



تأثیر هیدراسیون اولیه بنتونیت در فرایند اندرکنش آن با آلاینده آلی با استفاده از نتایج آزمایش رسوب

وحیدرضا اوحدی^۱، کامبیز بهنیا^۲، زینب آقایی^۳

۱- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا؛ استاد مدعو دانشکده عمران، دانشگاه تهران
(vahidouhadi@yahoo.ca)

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
(cbehnia@ut.ac.ir)

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-ژئوتکنیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
(z.aghaei@ut.ac.ir)

چکیده

بنتونیت خاکی با خاصیت خمیری زیاد و نفوذپذیری کم است. به این دلیل، از آن در آستر مراکز دفن مهندسی زباله، پوشش مخازن ذخیره فاضلاب، و احداث دیواره آب‌بند سدها استفاده می‌شود. از سوی دیگر آلاینده‌های آلی در شیرابه‌های مراکز دفن زباله و پساب پالایشگاه‌ها وجود دارند که نفوذ آن‌ها به بستر محافظ بنتونیتی به آسانی امکان‌پذیر است. در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های افزایش قابلیت نگهداری آلاینده توسط خاک، مورد توجه محققین بوده است. در بسیاری از پروژه‌های ذکر شده امکان اندرکنش آلاینده آلی و خاک رسی وجود دارد. از سوی دیگر، در شرایط اجرائی، وقوع پیش هیدراته شدن و یا پس هیدراته شدن خاک قبل و بعد از اندرکنش با آلاینده آلی ممکن است. با این وجود در خصوص مطالعه تأثیر هیدراسیون اولیه خاک بر فرایند اندرکنش خاک-آلاینده‌های آلی تحقیقات محدودی انجام شده است. بر این اساس، هدف این مقاله مطالعه تأثیر شرایط هیدراسیون اولیه بر قابلیت نگهداری آلاینده آلی توسط بنتونیت و فرایند اندرکنش بنتونیت-آلاینده آلی است. در تحقیق حاضر اثر چند سیال آلی شامل متانول، اتانول، اسید استیک، و دایوکسان بر رفتار ژئوتکنیک زیست‌محیطی خاک رس سدید-بنتونیت تحت آزمایش رسوب، در دو شرایط عمل‌آوری پیش هیدراته و پس هیدراته مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد شرایط هیدراسیونی پیش هیدراته، موجب بهبود رفتار ژئوتکنیک زیست‌محیطی خاک رس سدید-بنتونیت شده است. به طور مشخص در آزمایش رسوب، با کاهش میزان ثابت دی‌الکتریک سیال آلی، میزان رسوب سوسپانسیون بنتونیت افزایش و زمان رسوب کاهش یافته است. نتایج این تحقیق در طراحی مراکز دفن زباله صنعتی و کاهش نشت در پالایشگاه‌ها اهمیت ویژه و کاربردی دارد.

واژگان کلیدی: سدید-بنتونیت، آلاینده آلی، شرایط هیدراسیون متفاوت، آزمایش رسوب، ثابت دی‌الکتریک

مقدمه

بخش قابل توجهی از خاک‌های رسوبی در اثر فرایند رسوب کانی‌های خاک-سوسپانسیون در طبیعت تشکیل شده‌اند. ترسیب فرآیندی فیزیکی-شیمیایی است که به‌موجب آن خاک رس از رسوب سوسپانسیون حاوی کانی‌های رسی تشکیل می‌شود (Sridharan and Prakash, ۲۰۰۱). از این جهت ویژگی رسوب خاک اهمیت زیادی برای مهندسین ژئوتکنیک دارد به طوری که خواص تهنشینی در طول رسوب کانی‌های خاک، ناشی از ترکیبات خاک-سوسپانسیون است (Kaya, ۲۰۰۶). به این جهت انجام آزمایش رسوب به منظور بررسی خصوصیات خاک توسط محققین مختلف توصیه شده است (Yong et al., ۱۹۹۲; Kaya, ۲۰۰۶).

تغییر ویژگی‌ها و خواص سیال نفوذی در خاک، تأثیر بسزایی بر رفتار مهندسی خاک‌های رسی دارد. این تأثیرات تابعی از خواص سیال نافذ و کانی‌شناسی خاک است (Ouhadi and Goodarzi, ۲۰۰۷). آلاینده‌های آلی یا از طریق جذب شیمیایی یا با نفوذ در حفرات خاک و اختلاط با سیال حفره‌ای باعث تغییرات در خواص مهندسی و ژئوتکنیکی خاک می‌شوند. به‌طور کلی تغییر در سیال حفره‌ای اثرات مهمی بر رفتار ژئوتکنیکی رس‌ها نشان می‌دهد (Olgun and Yildiz, ۲۰۱۰).

محققین مختلفی اثر تغییرات شیمی سیال حفره‌ای را بر رفتار هیدرومکانیک خاک بررسی کرده‌اند. اغلب مطالعات بر روی کائولینیت و بنتونیت انجام شده است و به‌طور کلی به تحلیل نفوذپذیری پرداخته‌اند. مایکلز و لین (Michaels and Lin, ۱۹۵۴) اولین بررسی‌ها را در این



زمینه انجام دادند. مصری و اولسون (Mesri and Olson, ۱۹۷۱) و برون و اندرسون (Brown and Anderson, ۱۹۸۳) این مطالعات را ادامه دادند. مطالعه‌ای در خصوص اثر سیال حفره‌ای در رسوب خاک حاوی دوغاب با نمک‌های کلسیم کلرید، آلومینیم کلرید و برخی از مایعات آلی توسط کایا (Kaya, ۲۰۰۶) انجام شد. نتایج حاکی از آن بود که رفتار رسوب و حجم نهایی به ظرفیت و غلظت یون نمک، مقدار pH و دی‌الکتریک سیال حفره‌ای بستگی دارد. در تحقیق فوق برای توصیف مکانیزم اندرکنش، با استفاده از پارامترهایی مانند پتانسیل زتا و ثابت دی‌الکتریک، بر اساس تئوری لایه دوگانه رابطه‌ای ارائه شده است.

محققین دیگری نظیر (Kaya and Fang, ۲۰۰۰)، (Sridharan et al., ۲۰۰۲)، (Di Maio et al., ۲۰۰۴)، (Gajo and Maines ۲۰۰۷) و (Yukselen-Aksoy et al., ۲۰۰۸) بر اساس نظریه لایه دوگانه تأثیر عواملی مانند ظرفیت کاتیون، غلظت یون، pH سیال منفذی و کانی رسی را در اندرکنش خاک-آلاینده، مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند؛ که بر این اساس پیشنهاد کردند اثر شیمی سیال حفره‌ای را زمانی که حد روانی کمتر از ۱۱۰ درصد است می‌توان نادیده گرفت.

از مشخصه‌های رفتاری خاک در اندرکنش با آلاینده، تغییر در ساختار و بافت ذرات آن است. بر اساس برخی از تحقیقات رفتار رسوبی مونت موریلونیت وابسته به ضخامت لایه دوگانه آن اما رفتار رسوبی کائولینیت بسته به بافت خاک است (Sridharan and Prakash, ۲۰۰۱). خواص فیزیکی-شیمیایی سیال حفره‌ای مانند قدرت یونی و pH تا حد زیادی می‌تواند ریزساختار خاک رسی را تحت تأثیر قرار دهد که خود موجب تغییر رفتار رسوب خاک می‌شود (Zhao and Bate, ۲۰۱۳).

نتایج آزمایش‌های رسوب که بر روی چند نمونه خاک رسی با سیال حفره‌ای متفاوت حاوی استون، M-زایلن، متیلن کلراید، تری کلرواتیلن و تولوئن انجام شده است، نشان داد که تمایل به لخته شدن در این نمونه‌ها از آب مقطر بیشتر است و برای مخلوط استون و M-زایلن، حداکثر لخته شدن در غلظت ۴۰٪ رخ داده است (Edil et al., ۱۹۹۱). بر اساس نتایج تحقیقات معاونیان و یثربی (Moavenian and Yasrebi, ۲۰۰۸) نشان داده شد که در سوسپانسیون خاک-آلاینده، شکل‌پذیری خاک و زمان ته‌نشینی ذرات آن هنگامی که در معرض سیال آلی قرار دارد، کاهش می‌یابد.

پدیده هیدراسیون اولیه در مورد رفتار ژئوسنتتیک‌ها به‌طور ویژه مورد بررسی محققین قرار گرفته است. نتایج تجربی نشان داده است که فرایند هیدراسیون اولیه، همانند شرایط پیش تحکیم و حذف نمک، به‌طور قابل توجهی می‌تواند پاسخ بنتونیت به پدیده تبادل کاتیونی و همچنین رفتار تورمی آن را تحت تأثیر قرار دهد (Puma et al., ۲۰۱۵). از سوی دیگر محققین نشان داده‌اند که وقتی سیال منفذی با سیال آلی جایگزین می‌شود خواص خاک‌های ریزدانه به‌طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند.

در مجموع باوجود آن‌که تحقیقات وسیعی در زمینه مطالعه اثر آلاینده آلی بر خصوصیات مهندسی خاک انجام شده است، در خصوص رفتار خاک ناشی از تغییر در ثابت دی‌الکتریک سیال آلی و شرایط هیدراسیونی متفاوت که می‌تواند ناشی از تر و خشک شدن خاک به علت بارش و یا نفوذ آب به خاک به روش‌های دیگر صورت گیرد، مطالعات بسیار محدودی صورت گرفته است. بر این اساس هدف اصلی این تحقیق تعیین تأثیر شرایط هیدراسیون اولیه در فرایند اندرکنش بنتونیت و آلاینده آلی است. برای دستیابی به این هدف نمونه‌های رسی سدیم-بنتونیت در معرض آلاینده‌های آلی دارای ثابت دی‌الکتریک متفاوت و با شرایط هیدراسیونی اولیه مختلف تحت آزمایش رسوب قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق به منظور مطالعه اثر هیدراسیون 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 در (جدول ۱) ارائه شده است. لازم به یادآوری است که تعیین مقادیر ارائه شده در (جدول ۱) با استناد به استاندارد (ASTM, ۱۹۹۹) انجام شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی سدیم-بنتونیت مورد استفاده

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 زیست محیطی نمونه‌ها (جدول ۲)، CEC خاک با استفاده از باریم کلراید (Handershot and Duquette, ۱۹۸۶) سطح مخصوص با استفاده از محلول EGME (Eltantawy and Arnold, ۱۹۷۳) و درصد کرنات خاک به روش تیتراسیون (Hesse, ۱۹۷۲) اندازه‌گیری شد.

جدول ۲- ویژگی‌های ژئوتکنیک زیست محیطی سدیم-بنتونیت مورد استفاده

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

مواد آلی استفاده شده برای مطالعه اندرکنش با بنتونیت به نحوی انتخاب شدند که دامنه وسیعی از ثابت‌های دی‌الکتریک و اندازه مولکولی مورد پوشش قرار گیرد. بر این اساس در این تحقیق از اتانول، متانول، اسید استیک و دایوکسان به عنوان آلاینده‌های آلی استفاده شده است. 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

وزن مولکولی (g/mol)	لزجت (mPa s)	وزن مخصوص (g/cm ^۳)	ثابت دی‌الکتریک	نام ماده
۱۸/۰۲	۱/۰۰۲	۰/۹۹۸	۷۹/۹۹	آب مقطر
۳۲/۰۴	۰/۵۹۷	۰/۷۹۷۱	۳۳/۱	متانول
۴۶/۰۷	۱/۲	۰/۷۹	۲۵/۰۲	اتانول
۶۰/۰۵	۱/۲۲	۱/۰۵	۶/۱۵	اسید استیک
۸۸/۱۱	۱/۳۷	۱/۰۳۴	۲/۲۵	دایوکسان

برای ساخت نمونه‌ها دو حالت هیدراسیونی پیش هیدراته شده و پس هیدراته شده برای هر آلاینده در نظر گرفته شده است. در شرایط پیش هیدراته ابتدا ۱۲۵ سی‌سی آب مقطر به نمونه ۲۰ گرمی از خاک مورد آزمایش اضافه نموده و به منظور به تعادل رسیدن سوسپانسیون، 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 سوسپانسیون، ۱۲۵ سی‌سی آلاینده به نمونه افزوده شد و فرآیند حصول تعادل برای سوسپانسیون حاضر صورت گرفت. برای نمونه در شرایط

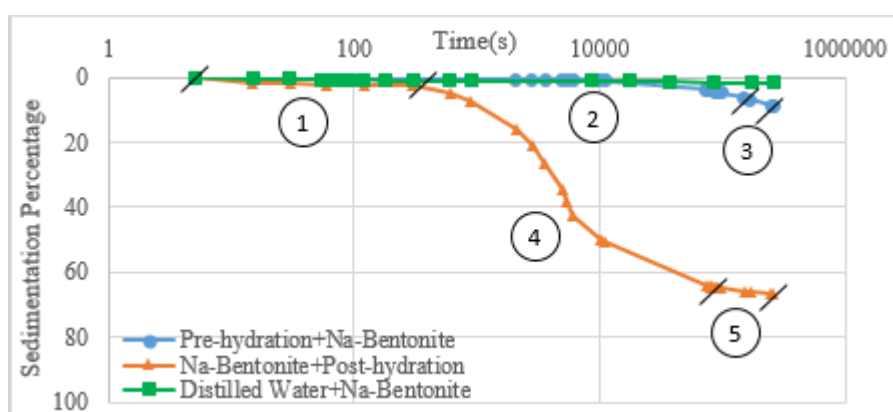


پس هیدراته ابتدا ۱۲۵ سی‌سی آلاینده به نمونه ۲۰ گرمی از خاک اضافه شد و پس از به تعادل رسیدن سوسپانسیون موجود و افزودن ۱۲۵ سی‌سی آب مقطر به آن، نمونه به حالت تعادل رسیده است. در ضمن یک نمونه شاهد نیز آماده شد، بدین صورت که به ۲۰ گرم از نمونه خاک ۲۵۰ سی‌سی آب افزوده شد و پس از آن، سوسپانسیون به حالت تعادل رسیده است.

روش انجام آزمایش رسوب به این صورت بوده است که نمونه‌های تهیه شده به روش ذکر شده را در استوانه‌های مدرج ۲۵۰ سی‌سی ریخته و پس از مخلوط کردن نمونه، رسوب‌گذاری هر سوسپانسیون در مدت ۷۲ ساعت و برای فواصل زمانی مختلف با قرائت ارتفاع نشست نمونه در استوانه مدرج صورت گرفته است.

بحث و بررسی نتایج

شکل (۱) نتایج آزمایش رسوب نمونه سدیم-بنتونیت که در معرض متانول با درصد وزنی تقریبی ۱:۵ (۵ واحد وزنی متانول به ۱ واحد وزنی خاک) قرار گرفته است را در شرایط هیدراسیونی مختلف در مقایسه با نمونه شاهد نشان می‌دهد.



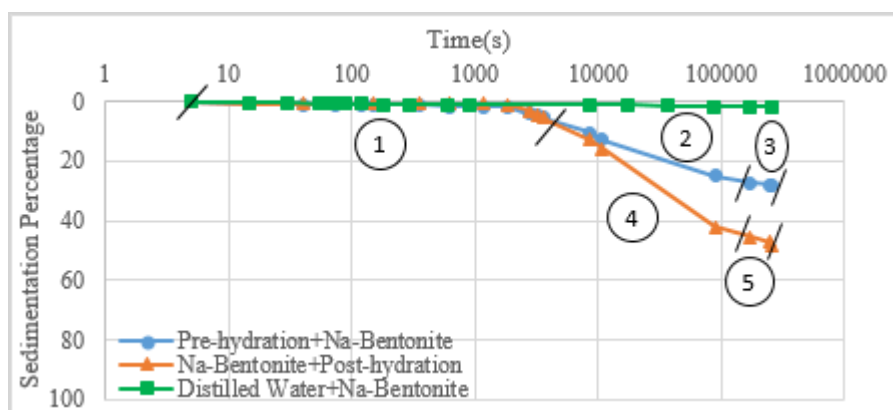
شکل ۱. نمودار رسوب خاک سدیم-بنتونیت قرارگرفته در معرض ۱:۵ وزنی متانول

بر اساس نتایج شکل (۱) نمودار نمونه پیش هیدراته شده با سرعت بسیار کندتری نسبت به نمونه پس هیدراته شده رسوب کرده است و رفتار بسیار مشابهی با نمونه شاهد دارد. به نظر می‌رسد که ثابت دی‌الکتریک سیال حفره‌ای در نمونه پیش هیدراته شده بر رفتار رسوب پذیری بنتونیت تأثیر کمی داشته است. در واقع در این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های پس-هیدراته، مولکول‌های آلاینده آلی به میزان کمتری جایگزین مولکول‌های آب اطراف پولک‌های رسی شده‌اند. در شکل (۱)، نمودارها به پنج ناحیه تقسیم شده‌است. در ناحیه (۱) تا زمان ۳۰۰ ثانیه هر سه نمودار تفاوت بسیار کمی باهم دارند. در این مقاله به منظور بررسی اندرکنش خاک و آلاینده آلی، تا زمان ۱۰۰۰۰ ثانیه به عنوان رفتار کوتاه‌مدت در نظر گرفته شده‌است. بر اساس نتایج شکل فوق، رفتار رسوب نمونه پیش هیدراته شده و نمونه شاهد در زمان کوتاه‌مدت کاملاً بر هم منطبق است. برای نمونه پیش هیدراته شده رسوب بسیار اندکی در کوتاه‌مدت صورت گرفته است در حالی که برای نمونه پس هیدراته شده تا زمان ۱۰۰۰۰ ثانیه حدود ۵۰ درصد رسوب مشاهده می‌شود. در ناحیه (۲) که بازه آن از ۳۰۰ ثانیه تا ۲۵۰۳۲۰ ثانیه در نظر گرفته شده است تغییرات رسوب نمونه پیش هیدراته شده دارای شیب نزولی بوده و در ناحیه (۳) که از ۲۵۰۳۲۰ ثانیه به بعد بوده‌است شیب ملایمی در منحنی رسوب مشاهده می‌شود. میزان رسوب نهایی این نمونه حدود ۱۰ درصد بوده‌است. از سوی دیگر در نمونه پس هیدراته، رفتار نمونه رسوبی نمونه از ۳۰۰ ثانیه تا ۲۵۰۳۲۰ ثانیه ناحیه (۴) به صورت نزولی و از ۲۵۰۳۲۰ ثانیه به بعد در ناحیه (۵) با شیب نزدیک به صفر ادامه یافته است. در ناحیه (۲) شیب نمودار نمونه پیش هیدراته شده از ناحیه (۴) که مربوط به نمونه پس هیدراته شده است بسیار کمتر است. در مجموع، نتایج ارائه شده در شکل (۱) نشان می‌دهد که میزان تغییرات رسوب خاک در حالت پس هیدراته شده بسیار بیشتر از نمونه‌های دیگر بوده‌است. به طوری که میزان رسوب

نهایی این نمونه حدود ۷ برابر میزان رسوب نهایی نمونه پیش هیدراته بوده است. در این راستا، میزان اختلاف رسوب نهایی نمونه پیش هیدراته شده و نمونه شاهد برابر ۷/۲ درصد، میزان اختلاف رسوب نهایی نمونه پس هیدراته شده و نمونه شاهد برابر ۶۴/۸ درصد و میزان اختلاف رسوب نهایی در نمونه پیش هیدراته شده و پس هیدراته شده برابر ۵۷/۶ درصد بوده است. در مجموع، نمودار خاک با فرآیند پیش هیدراته در مقایسه با نمونه پس هیدراته رسوب کم‌تری داشته است ضمن آنکه رفتار رسوب‌پذیری نمونه پیش هیدراته تفاوت کمتری با رفتار رسوب‌پذیری نمونه شاهد داشته است.



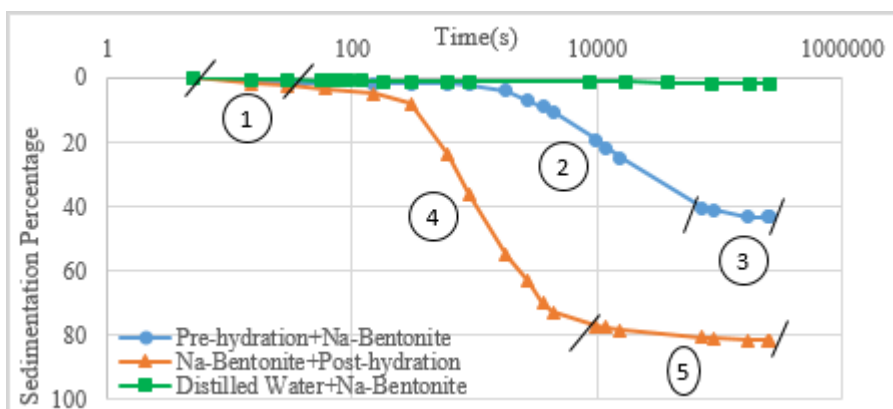
شکل (۲)، نتایج آزمایش رسوب نمونه سدیم-بنتونیت که در معرض اتانول با درصد وزنی تقریبی ۱:۵ (۵ واحد وزنی اتانول به ۱ واحد وزنی خاک) قرار گرفته است را در شرایط هیدراسیونی مختلف در مقایسه با نمونه شاهد نشان می‌دهد.



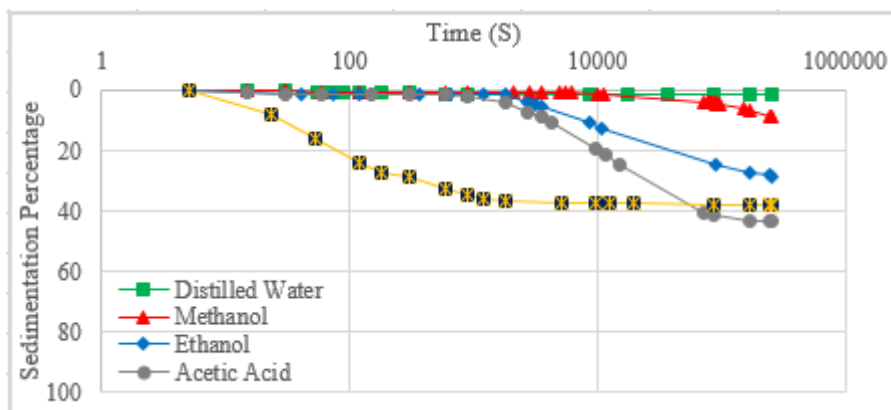
شکل ۲. نمودار رسوب خاک سدیم-بنتونیت قرار گرفته در معرض ۱:۵ وزنی اتانول

نمودارهای شکل (۲) نیز به ۵ ناحیه متفاوت تفکیک شده است. در شکل (۲) نیز نمودارها تا زمان حدود ۱۰۰۰ ثانیه تقریباً بر هم منطبق می‌باشند. در ناحیه (۱) شکل فوق، تغییرات رسوب نمونه‌های پیش هیدراته شده و پس هیدراته شده تا زمان ۳۶۰۰ ثانیه بر هم منطبق شده‌اند. برای نمونه پیش هیدراته شده میزان ۱۲٪ رسوب در این مدت و میزان ۱۵ درصد رسوب برای نمونه پس هیدراته شده، اتفاق افتاده است. در واقع در مورد اندرکنش خاک سدیم-بنتونیت و اتانول، شرایط هیدراسیون اولیه در کوتاه‌مدت اثر قابل توجهی نداشته است. نمونه پیش هیدراته شده در ناحیه (۲)، از ۳۶۰۰ ثانیه تا ۱۷۱۰۰۰ ثانیه، دارای شیب نزولی و در ناحیه (۳) که از ۱۷۱۰۰۰ ثانیه به بعد در نظر گرفته می‌شود دارای شیب بسیار کمی بوده است. در همین راستا، رفتار نمونه پس هیدراته شده از ۳۶۰۰ ثانیه تا ۲۵۰۵۰۰ ثانیه ناحیه (۴) به صورت نزولی و از ۲۵۰۵۰۰ ثانیه تا ۶۰۵۰۰۰ ثانیه ناحیه (۵) با شیب کمتری ادامه یافته است. لازم به تأکید است که در ناحیه (۲)، شیب نمودار نمونه پیش هیدراته شده از شیب نمودار بنتونیت پس هیدراته شده (ناحیه (۴) کمتر بوده‌است. بر اساس نتایج شکل فوق، میزان اختلاف رسوب نهایی نمونه پیش هیدراته شده و نمونه شاهد برابر ۲۶/۸ درصد، میزان اختلاف رسوب نهایی نمونه پس هیدراته شده و نمونه شاهد برابر ۴۶/۴ درصد و میزان اختلاف رسوب نهایی در نمونه پیش هیدراته شده و پس هیدراته شده برابر ۱۹/۶ درصد بوده‌است.

در شکل (۳) منحنی‌های رسوب بنتونیت پیش هیدراته و پس هیدراته قرار گرفته در معرض اسید استیک با منحنی رسوب نمونه بنتونیت قرار گرفته در معرض آب مقطر مورد مقایسه قرار گرفته است.



شکل ۳. نمودار رسوب خاک سدیم-بنتونیت قرار گرفته در معرض ۱:۷ وزنی اسید استیک

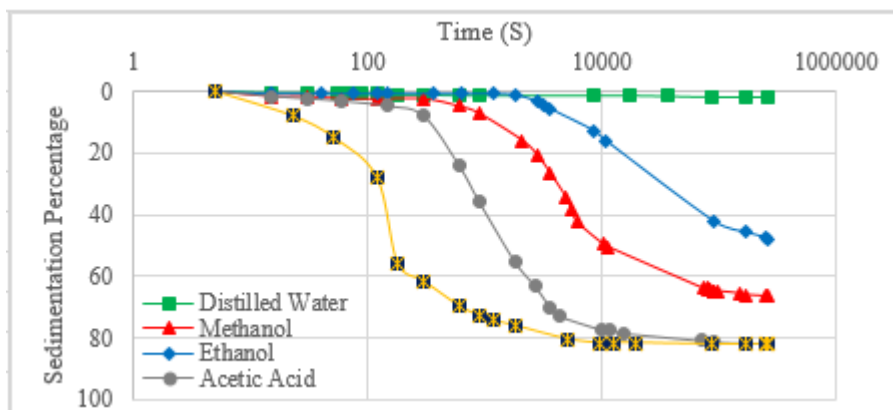


شکل ۵. مقایسه میزان رسوب خاک سدیم-بنتونیت برای نمونه‌های پیش‌هیدراته شده در حضور آلاینده‌های مختلف آلی

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۵)، نمودار رسوب نمونه‌های متانول، اتانول و اسید استیک تا ۱۰۰۰ ثانیه تقریباً بر هم منطبق است و نمونه‌ها رفتار یکسانی داشته‌اند. اما در مورد نمونه حاوی دایوکسان به علت دارا بودن ثابت دی‌الکتریک بسیار پایین آن، رفتار متفاوتی مشاهده می‌شود. به طوری که مثلاً در زمان‌های حدود ۱۰۰۰۰ ثانیه (بلندمدت)، تفاوت مقدار رسوب نهایی نمونه‌های بنتونیت حاوی دایوکسان با مقدار رسوب نمونه‌های حاوی اتانول و متانول، حدود ۴۰٪ بوده است. نمونه حاوی دایوکسان در مدت زمان فوق، حدود دو برابر نمونه حاوی اسید استیک نشست کرده است. همچنین با مشاهده الگوی رسوب نمونه‌های حاوی اسید استیک و دایوکسان مشاهده می‌شود که منحنی رسوب نمونه‌های حاوی اسید استیک دارای شیب نزولی بوده در حالی که شیب منحنی رسوب نمونه حاوی دایوکسان بعد از حدود ۱۰۰۰۰ ثانیه تقریباً افقی شده است. به طوری که میزان رسوب نهایی نمونه حاوی اسید استیک از نمونه بنتونیت حاوی دایوکسان کم‌تر شده است. این رفتار مشاهده شده را

می‌توان به حاکم شدن اثر pH در درازمدت در نمونه بنتونیت حاوی اسید استیک نسبت داد. به طوری که در این نمونه تغییر ساختار ناشی از pH کمتر سیال حفره‌ای بر تأثیر تفاوت ثابت دی‌الکتریک دو نمونه غالب شده است.

در راستای امکان مطالعه بهتر رفتار رسوب‌پذیری نمونه‌های سدیم-بنتونیت قرار گرفته در معرض آلاینده‌های آلی مختلف در شرایط پس‌هیدراته نمونه رسی، بخشی از نتایج ارائه شده در شکل‌های ۱ تا ۴ برای نمونه‌های پس‌هیدراته شده، در شکل (۶) مجدداً ترسیم و ارائه شده است.



شکل ۶. مقایسه میزان رسوب خاک سدیم-بنتونیت برای نمونه‌های پس‌هیدراته شده در حضور آلاینده‌های مختلف آلی



بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۶)، نمودارهای نمونه‌های متانول، اتانول و اسید استیک تا ۱۰۰ ثانیه تقریباً بر هم منطبق شده است و نمونه‌های فوق رفتار یکسانی داشته‌اند. به بیان دیگر، با تغییر در ثابت دی‌الکتریک تا این زمان بر رسوب نمونه تغییری اعمال نشده است. با مقایسه نتایج شکل‌های (۵) و (۶)، زمان انطباق نمودارها در حالت پیش هیدراته در حدود ۱۰ برابر حالت پس هیدراته بوده است در واقع این مسئله تأثیر فرایند هیدراسیون اولیه را در مقایسه با حالت پس هیدراته شده نشان می‌دهد. همچنین بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۶)، میزان رسوب نهایی در کوتاه‌مدت و بلندمدت در حالت پس هیدراته شده با کاهش ثابت دی‌الکتریک افزایش یافته و برای کلیه نمونه‌ها میزان رسوب نهایی در نمونه‌های پس هیدراته بیشتر از مقدار رسوب همان نمونه‌ها در حالت پیش هیدراته و با فرض فاصله زمانی مشابه بوده است.

نتیجه‌گیری

۱. به طور کلی روش هیدراسیون اولیه توانسته است از تغییرات شدید ساختاری خاک در اندرکنش با آلاینده آلی جلوگیری کند. به خصوص در نمونه‌های بنتونیت قرار گرفته در معرض متانول، با این روش از تغییرات شدید ساختاری جلوگیری شده است تا جایی که نمودار رسوب نمونه پیش هیدراته شده تقریباً رفتاری مشابه با رفتار نمونه شاهد داشته و تغییرات دو منحنی بسیار جزئی بوده است.
۲. میزان اختلاف رسوب نهایی و نمونه شاهد در دو حالت پیش هیدراته شده و پس هیدراته شده با کاهش ثابت دی‌الکتریک مواد آلاینده افزایش یافته است.
۳. با دقت در میزان اختلاف بین رسوب نهایی نمونه شاهد و نمونه پیش هیدراته شده و نیز نمونه شاهد و نمونه پس هیدراته شده میزان کارآمد بودن روش هیدراسیون اولیه در حفظ ساختار اولیه سدیم-بنتونیت در اندرکنش با آلاینده‌های آلی به وضوح قابل مشاهده است.

منابع:

- ASTM, April, ۱۹۹۹. ASTM Standards and Other Specifications and Test Methods on the Quality Assurance of Landfill Liner Systems. ASTM, ۱۹۱۶ Race Street, Philadelphia, PA.
- Brown, K.W., Anderson, D.C., ۱۹۸۳. Effects of organic solvents on the permeability of clay soils. EPA-۶۰۰/۲-۸۳-۰۱۶. U.S. Environment Protection Agency, Washington, D.C.
- Di Maio, C., Santoli, L., Schiavone, P., ۲۰۰۴. Volume change behavior of clays: the influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state. Mech. Mater. Vol. ۳۶, pp. ۴۳۵-۴۵۱.
- Edil, T. B., Berthouex, P. M., Park, J. K., Hargett, D. L., Sandstorm, L., Zelmanowitz, S., ۱۹۹۱. Effects of Volatile Organic compounds on clay landfill liner performance. Waste Management and Research. Vol. ۹, pp. ۱۷۱-۱۸۷.
- Eltantawy, I.N., Arnold P.W., ۱۹۷۳. Reappraisal of ethylene glycol mono-ethyl ether (EGME) method for surface area estimation of clays. Soil Sci. Soc. Am. J.
- Gajo, A., Maines, M., ۲۰۰۷. Mechanical effects of aqueous solutions of inorganic acids and bases on a natural active clay. Geotechnique. Vol. ۵۷ (۸), pp. ۶۸۷-۶۹۹.
- Handershot W.H., Duquette M., ۱۹۸۶. A simple barium chloride method for determining cation exchange capacity and exchangeable cations, Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. ۵۰, pp. ۶۰۵-۶۰۸.
- Hesse, P.R., (۱۹۷۲), A textbook of soil chemical analysis. Chemical Pub. Co.
- Kaya, A., ۲۰۰۶. Settling of kaolinite in different aqueous environment. Marine Georesources and Geotechnology, Vol. ۲۴, pp. ۲۰۳-۲۱۸.
- Kaya, A., Fang, H. Y., ۲۰۰۰. The effects of organic fluids on physicochemical parameters of fine-grained soils. Canadian Geotechnical. J., Vol. ۳۷, pp. ۹۴۳-۹۵۰.
- Mesri, G., Olson, R.E., ۱۹۷۱. Mechanisms controlling the permeability of clays. Clays and Clay Minerals ۱۹ (۳), pp. ۱۵۱-۱۵۸.
- Michaels, A.S., Lin, C.S., ۱۹۵۴. The permeability of kaolinite. Industrial and Engineering Chemistry ۴۶, pp. ۱۲۳۹-۱۲۴۶.
- Moavenian, M. H., Yasrobi, S.H. S., ۲۰۰۸. Volume change behavior of compacted clay due to organic liquids as permeant. Applied Clay Science. Vol. ۳۹, pp. ۶۰-۷۱.
- Olgun, M., Yildiz, M., ۲۰۱۰. Effect of organic fluids on the geotechnical behavior of a highly plastic clayey soil.
- Ouhadi, V.R., Goodarzi, A.R., ۲۰۰۷. Factors impacting the electro conductivity variations of clayey soils. Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B: Engineering, Vol. ۳۱, No. B۲, pp. ۱۰۹-۱۲۱.
- Puma, S., Dominijanni, A., Manassero, M., Zaninetta, L., ۲۰۱۵. The role of physical pretreatments on the hydraulic conductivity of natural sodium bentonites. Geotextiles and Geomembranes. Vol. ۴۳, pp. ۲۶۳-۲۷۱.
- Sridharan, A., El-Shafei, A., Miura, N., ۲۰۰۲. Mechanisms controlling the undrained strength behavior of remolded Ariake marine clays. Mar. Georesour. Geotechnol. Vol. ۲۰, pp. ۲۱-۵۰.



Sridharan, A., Prakash, K., ۲۰۰۱. Settling behavior and clay mineralogy. Soils and foundations, Vol. ۴۱, pp ۱۰۵-۱۰۹.

Yukselen-Aksoy, Y., Kaya, A., Ören, A.H., ۲۰۰۸. Seawater effect on consistency limits and compressibility characteristics of clays. Eng. Geol. Vol. ۱۰۲, pp. ۵۴-۶۱.

Zhao, X., Bate, B., ۲۰۱۲. Sedimentation Behavior of Kaolinite: Salt and Fly Ash Effects. Workshop on Experimental Micromechanics for Geomaterials, Hong kong.