با استفاده از روش باریم کلراید (۲۰) سطح مخصوص با استفاده از محلول EGME (۲۱) و درصد کربنات خاک به روش تیتراسیون (۲۲) اندازه‌گیری شد.

#### جدول ۲- ویژگی‌های ژئوتکنیک زیست‌محیطی سدیم-بنتونیت مورد استفاده

Table 2. Geo-environmental properties of Sodium-Bentonite sample

Characteristic	Quantity
Carbonate content (%)	۸
CEC (cmol/kg-soil)	۶۸/۳
Exchangeable Na <sup>+</sup> (cmol/kg-soil)	۵۰/۹
Exchangeable Ca <sup>+</sup> (cmol/kg-soil)	۱۲/۲
Exchangeable Mg <sup>+</sup> (cmol/kg-soil)	۳/۱
Exchangeable K <sup>+</sup> (cmol/kg-soil)	۲/۱
Mineral composition in decreasing abundance	Montmorillonite, Quartz, Calcite

مولکولی متفاوتی باشند. بر این اساس در این تحقیق از اتانول و اسید استیک به عنوان آلاینده‌های آلی استفاده شده است.

اثر فرآیندی مانند هیدراتاسیون اولیه به طور اندک در اندرکنش مواد آلی-خاک رس مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های صورت گرفته بر روی مقادیر هدایت هیدرولیکی نشان داد که فرآیند پیش هیدراتاسیونی تأثیرات قابل توجهی داشته است تا آن‌جا که توانسته است اثری مشابه با حذف آلاینده از سیال منفذی ایجاد نماید (۱۸).

با توجه به معادله گوی چپمن مشاهده می‌شود که اثرات شرایط متفاوت فرآیند هیدراتاسیونی در آن لحاظ نشده است و لذا معادله‌ی مطرح شده به طور کامل نمی‌تواند پاسخ‌گوی تمامی مسایل مطرح در اندرکنش آلاینده آلی و خاک رسی باشد. از سوی دیگر آزمایش حدود اتربرگ نماینده‌ی نسبتاً خوبی به منظور درک چگونگی تغییرات رفتاری سدیم-بنتونیت در مجاورت آلاینده‌ی آلی است. بر این اساس، این تحقیق با هدف مطالعه اثرات هیدراتاسیون اولیه بر اندرکنش آلاینده آلی-خاک رسی با استفاده از نتایج آزمایش حدود اتربرگ انجام شده است.

#### مواد و روش‌ها

در این تحقیق به منظور مطالعه اثر هیدراتاسیون و نیز حضور آلاینده آلی بر رفتار خاک‌های رسی از نمونه خاک رس سدیم-بنتونیت تهیه شده از شرکت "ایران باریت" استفاده شده است؛ بخشی از مشخصات فیزیکی خاک سدیم-بنتونیت

مواد آلی استفاده شده برای مطالعه اندرکنش با بنتونیت به نحوی انتخاب شدند که دارای ثابت‌های دی‌الکتریک و اندازه

کلیه مواد فوق از شرکت مرک تهیه شدند. مشخصات آلاینده‌ها در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳- مشخصات نمونه آب مقطر و آلاینده‌های آلی

Table 3. Specifications of distilled water and organic contaminants

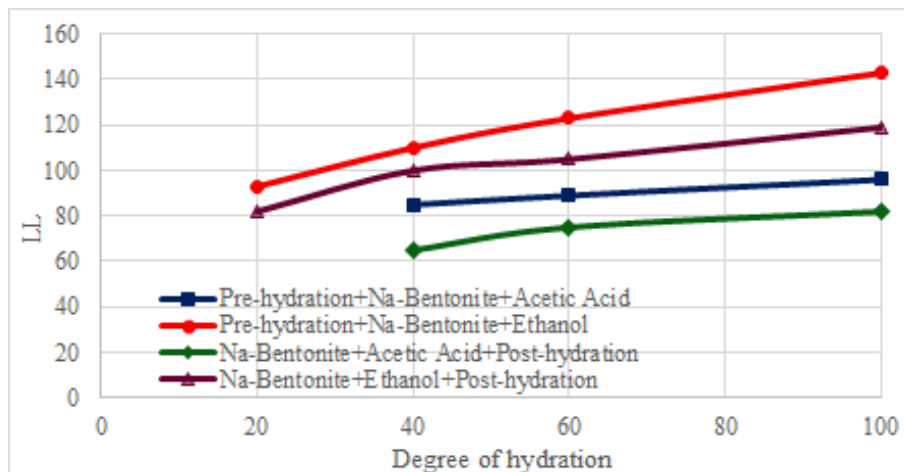
وزن مولکولی (g/mol)	لزجت (mPa s)	وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )	ثابت دی‌الکتریک	نام ماده
۱۸/۰۲	۱/۰۰۲	۰/۹۹۸	۷۹/۹۹	آب مقطر
۴۶/۰۷	۱/۲	۰/۷۹	۲۵/۰۲	اتانول
۶۰/۰۵	۱/۲۲	۱/۰۵	۶/۱۵	اسید استیک

آلاینده به نمونه ۱۰۰ گرمی از خاک اضافه شد و پس از به تعادل رسیدن سوسپانسیون موجود در شرایط مختلف هیدراتاسیونی (اضافه نمودن ۲۰ درصد، ۴۰ درصد، ۶۰ درصد و ۱۰۰ درصد وزنی خاک، آب مقطر به آن)، نمونه به حالت تعادل رسیده است. سپس آزمایش حدود اتربرگ مطابق استاندارد ASTM بر روی نمونه‌های تهیه شده انجام شد.

#### بحث و بررسی نتایج

نمودار حد روانی برای نمونه خاک سدیم-بنتونیت قرار گرفته در معرض دو آلاینده‌ی آلی متفاوت اتانول و اسید استیک با نسبت ۱:۱ وزنی آلاینده آلی نسبت به خاک در شرایط متفاوت هیدراتاسیونی در شکل (۱) ارایه شده است.

برای ساخت نمونه‌ها دو حالت هیدراتاسیونی پیش هیدراته شده و پس هیدراته شده برای بنتونیت در اندرکنش با هر آلاینده در نظر گرفته شده است. در شرایط پیش هیدراته ابتدا به ۱۰۰ گرم از نمونه‌ی خاک مورد آزمایش در شرایط مختلف هیدراتاسیونی (۲۰ درصد، ۴۰ درصد، ۶۰ درصد، ۱۰۰ درصد وزنی خاک) آب مقطر افزوده شد و به منظور به تعادل رسیدن، نمونه‌ها به مدت ۹۶ ساعت (هر ۲۴ ساعت به مدت ۲ ساعت) بر دستگاه لرزاننده قرار داده شدند تا از همگنی فیزیکی-ظاهری آن اطمینان حاصل شود. پس از به تعادل رسیدن، به نسبت وزنی ۱:۱ (نسبت به وزن خاک) آلاینده به نمونه افزوده شد و فرآیند حصول تعادل برای سوسپانسیون حاضر صورت گرفت. برای نمونه در شرایط پس هیدراته ابتدا به نسبت وزنی ۱:۱ (نسبت به وزن خاک)



شکل ۱- نمودار حد روانی نمونه‌های پیش هیدراته شده و پس هیدراته شده‌ی سدیم-بنتونیت قرار گرفته در معرض دو آلاینده‌ی آلی متفاوت (اتانول و اسید استیک)

Figure 1. Liquid limit graph for pre-hydration and post-hydration Na-Bentonite samples exposed to two different organic contaminants (Ethanol and Acetic acid)

لازم به تأکید است که انجام آزمایش بر روی نمونه‌های با درجه هیدراتاسیون کم‌تر از ۲۰ درصد امکان‌پذیر نبود. این موضوع به علت کم بودن ثابت دی‌الکتریک سیال منفذی و ایجاد ساختار به شدت درهم نمونه‌ها بوده است. همان‌طور که در تحقیقی حد روانی و خمیری مونت‌موریلونیت در حضور سیال خالص تولوئن و اتیلن گلیکول را نتوانستند تعیین کنند (۲۳). همچنین به طور مشابه در مورد سدیم-بنتونیت در سیال منفذی با نسبت اتانول به آب (۷۵ به ۲۵) و اتانول خالص آزمایش حد روانی انجام‌پذیر نبود (۱۶).

در شکل (۱) همچنین تغییرات حد روانی نمونه‌های سدیم-بنتونیت پیش هیدراته شده و پس هیدراته شده و قرار گرفته در معرض ۱:۱ وزنی اسید استیک نشان داده شده است. نتایج اخذ شده نشان می‌دهد با افزایش درجه هیدراتاسیون، مقادیر حد روانی نمونه‌ها بر اثر اندرکنش با آلایندگی نسبت به نمونه سدیم-بنتونیت اولیه کاهش کم‌تری نشان داده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۱) مقدار حد روانی نمونه سدیم-بنتونیت با ۱۰۰ درصد هیدراتاسیون اولیه تقریباً ۱۱ درصد بزرگ‌تر از حد روانی نمونه سدیم-بنتونیت با ۴۰ درصد هیدراتاسیون اولیه و قرار گرفته در معرض آلایندگی آلایندگی اسید استیک بوده است. در نمونه‌ی سدیم-بنتونیت پس هیدراته شده این تفاوت حدود ۱۷ درصد بوده است. همچنین بر اساس نتایج شکل (۱)، در کلیه نمونه‌ها، مقادیر حد روانی در نمونه‌ی سدیم-بنتونیت پیش هیدراته شده نسبت به نمونه‌ی سدیم-بنتونیت پس هیدراته شده بیش‌تر است که حداکثر این اختلاف مربوط به نمونه‌های با ۴۰ درصد درجه‌ی هیدراتاسیونی است که نمونه‌ی سدیم-بنتونیت پیش هیدراته شده به میزان ۲۰ درصد حد روانی بزرگ‌تری داشته است. با افزایش درجه‌ی هیدراتاسیون در واقع ثابت دی‌الکتریک مخلوط آلایندگی آلایندگی و آب در مقایسه با ثابت دی‌الکتریک ماده آلایندگی، افزایش یافته است که منجر به کاهش کم‌تر در ضخامت لایه دوگانه شده است. به بیان دیگر نمونه‌های سدیم-بنتونیت پس هیدراته از ابتدا در معرض ثابت دی‌الکتریک بسیار کوچکی (ثابت دی‌الکتریک آلایندگی اسید استیک) قرار گرفته‌اند که سبب کاهش قابل توجه در حد

در نمودار شکل (۱) با افزایش درجه‌ی هیدراتاسیون در نمونه‌ی سدیم-بنتونیت پیش هیدراته شده، مقدار حد روانی نمونه سدیم-بنتونیت قرار گرفته در معرض آلایندگی آلایندگی نسبت به حد روانی نمونه سدیم-بنتونیت فاقد آلودگی (جدول ۱) کاهش کم‌تری نشان داده است. به طوری که با کاهش پیش هیدراتاسیون اولیه، کاهش در حد روانی نمونه قرار گرفته در معرض آلایندگی آلایندگی بیشتر بوده است. همچنین برای کلیه موارد آزمایش شده، نمونه‌های سدیم-بنتونیت پیش هیدراته شده، حد روانی بزرگ‌تری نسبت به نمونه‌های سدیم-بنتونیت پس هیدراته شده در فرایند اندرکنش با آلایندگی آلایندگی از خود نشان داده‌اند. حداکثر این اختلاف مربوط به نمونه‌های با ۱۰۰ درصد درجه‌ی هیدراتاسیونی اولیه است که نمونه‌ی سدیم-بنتونیت پیش هیدراته شده به میزان ۲۴ درصد حد روانی بزرگ‌تری نسبت به نمونه پس هیدراته شده در فرایند اندرکنش با آلایندگی آلایندگی از خود نشان داده است. به طور کلی بر اساس نتایج ارائه شده در شکل فوق، با افزایش میزان درجه‌ی هیدراتاسیون اولیه، نمونه سدیم-بنتونیت در فرایند اندرکنش با آلایندگی آلایندگی کاهش کم‌تری در حد روانی داشته است.

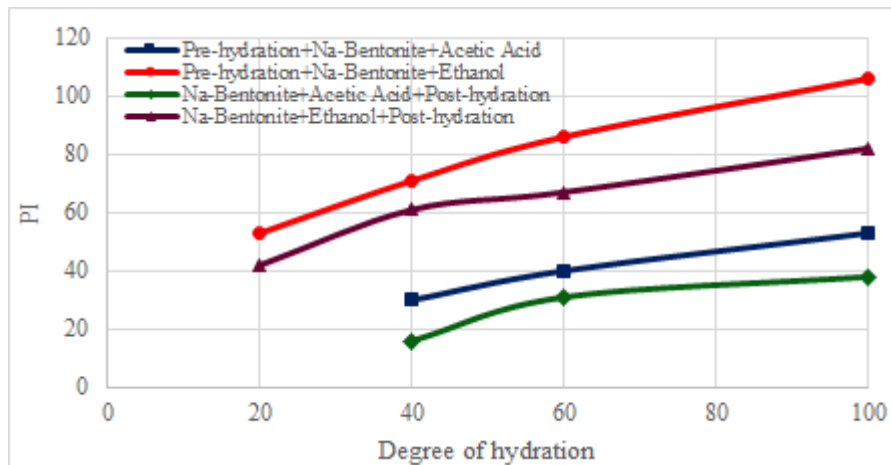
این موضوع به معنی حفظ بهتر ساختار اولیه خاک در فرایند اندرکنش با آلایندگی آلایندگی برای نمونه‌های با درجه پیش هیدراتاسیون بزرگ‌تر است. به نظر می‌رسد با افزایش درجه‌ی هیدراتاسیون و قرارگیری بیش‌تر مولکول‌های آب در اطراف پولک رسی، نمونه قرار گرفته در معرض آلایندگی آلایندگی کاهش کم‌تری در ثابت دی‌الکتریک داشته است. به بیان دیگر سیال آلایندگی در لحظه تماس با پولک‌های رسی در اثر اختلاط با مولکول‌های آب پیش هیدراته کننده پولک رسی، با افزایش ثابت دی‌الکتریک مواجه شده است. این افزایش در ثابت دی‌الکتریک مخلوط آب و اتانول در مقایسه با ثابت دی‌الکتریک اتانول، باعث ممانعت از کاهش قابل توجه در ضخامت لایه دوگانه خاک شده است (۱۰، ۱۲). همین موضوع سبب شده است که نمونه‌های با درصد پیش هیدراتاسیونی بیش‌تر، در مقایسه با نمونه‌های با درصد پیش هیدراتاسیونی کم‌تر، حد روانی بزرگ‌تری را نشان داده‌اند.

قرار گرفته در معرض اتانول نشان داده‌است. حداکثر میزان اختلاف در حد روانی بین نمونه‌های پیش هیدراته شده‌ی سدیم-بنتونیت حاوی اتانول و نمونه سدیم-بنتونیت حاوی اسید استیک برابر با ۴۷ درصد با درجه هیدراتاسیون ۱۰۰ درصد بوده‌است. همچنین حداکثر میزان اختلاف در حد روانی بین نمونه‌های پس هیدراته شده‌ی سدیم-بنتونیت حاوی اتانول و سدیم-بنتونیت حاوی اسید استیک برابر با ۳۷ درصد است. همچنین، شیب نمودار حد روانی سدیم-بنتونیت پیش هیدراته شده‌ی حاوی اتانول به میزان ۴۳ درصد بیش‌تر از شیب نمودار نمونه‌ی سدیم-بنتونیت پیش هیدراته شده‌ی حاوی اسید استیک بوده‌است.

این در حالی است که شیب نمودار حد روانی سدیم-بنتونیت پس هیدراته شده‌ی حاوی اتانول به میزان ۱۶ درصد بیش‌تر از شیب نمودار نمونه‌ی سدیم-بنتونیت پیش هیدراته شده‌ی حاوی اسید استیک بوده است که حاکی از اهمیت پیش هیدراته شدن در فرایند اندرکنش خاک-آلاینده آلی است.

روانی آن‌ها شده‌است. بنابراین نمونه‌های پیش هیدراته شده که نسبت به نمونه‌های پس هیدراته شده در معرض الکترولیت حاوی ثابت دی‌الکتریک بزرگ‌تری قرار گرفته‌اند، حد روانی بزرگ‌تری نسبت به این نمونه‌ها نشان داده‌اند. انجام آزمایش بر روی مقادیر با درجه هیدراتاسیون کم‌تر از ۴۰ درصد امکان‌پذیر نبود. این امر به علت کم بودن ثابت دی‌الکتریک سیال منفذی اتفاق افتاد.

نتایج حاکی از آن است که مقادیر حد روانی برای نمونه سدیم-بنتونیت در شرایط متفاوت هیدراتاسیونی و قرار گرفته در معرض نسبت ۱:۱ اتانول نسبت به وزن خاک، دارای مقادیر بزرگ‌تری نسبت به حد روانی نمونه‌ی با شرایط مشابه هیدراتاسیونی و قرار گرفته در معرض نسبت ۱:۱ اسید استیک بوده‌است. علت این تفاوت رفتار را می‌توان به کوچک‌تر بودن ثابت دی‌الکتریک اسید استیک نسبت به اتانول نسبت داد. در نتیجه نمونه سدیم-بنتونیت قرار گرفته در معرض اسید استیک، ضخامت لایه دوگانه کم‌تری نسبت به نمونه سدیم-بنتونیت



شکل ۲- نمودار شاخص خمیری نمونه‌های پیش هیدراته شده و پس هیدراته شده‌ی سدیم-بنتونیت قرار گرفته در معرض دو آلاینده‌ی آلی متفاوت (اتانول و اسید استیک)

Figure 2. Plasticity Index graph for pre-hydration and post-hydration Na-Bentonite samples exposed to two different organic contaminants (Ethanol and Acetic acid)

مشاهده می‌شود بر اساس نتایج ارایه شده در شکل فوق، نمونه‌های با درصد پیش هیدراتاسیون بیش‌تر، در اندرکنش با آلاینده آلی، کاهش کم‌تری در شاخص خمیری نشان

میزان تغییرات شاخص خمیری سدیم-بنتونیت با تغییر درجه‌ی هیدراتاسیون و قرار گرفته در معرض ۱:۱ وزنی اتانول نسبت به خاک در شکل (۲) نشان داده شده‌است. همان‌گونه که

این نتیجه حاصل می‌شود که حد خمیری نمونه‌های قرار گرفته در معرض آلاینده آلی نیز با افزایش درجه‌ی هیدراتاسیون افزایش یافته است.

براساس نتایج ارائه شده در شکل فوق مشاهده می‌شود که شاخص خمیری برای خاک-سدیم-بنتونیت در شرایط متفاوت هیدراتاسیونی قرار گرفته در معرض ۱:۱ اتانول نسبت به وزن خاک، دارای مقادیر بزرگ‌تری نسبت به نمونه‌ی با شرایط مشابه هیدراتاسیونی و قرار گرفته در معرض ۱:۱ اسید استیک نسبت به وزن خاک، بوده است. این موضوع نیز ناشی از کوچک‌تر بودن ثابت دی‌الکتریک اسید استیک نسبت به ثابت دی‌الکتریک اتانول است. حداکثر میزان اختلاف در شاخص خمیری بین نمونه‌های پیش هیدراته شده‌ی سدیم-بنتونیت حاوی اتانول و سدیم-بنتونیت حاوی اسید استیک برابر با ۵۳ درصد در حالت درجه هیدراتاسیون ۱۰۰ درصد بوده است. همچنین حداکثر میزان اختلاف در شاخص خمیری بین نمونه‌های پس هیدراته شده‌ی سدیم-بنتونیت حاوی اتانول و سدیم-بنتونیت حاوی اسید استیک برابر با ۴۵ درصد بوده است.

مقادیر شاخص خمیری برای نمونه سدیم-بنتونیت حاوی اتانول در درجه‌ی هیدراتاسیونی کم‌تری نسبت به اسید استیک غیرقابل انجام شده است. این موضوع را می‌توان به کوچک‌تر بودن ثابت دی‌الکتریک اسید استیک و کاهش بیش‌تر ضخامت لایه دوگانه نمونه سدیم-مونت‌موریلونیت قرار گرفته در معرض اسید استیک در غلظت‌های یکسان از دو آلاینده آلی نسبت داد (معادله ۱).

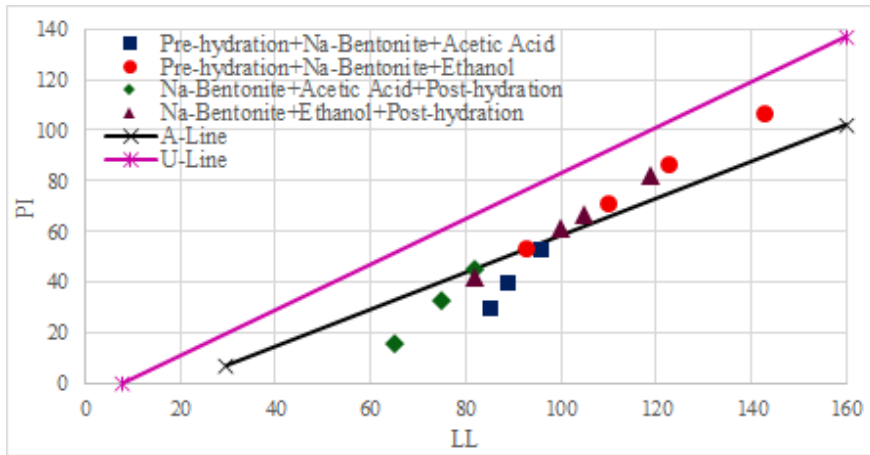
داده‌اند. به بیان دیگر، شاخص خمیری نمونه‌های با درصد پیش هیدراتاسیون بیش‌تر، بزرگ‌تر از شاخص خمیری نمونه‌های سدیم-بنتونیت با درصد پیش هیدراتاسیون کم‌تر بوده است.

به عنوان مثال، شاخص خمیری نمونه پیش هیدراته شده با ۱۰۰ درصد رطوبت وزنی، تقریباً دو برابر شاخص خمیری نمونه سدیم-بنتونیت با ۲۰ درصد رطوبت وزنی است. کاهش درصد رطوبت در حالت پس هیدراته شدن نیز سبب کاهش بیش‌تر در شاخص خمیری نمونه سدیم-بنتونیت شده است.

همچنین در شکل (۲) تغییرات شاخص خمیری با تغییر درجه‌ی هیدراتاسیون برای نمونه‌ی سدیم-بنتونیت قرار گرفته در معرض ۱:۱ وزنی اتانول نسبت به خاک نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در شکل (۲) نشان می‌دهد که با افزایش درجه هیدراتاسیون اولیه، کاهش کم‌تری در شاخص خمیری خاک نسبت به نمونه‌های پس هیدراته شده مشاهده می‌شود. به بیان دیگر، نمونه‌های سدیم-بنتونیت پیش هیدراته شده در مقایسه با نمونه‌های سدیم-بنتونیت پس هیدراته شده، شاخص خمیری بزرگ‌تری داشته‌اند.

به طوری‌که به عنوان مثال، در نمونه‌های سدیم-بنتونیت دارای هیدراتاسیون اولیه ۴۰ درصد و ۱۰۰ درصد، حدود ۲۳ درصد تفاوت در شاخص خمیری مشاهده می‌شود. این تفاوت در نمونه‌های سدیم-بنتونیت پس هیدراته شده در شرایط پس هیدراتاسیون ۴۰ و ۱۰۰ درصد، حدود ۲۲ درصد بوده است. با مقایسه‌ی مقادیر شاخص خمیری و مقادیر حد روانی



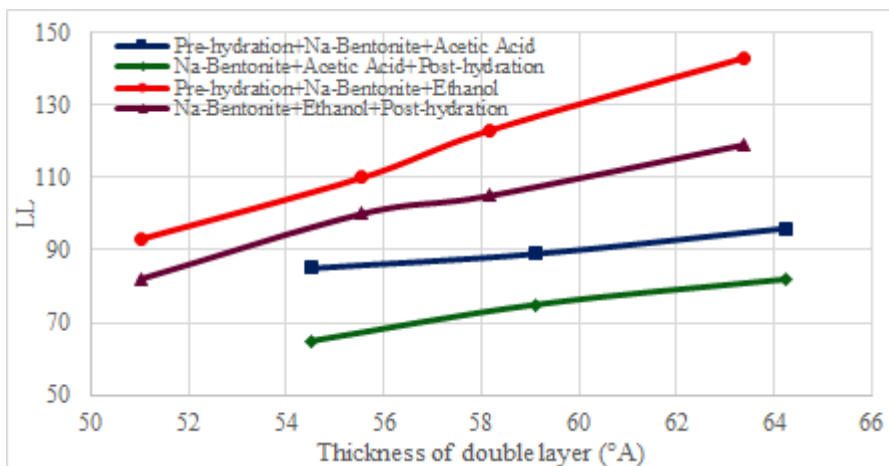


شکل ۳- موقعیت قرار گیری نقطه نظیر مشخصات خمیری نمونه‌های سدیم-بنتونیت تحت شرایط مختلف هیدراتاسیونی در معرض دو نوع آلاینده‌ی متفاوت (اتانول و اسید استیک)

Figure 3. Location of corresponding points for plasticity properties of sodium-bentonite soil samples exposed to two different organic contaminants (Ethanol and Ascetic acid) under different hydration conditions

حفظ کند. به طوری که به علت کوچک‌تر بودن ثابت دی‌الکتریک اسید استیک و کاهش شاخص خمیری نمونه سدیم-بنتونیت حاوی اسید استیک، نقطه نظیر آن در نمودار خمیری کاساگرانده از ناحیه CH به ناحیه MH انتقال یافته است. این موضوع به معنی تغییر قابل توجه در رفتار نمونه سدیم-بنتونیت پس از قرارگیری در معرض آلاینده آلی اسید استیک است.

با توجه به نمودار خمیری ارایه شده در شکل (۳) می‌توان نتیجه‌گیری نمود که شرایط هیدراتاسیون اولیه موجب حفظ رفتار نمونه‌ی سدیم-بنتونیت قرار گرفته در معرض اتانول شده است. به طوری که نمونه‌های سدیم-بنتونیت قرار گرفته در معرض اتانول در غلظت‌های مورد مطالعه، همچنان به عنوان خاک CH طبقه بندی شده‌اند. از سوی دیگر، شرایط هیدراتاسیون اولیه در مورد خاک سدیم-بنتونیت قرار گرفته در معرض اسید استیک نتوانسته است رفتار اولیه خاک را



شکل ۴- نمودار ضخامت لایه دوگانه در مقابل حد روانی سدیم-بنتونیت دارای شرایط مختلف هیدراتاسیونی در معرض دو نوع آلاینده‌ی متفاوت (اتانول و اسید استیک)

Figure 4. Graph of diffuse double layer thickness against liquid limit of sodium-bentonite soil samples exposed to two different organic contaminants (Ethanol and Ascetic acid) under different hydration conditions

۳. انجام آزمایش حدود اتربرگ در مورد نمونه‌های حاوی اسید استیک در درجه هیدراتاسیونی کم‌تر از ۴۰ درصد و نیز نمونه‌های حاوی اتانول با درجه هیدراتاسیونی کم‌تر از ۲۰ درصد امکان‌پذیر نشده‌است و شرایط هیدراتاسیون اولیه در این مورد نتوانسته است تأثیر بسزایی در حفظ ساختار اولیه خاک داشته باشد. این امر به علت کاهش شدید ثابت دی‌الکتریک رخ داده است.

۴. با مقایسه‌ی اختلاف حداکثر، بین مقادیر LL و PL نمونه‌های سدیم-بنتونیت قرار گرفته در معرض آلاینده آلی در شرایط مختلف هیدراتاسیونی، می‌توان اثر مطلوب و کارآمد شرایط هیدراتاسیون اولیه به خصوص در درجه‌های هیدراتاسیون زیاد را در حفظ ساختار اولیه خاک مشاهده نمود.

۵. آستانه‌ی تغییر طبقه‌بندی سدیم-بنتونیت از CH به MH و در نتیجه تغییر ساختار قابل توجه خاک در حد روانی حدود ۱۰۰ درصد و شاخص خمیری برابر ۶۰ درصد بوده‌است.

۶. اگر میزان ضخامت لایه دوگانه تنها عامل توجیه رفتار خاک رس در اندرکنش آلاینده آلی-خاک رس باشد انتظار می‌رود که در یک مقدار ضخامت یکسان لایه‌ی دوگانه، رفتار خاک مشابه بوده و مقادیر LL یکسانی حاصل شده باشد در صورتی که با دقت در نمودارهای شاخص خمیری، تفاوت رفتارهای شدید خواه در تغییر شرایط هیدراتاسیونی با ثابت بودن نوع آلاینده و یا در تغییر نوع آلاینده با ثابت بودن شرایط هیدراتاسیونی قابل مشاهده است.

### سپاسگزاری

مؤلفین این مقاله بر خود لازم می‌دانند تا از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه تهران به منظور تهیه‌ی وسایل آزمایشگاهی این تحقیق تشکر نمایند.

در شکل (۴) تغییرات ضخامت لایه دوگانه نمونه‌های مورد مطالعه در مقابل تغییرات حد روانی آن‌ها نشان داده شده‌است. همان‌گونه که انتظار می‌رود با افزایش ضخامت لایه دوگانه، حد روانی افزایش یافته‌است. برای یک ضخامت لایه دوگانه‌ی یکسان، حداکثر میزان تفاوت حد روانی در مورد نمونه‌های پیش هیدراته و پس هیدراته سدیم-بنتونیت قرار گرفته در معرض اتانول برابر ۲۴ درصد و برای نمونه‌های قرار گرفته در معرض اسید استیک برابر ۲۰ درصد بوده‌است.

این تفاوت ناشی از اثر شرایط هیدراتاسیون اولیه است. از سوی دیگر، در یک ضخامت لایه دوگانه یکسان برای شرایط هیدراتاسیون اولیه مشابه، حداکثر میزان تفاوت حد روانی بین سدیم-بنتونیت حاوی اتانول و سدیم-بنتونیت حاوی اسید استیک حدود ۴۸ درصد بوده‌است. همچنین در یک ضخامت لایه دوگانه یکسان برای شرایط پس هیدراته شده، حداکثر میزان تفاوت حد روانی بین سدیم-بنتونیت حاوی اتانول و سدیم-بنتونیت حاوی اسید استیک حدود ۳۹ درصد بوده‌است. این تفاوت می‌تواند ناشی از تفاوت در اندازه مولکول اتانول و اسید استیک و همچنین حل شدن بخشی از کانی‌های رسی در اثر حضور اسید استیک باشد.

### نتیجه‌گیری

۱. به طور کلی شرایط هیدراتاسیون اولیه توانسته است منجر به حفظ هرچه بیش‌تر ساختار سدیم-بنتونیت قرار گرفته در معرض آلاینده آلی شود. این حفظ ساختار اولیه برای نمونه قرار گرفته در معرض اتانول بیش‌تر از نمونه سدیم-بنتونیت قرار گرفته در معرض اسید استیک بوده‌است.

۲. در شرایط هیدراتاسیونی یکسان و تنها با تغییر در نوع آلاینده‌ی آلی از اتانول به اسید استیک، میزان حد روانی تغییرات چشم‌گیری داشته‌است. حداکثر این تغییرات مربوط به درجه هیدراتاسیون ۱۰۰ درصد در مورد نمونه‌های پیش هیدراته شده‌ی اسید استیک و اتانول با اختلاف ۴۷ درصد است.

- characterizations. *Can. Geotech. J.*, Vol. 43, pp. 587–600.
9. Xue, Q., Zhang, Q., Liu, L., 2012. Impact of high concentration solutions on hydraulic properties of geosynthetic clay liner materials. *Materials*, Vol. 5, pp. 2326–2341.
  10. Li, J.S., Xue, Q., Wang, P., Liu, L., 2013. Influence of leachate pollution on mechanical properties of compacted clay: a case study on behaviors and mechanisms. *Eng. Geol.*, Vol. 167, pp. 128–133.
  11. Li, Z., Katsumi, T., Inui, T., Takai, A., 2013. Fabric effect on hydraulic conductivity of kaolin under different chemical and biochemical conditions. *Soils Found*, Vol. 53, pp. 680–691.
  12. Sridharan, A., El-Shafei, A., Miura, N., 2000. A study on the dominating mechanisms and parameters influencing the physical properties of Ariake clay. *International Association of Lowland Technology Journal*, Vol. 2, pp. 55–70.
  13. Olgun, M., and Yıldız, M., 2010. Effect of organic fluids on the geotechnical behavior of a highly plastic clayey soil. Vol, 48, pp. 615–621.
  14. Yong, R.N., Warkentin, P.B., 1966. *Introduction to soil behavior*. Mc Millan Co., London, p. 451.
  15. Liu, Y., Gates, W.P., Bouazza, A., 2013. Acid induced degradation of the bentonite component used in geosynthetic clay Liners. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 36, pp. 71–80.
  16. Spagnoli, G., Stanjek, H., and Sridharan, A., 2012. Influence of ethanol/water mixture on the undrained shear strength of pure clays.

## Reference

1. Ouhadi, V.R., Goodarzi, A.R., 2007. Factors impacting the electro conductivity variations of clayey soils. *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B: Engineering*, Vol. 31, pp. 109-121.
2. Mitchell, J. K., 1960. *The application of colloidal theory to the compressibility of clays*. Commonwealth Science and Industry Research Organization, Melbourne, Australia, Vol. 2, pp. 92-97.
3. Ouhadi, V.R., Amiri, M., Goodarzi, A.R., 2012. The Special Potential of Nano-Clays for Heavy Metal Contaminant Retention in Geo-Environmental Projects, *Journal of Civil and Surveying Engineering*, Vol: 45, Issue: 6, pp. 631-642.
4. Sridharan, A., Rao, G.V., 1975. Mechanisms controlling the liquid limit of clays. *Prof. Int. Conference on SMQFE, Istanbul*, Vol. 1, pp. 65–74.
5. Ouhadi, V.R., Amiri, M., 2009. Interaction of Nano-Clays and Cu Contaminant in Geo-Environmental Projects. 6th Conf. Engineering Geology, Tarbiat Modares University, Tehran.
6. Yanful, E.K., Shikatani, K.S., Quirt, D.H., 1995. Hydraulic conductivity of natural soils permeated with acid mine drainage. *Can. Geotech. J.*, Vol. 32, pp. 624–646.
7. Di Maio, C., 1996. Exposure of bentonite to the salt solution: osmotic and mechanical effects. *Geotechnique*, Vol. 46, pp. 695–707.
8. Wang, Y.H., Siu, W.K., 2006. Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. I. Surface charges and structural

21. Ouhadi, V.R., Amiri, M., 2014. Interaction of Nano-Clays and Cu Contaminant in Geo-Environmental Projects. *Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 16 (160), 75-87
22. Ouhadi, V.R., Amiri, M., 2011. Geo-environmental Behaviour of Nanoclays in Interaction with Heavy Metals Contaminant, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, Vol. 42, Issue 3, pp 29-36.
23. Moavenian, M.H., Yasrobi, SH. S., 2008. Volume change behavior of compacted clay due to organic liquids as permeant. *Applied Clay Science*, Vol. 39, pp. 60-71.
- Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 71, pp. 389-398.
17. Mitchell, J.K., Soga, K., 2005. *Fundamentals of soil behaviour*. 3th edition, John Wiley and Sons, p. 529.
18. Puma, S., Dominijanni, A., Manassero, M., Zaninetta, L., 2015. The role of physical pretreatments on the hydraulic conductivity of natural sodium bentonites. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 43, pp. 263-271.
19. ASTM, April 1999. *ASTM Standards and Other Specifications and Test Methods on the Quality Assurance of Landfill Liner Systems*. ASTM, 1916 Race Street, Philadelphia, PA.
20. Hendershot W.H., Duquette M., 1986. A simple barium chloride method for determining cation exchange capacity and exchangeable cations, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 50, pp. 605-608.