



تأثیر استفاده از محلول تبادل یونی Ca^{++} CBR در افزایش میزان باربری خاک‌های رسی با شاخص خمیری مختلف

رضا ضیایی مؤید*، سید محمد حسین خاتمی، فرزاد اله یاری

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳ آبان ۱۳۹۲
بازنگری: ۲۳ فروردین ۱۳۹۴
پذیرش: ۱۶ شهریور ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۶ مهر ۱۳۹۴

کلمات کلیدی:

تثبیت خاک
تبادل یونی
محلول تبادل یونی Ca^{++}
حد خمیری (PI)
آزمایش میزان باربری کالیفرنیا (CBR)
سیکل‌های یخبندان-ذوب و ترو خشک شدن.

چکیده: تاکنون در اکثر پروژه‌های اجرایی در ایران روش کار برای استفاده از ماده تثبیت کننده یونی Ca^{++} CBR، انجام آزمایش‌های تبادل یونی شیمیایی بوده است. ضرورت انجام این تحقیق بررسی مشخصات رفتار مقاومتی نمونه‌های خاک رسی با PI مختلف تثبیت شده به این روش با انجام آزمایش‌های مکانیکی از جمله Ca^{++} CBR است. همچنین عملکرد نمونه‌های تثبیت شده خاک با محلول تبادل یونی Ca^{++} CBR در سیکل‌های تر و خشک شدن و ذوب-انجماد نیز برای اولین بار در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته است. در تثبیت خاک با محلول Ca^{++} CBR ابتدا با توجه به میزان تبادل یونی خاک‌ها که بوسیله یک آزمایش شیمیایی انجام می‌شود، میزان مورد نیاز مواد تثبیت کننده تعیین می‌شود. سپس، نمونه‌ها در درصد رطوبت بهینه و بیش‌ترین چگالی خشک ساخته شده و پس از عمل‌آوری به مدت دو هفته، نمونه‌های خشک مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین نمونه‌های خاک پس از دو هفته عمل‌آوری در شرایط خیس خورده نیز مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نمونه‌های خیس خورده در مقایسه با نمونه‌های خشک افزایش مقاومت بیشتری نشان دادند. سپس نمونه‌ها تحت ۱ تا ۴ سیکل انجماد-ذوب و خشک-تر قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند استفاده از محلول Ca^{++} CBR، باربری خاک‌های رسی را افزایش می‌دهد این افزایش در خاک با PI کمتر، بیشتر است. اگرچه سیکل‌های انجماد-ذوب و خشک-تر باربری خاک را کاهش می‌دهند، ولی مقاومت نمونه خاک رس تثبیت شده پس از اعمال سیکل‌های مذکور به طور قابل توجهی بیش از نمونه‌های تثبیت نشده بوده و در حد قابل قبول است.

۱- مقدمه

خاک‌های رسی بخش زیادی از مساحت راه‌های کشور را تشکیل می‌دهند. با توجه به اینکه امکان حذف و جایگزینی این خاک‌ها با توجه به هزینه بالای انجام آن امکان‌پذیر نیست، استفاده از مواد افزودنی و تثبیت کننده‌ها، به‌عنوان یکی از روش‌های افزایش مقاومت خاک‌های رسی به شمار می‌رود.

از دیرباز آهک برای تثبیت این گونه خاک‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفت. با گذشت زمان، مواد جدیدی برای تثبیت خاک‌ها و افزایش باربری آن‌ها استفاده شد. هدف از افزودن این مواد تثبیت کننده به خاک‌ها، استفاده از خاک‌های محل و کاهش هزینه جابجایی این خاک و انتقال خاک‌های با مقاومت بیشتر بود. سیمان و خاکستر بادی از جمله مواد دیگری بودند که برای تثبیت خاک بستر راه‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفتند. با توجه به مشکلاتی که تثبیت کننده‌های سنتی داشتند، استفاده از مواد جدید برای تثبیت خاک در دستور کار مهندسان قرار گرفت. این مواد جدید شامل مواد پلیمری هستند و در سال‌های اخیر نانوذرات در خاک به‌عنوان تثبیت کننده خاک‌ها مطرح شده است. استفاده از نانوذرات برای تثبیت و بهبود پارامترهای

مکانیکی خاک‌ها سابقه بسیار کوتاهی دارد و اغلب محدود به تحقیقات آزمایشگاهی است. یکی از موادی که با استفاده از خاصیت نانو بودن ابعاد ذرات خاک‌رس آن را تثبیت می‌کند محلول تبادل یونی سی بی آر پلاس می‌باشد. این محصول در جهان سابقه‌ای در حدود ۲۰ ساله دارد ولی در ایران به تازگی در پروژه‌های محدودی مورد استفاده قرار گرفته است.

در برخی از موارد در خاک‌های با مقدار سولفات بالا، تثبیت خاک با استفاده از مواد شیمیایی مرسوم که غنی از کلسیم هستند منجر به تورم بیش از حد می‌گردد [۲،۱]. در این موارد زمانی تثبیت خاک با شکست مواجه می‌شود که کلسیم اضافه شده با سولفات و آلومینا موجود در خاک واکنش دهد و مجموعه‌هایی از کلسیم-آلومینیوم-سولفات هیدراته را تشکیل دهد. این واکنش سبب می‌شود تا خاک افزایش حجم قابل توجهی از خود نشان دهد [۳]، [۴] و [۶]. به همین دلیل امروزه نیاز به استفاده از محصولات تثبیت کننده جدید که عاری از کلسیم باشند احساس می‌گردد.

اسچولن (۱۹۹۲) فهرست برخی از این محصولات شیمیایی مایع را که به‌عنوان الکترولیت‌ها، آنزیم‌ها، پلیمرهای اکریلیک و رزین‌های معدنی طبقه بندی می‌شوند را بیان کرده است [۷]. در این مقاله مایع تثبیت یونی مورد بررسی و استفاده قرار گرفته است. تثبیت کننده‌های شیمیایی ممکن است از راه‌های مختلفی از جمله تبادل یون‌های لایه‌های داخلی و تجزیه کانی‌های رس بوسیله

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ziaie@eng.ikiu.ac.ir

از اهداف این مطالعه است.

۲- مصالح مصرفی

۲-۱- خاک

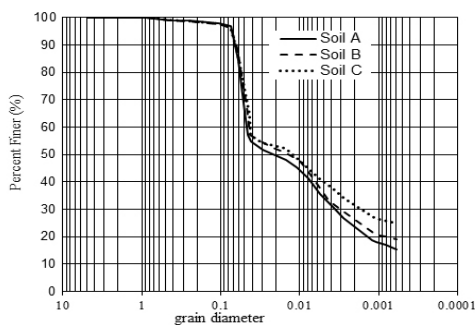
خاک مورد استفاده در این مطالعه خاک ریز دانه رسی می‌باشد که از منطقه آبیگ واقع در استان قزوین نمونه‌برداری شده است. ۳ نوع خاک برای انجام سایر مطالعات فراهم گردید که در ادامه با نام خاک‌های A، B و C معرفی می‌شوند. خاک A خاک طبیعی برداشت شده از محل بوده که برای بدست آمدن نمونه‌های خاک با خاصیت خمیری متفاوت درصدهای بنتونیت ۱۰ و

جدول ۱: مقادیر و درصد بنتونیت افزوده شده به خاک اولیه

Table 1. Bentonite amount in soil specimens

نام خاک	درصد وزنی بنتونیت نسبت به کل وزن خشک خاک
خاک A	بدون بنتونیت (خاک اولیه)
خاک B	۱۰٪
خاک C	۲۰٪

۲۰ درصد وزنی به آن افزوده شده تا خاک‌های B و C مطابق جدول ۱ بدست آید. در این تحقیق آزمایش دانه‌بندی به روش الک و هیدرومتری طبق



شکل ۱: منحنی دانه بندی خاک‌های A، B و C

Fig.1. Grain size distribution curves of tested soils

استاندارد ASTM D۴۲۲ انجام شده است. نتایج بصورت منحنی دانه بندی در شکل ۱ ارائه شده است.

با توجه به اهمیت حدود اتربرگ خاک در تعیین خواص مهندسی آن، آزمایش تعیین حدود اتربرگ با توجه به استاندارد ASTM D۴۳۱۸ که شامل تعیین حد روانی و حد خمیری خاک می‌باشد انجام شده و نتایج آن در جدول ۲

جدول ۲: مقادیر حدود اتربرگ سه خاک مورد مطالعه

Table 2. Atterberg Limits of tested soils

Soil	LL	PL	PI	USCS
A	۳۴/۸	۲۱/۷	۱۳/۱	CL
B	۴۱/۷	۲۲/۹	۱۸/۸	CL
C	۵۲	۲۴/۱	۲۷/۹	CH

خارج کردن آب از لایه دوگانه عمل کرده و سبب تثبیت خاک شوند [۷، ۸].

اسچولن به بررسی تعدادی از پژوهش‌های سرویس جنگل ایالات متحده که در آن‌ها تعدادی از این محصولات، اغلب برای تثبیت راه‌های آسفالت نشده مورد استفاده قرار گرفته، پرداخته است [۷، ۹].

دوازده تثبیت‌کننده غیرستنی خاک از انواع مختلف به تازگی توسط تحقیقات مهندسی ارتش ایالات متحده^۱ و مرکز توسعه مورد بررسی قرار گرفته است [۱۰]. این محصولات به دلیل اثر بالقوه خود در اصلاح مصالح بستر شامل ماسه سیلتی انتخاب شده‌اند. مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌هایی که بعد از زمان‌های عمل‌آوری مختلف در معرض مرطوب شدن قرار گرفته بودند به عنوان شاخص عملکرد در این مقاله انتخاب شده بود. در آن مطالعه بیشتر تثبیت‌کننده‌ها بهبود قابل توجهی از خود نشان ندادند. برخی از تثبیت‌کننده‌های پلیمری نتایج امیدوار کننده‌ای را نشان دادند، اما فقط در زمانی که، مقادیر خیلی بیشتری از این محصول (۲۵ تا ۵۰ برابر مقداری که توسط تولیدکننده توصیه شده بود) به خاک ماسه سیلتی اضافه می‌کردند.

علاوه بر این با توجه به تنوع آب و هوایی در ایران خاک‌های تثبیت‌شده در مناطق مختلف کشور سیکل‌های متناوب تر و خشک شدن و ذوب و انجماد را تجربه می‌کنند. به همین دلیل در این مقاله علاوه بر بررسی نحوه عملکرد و میزان کارایی محلول تبادل یونی $CBR^{+۴}$ ، تاثیر سیکل‌های ذوب و انجماد و تر و خشک شدن بر روی نمونه‌های تثبیت‌شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

محققان زیادی کاهش میزان موثر بودن تثبیت با آهک در نتیجه سیکل‌های تر و خشک شدن را گزارش داده اند [۱۱-۱۳].

هریچانه و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی اثرات سیکل‌های تر و خشک شدن بر روی مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های رس تثبیت شده با آهک و پوزلان طبیعی پرداختند. میزان آهک و پوزلان طبیعی افزوده شده به ترتیب ۰ تا ۸٪ و ۰ تا ۲۰٪ بوده است. علاوه بر این ترکیباتی از آهک و پوزلان طبیعی نیز به خاک رس اضافه شده است. زمان عمل‌آوری نمونه‌ها ۷ و ۲۸ روز انتخاب شده است. بر اساس نتایج بدست آمده خاک رس تثبیت شده با ترکیب آهک و پوزلان طبیعی در طی ۱۲ سیکل عملکرد بهتری را از خود نشان داده است [۱۴].

تاکنون در اکثر پروژه‌های اجرایی روش کار برای استفاده از ماده تثبیت‌کننده یونی $CBR^{+۴}$ در ایران، انجام آزمایش‌های تبادل یونی شیمیایی بوده است. هدف اصلی این تحقیق بررسی درستی نتایج آزمایش‌های گفته‌شده بر روی مشخصات مقاومتی خاک با انجام آزمایش‌های مکانیکی از جمله CBR می‌باشد. همچنین عملکرد نمونه‌های تثبیت شده خاک با محلول مذکور در سیکل‌های تر و خشک شدن و ذوب-انجماد نیز یکی دیگر

^۱ U.S. Forest Service

۳- مراحل آزمایشگاهی

در این مقاله به منظور بررسی تاثیر استفاده از محلول تبادل یونی در افزایش میزان باربری خاک‌های رسی، ۲ دسته کلی آزمایش انجام شده است: آزمایش‌های شیمی و آزمایش‌های مکانیک خاک. آزمایش‌های شیمی شامل آزمایش طیف‌سنج فلورسانس پرتو ایکس که با نام اختصاری «آزمایش XRF» بیان می‌گردد برای تعیین نوع و درصد عناصر هر یک از سه خاک و آزمایش تعیین میزان تبادل یونی می‌باشد. آزمایش‌های مکانیک خاک نیز شامل آزمایش تعیین ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR) نمونه‌ها بعد از دو هفته عمل‌آوری و همچنین انجام این آزمایش برای نمونه‌هایی که تحت سیکل‌های متوالی تر و خشک شدن و ذوب و یخبندان قرار داشته‌اند می‌باشد.

جدول ۵: مقادیر تبادل یونی خاک‌های مختلف و مقادیر مورد نیاز ماده تثبیت‌کننده برای تثبیت

Table 5. Ionic exchange concentration for different soils

نوع خاک	مقدار معرف (میلی لیتر)	مقدار معرف (میلی لیتر)	نسبت مقدار معرف به مقدار محلول حاوی یون‌های قابل تبادل	غلظت محلول مورد نیاز برای تثبیت با توجه به آزمایش تبادل یونی (گرم در لیتر)
A	۶/۱	۶/۱	۱/۰۱۷	۰/۱۲۵
B	۵/۲	۵/۲	۰/۸۶۷	۰/۱۱
C	۳/۸	۳/۸	۰/۷۶	۰/۱۰

۳-۱- آزمایش تعیین میزان تبادل یونی

برای تعیین میزان محلول تبادل یونی $CBR^{+۴}$ پلاس مورد نیاز برای تثبیت خاک‌ها لازم است که در ابتدا میزان تبادل یونی خاک تعیین شود. برای این منظور هر ۳ نوع خاک مصرفی و بنتونیت مورد استفاده مورد آزمایش تعیین میزان تبادل یونی قرار گرفتند که نتایج حاصله در جدول ۵ ارائه شده است.

۳-۲- آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا CBR

در این تحقیق به منظور تعیین تأثیر میزان محلول تبادل یونی بر روی افزایش مقاومت خاک‌های رسی با حد خمیری مختلف از آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا که به اختصار آزمایش CBR گفته می‌شود بر طبق آیین‌نامه ASTM D 1883-۹۹ استفاده شده است. در این روش، آزمایش بر روی نمونه‌هایی که در درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک بدست آمده از آزمایش تراکم ساخته شده‌اند، انجام می‌شود. نمونه‌ها به مدت ۲ هفته بعد از ساخت در محیط آزمایشگاه

نشان داده شده است. بر این اساس خاک A و B بعنوان CL و خاک C بعنوان CH در طبقه بندی یونیفاید نامگذاری می‌گردند.

جدول ۳: مقادیر رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک بدست آمده از آزمایش تراکم

Table 3. Optimum water content and maximum dry densities of tested soils

خاک	حداکثر وزن مخصوص خشک (γ_d) (gr/cm^3)	درصد رطوبت بهینه (ω_{opt})
A	۱/۸۴	۱۶/۲
B	۱/۷۹	۱۷
C	۱/۷۶	۱۷/۹

برای بدست آوردن منحنی تراکم خاک‌ها، آزمایش تراکم اصلاح شده بر اساس استاندارد AASHTO T ۱۸۰ به روش B-method (پروتور اصلاح شده) برای هر ۳ خاک انجام گردید و مقادیر رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک هر یک از نمونه‌ها مطابق جدول ۳ به دست آمد.

جدول ۴: ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محلول تثبیت‌کننده یونی $CBR^{+۴}$

Table 4. Physical and chemical properties of $CBR^{+۴}$

شکل ظاهری	مایع غلیظ قهوه‌ای رنگ
بو	شبه گوگرد
حالت فیزیکی	مایع غلیظ
نقطه انجماد	کمتر از $10^{\circ}C$
نقطه جوش	$100^{\circ}C$
pH	۹
وزن مخصوص	۰/۹۴
درصد حل شدن در آب	٪۱۰۰

محلول تبادل یونی $CBR^{+۴}$ یک محلول قهوه‌ای رنگ با غلظت بالا است که برای تثبیت خاک‌های ریزدانه مورد استفاده قرار می‌گیرد و باعث بهبود ظرفیت باربری انواع خاک‌های رسی و خاک‌های سیلتی می‌گردد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این تثبیت‌کننده در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به تجاری بودن این ماده تثبیت‌کننده فرمول شیمیایی آن اختصاصی است. ولی در حالت کلی فرمول شیمیایی محلول تبادل یونی $CBR^{+۴}$ بصورت $R-SO_3H$ می‌باشد که در آن R پیوندهای هیدروکربن است [۱۵].

و ذوب قرار گرفتند. ۴ سیکل بدین صورت انتخاب شده‌اند که بیشترین کاهش در مقاومت خاک در سیکل‌های اولیه رخ دهد و پس از سیکل‌های ۵ تا ۱۰ یک حالت تعادل جدید برای نمونه ایجاد گردد [۱۶].

۳-۴- سیکل‌های خشک و تر

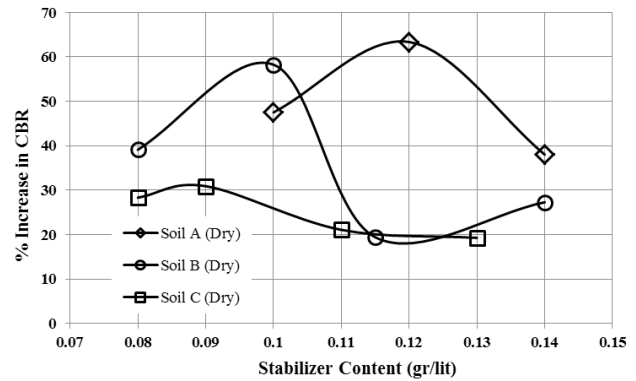
برای آزمایش سیکل‌های تر و خشک نمونه‌ها، بعد از اتمام مدت زمان عمل‌آوری ۲ هفته به مدت ۹۶ ساعت درون آب قرار گرفته‌اند و سپس برای سیکل تر و خشک شدن به مدت ۲۴ ساعت از آب خارج شده و در محیط آزمایشگاه به منظور از دست دادن رطوبت قرار گرفته و سپس ۲۴ ساعت درون آب برای افزایش رطوبت قرار داده شده‌اند. این فرایند ۲۴ ساعت خارج از آب و سپس ۲۴ ساعت درون آب یک سیکل خشک و تر را تشکیل می‌دهد. به نمونه‌ها بعد از خارج شدن از آب به مدت ۱۵ دقیقه اجازه خروج آب داده می‌شد و سپس تحت آزمایش CBR قرار گرفتند. نمونه‌های تثبیت‌شده تحت ۴ سیکل متوالی خشک و تر شدن قرار گرفتند.

۴-۴- نتایج بدست آمده

۴-۱- اثر تثبیت با $CBR^{+۴}$ روی عدد CBR در خاک‌ها با PI مختلف
شکل ۲ درصد افزایش در مقاومت ($\Delta CBR/CBR \times 100$) نمونه‌های تثبیت شده خاک‌ها در مقابل میزان غلظت ماده تثبیت‌کننده در حالت خشک (رطوبت بهینه) را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۳ درصد افزایش CBR نمونه‌های تثبیت شده خاک‌های A، B و C در حالت خیس‌خورده در مقابل میزان غلظت ماده تثبیت‌کننده نشان داده شده است.

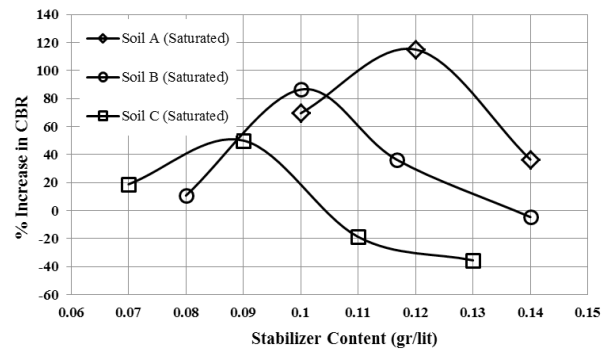
افزایش مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با افزایش غلظت ماده تثبیت‌کننده به این علت است که با بیشتر شدن غلظت محلول تبادل یونی $CBR^{+۴}$ ، میزان تبادل یونی بیشتری در نمونه‌های تثبیت شده روی می‌دهد و افزایش تبادل یونی سبب جایگزینی یون‌های با ظرفیت بیشتر به جای یون‌های با ظرفیت کمتر می‌گردد و این فرایند جایگزینی سبب کاهش ضخامت آب لایه دوگانه و در نتیجه افزایش مقاومت نمونه تثبیت شده می‌شود. به طور مثال اگر فرض کنیم که در خاک کاتیون‌های قابل تبادل از نوع Na^+ باشند، با استفاده از محلول تبادل یونی $CBR^{+۴}$ ، هر ذره این محلول می‌تواند جایگزین ۴ کاتیون Na^+ شود و با توجه به اینکه این کاتیون‌ها بصورت اشباع در آب اطراف خود هستند، این جایگزینی سبب کاهش غلظت کاتیون‌ها در آب لایه دوگانه و هم‌چنین کاهش ضخامت آب لایه دوگانه می‌شود. این امر سبب می‌شود صفحات رس به یکدیگر نزدیکتر شده و در نتیجه ظرفیت باربری خاک افزایش یابد [۲۰-۱۷]. ولی با افزایش بیشتر در غلظت ماده تثبیت‌کننده، مقدار این ماده در بین ذرات رس افزایش می‌یابد و در این حالت به جای اینکه حالت بین ذرات خاک، «رس-ماده تثبیت‌کننده-رس» باشد حالت آن اینگونه خواهد بود: «رس-ماده تثبیت‌کننده-ماده تثبیت‌کننده-رس». یعنی در این حالت به علت زیاد

عمل‌آوری شده و سپس آزمایش بر روی نمونه‌های خشک و خیس‌خورده انجام می‌شود. آزمایش نمونه‌های خشک به این صورت بوده است که این نمونه‌ها بعد از زمان عمل‌آوری ۲ هفته تحت آزمایش قرار گرفته‌اند، ولی در نمونه‌های خیس‌خورده، نمونه‌ها بعد از اتمام زمان عمل‌آوری ۲ هفته، ابتدا به مدت ۹۶ ساعت برای خیس‌کردن درون آب قرار گرفته و پس از پایان این مدت، تحت آزمایش قرار گرفته‌اند.



شکل ۲: مقایسه درصد افزایش CBR نمونه‌های خاک‌های A، B و C در مقابل غلظت ماده تثبیت‌کننده در حالت خشک (رطوبت بهینه)

Fig.2. Dry CBR values versus stabilizer content for different soil type



شکل ۳: مقایسه درصد افزایش CBR نمونه‌های خاک‌های A، B و C در مقابل غلظت ماده تثبیت‌کننده در حالت خیس‌خورده

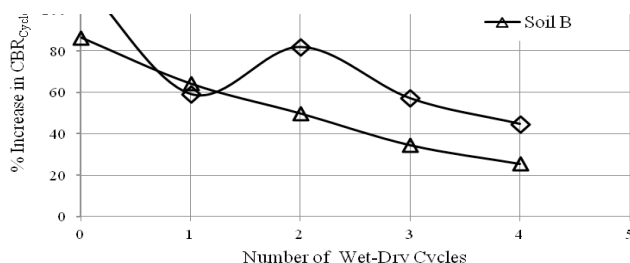
Fig.3. Soaked CBR values versus stabilizer content for different soil type

۳-۳- سیکل‌های ذوب و انجماد

برای انجام آزمایش سیکل‌های متوالی یخبندان و ذوب، نمونه‌ها بعد از اتمام مدت زمان عمل‌آوری ۲ هفته به مدت ۹۶ ساعت درون آب قرار گرفته‌اند و سپس به منظور یخ‌زدن بعد از خارج کردن از آب به مدت ۲۴ ساعت درون فریزر در دمای $-15^{\circ}C$ قرار گرفتند و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه برای ذوب شدن قرار داده شدند. انتخاب دمای $-15^{\circ}C$ برای یخبندان با توجه به میانگین دمایی استان قزوین در فصل زمستان می‌باشد. این فرایند ۲۴ ساعت یخبندان در فریزر و سپس ۲۴ ساعت ذوب در دمای آزمایشگاه یک سیکل یخبندان و ذوب را تشکیل می‌دهد. نمونه‌ها پس از پایان مدت زمان ذوب تحت آزمایش CBR قرار گرفتند. نمونه‌ها در کل تحت ۴ سیکل متوالی یخبندان

۴-۲- اثر سیکل‌های ذوب-انجماد بر روی خاک‌های تثبیت شده با محلول $CBR^{+۴}$

در شکل ۵ به مقایسه درصد تغییرات مقادیر CBR نمونه‌های تحت سیکل‌های متوالی یخبندان-ذوب خاک‌های A و B پرداخته شده است. افت شدید مشاهده شده در میزان افزایش عدد CBR در سیکل اول نسبت به نمونه بدون سیکل و سپس افزایش مقاومت از سیکل اول به دوم در نمونه A به علت به حالت تعادل نرسیدن نمونه خاک در سیکل اول از لحاظ زمان مورد نیاز برای تکمیل شدن واکنش‌های تبادل یونی در خاک می‌باشد. از سیکل دوم به بعد روند کاهش مقاومت در نمونه‌های تثبیت شده ثابت است. این بدین علت است که در این سیکل‌ها (دوم تا چهارم)، عمل‌آوری نمونه‌های هر دو خاک تقریباً کامل شده است و اثر تخریبی سیکل‌های یخبندان-ذوب در آن‌ها یکسان است.



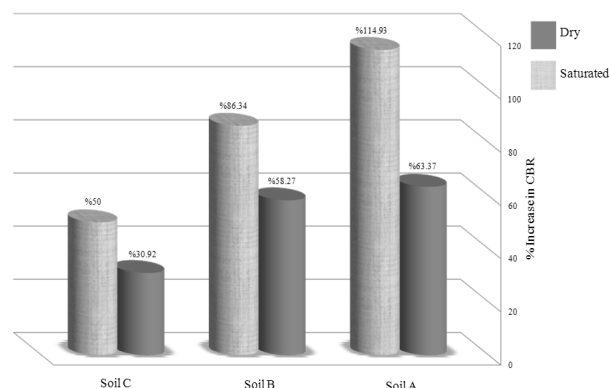
شکل ۶: تغییرات درصد افزایش مقاومت نمونه‌های تثبیت شده خاک‌های A و B نسبت به نمونه تثبیت نشده همان خاک در مقابل تعداد سیکل‌های خشک و تر شدن

Fig.6. CBR values versus number of Wetting-Drying cycles

۴-۳- اثر سیکل‌های تر و خشک شدن بر روی خاک‌های تثبیت شده با محلول $CBR^{+۴}$

در شکل ۶ به مقایسه مقادیر CBR و میزان تغییرات آن در نمونه‌های تحت سیکل‌های متوالی خشک و تر شدن خاک‌های A و B پرداخته شده است. مشابه حالت ذوب-یخبندان در این حالت نیز افت شدید در میزان درصد افزایش عدد CBR در سیکل اول تر و خشک شدن نسبت به نمونه بدون سیکل و سپس افزایش مقاومت از سیکل اول به دوم در نمونه A مشاهده می‌شود که این مسئله به علت به حالت تعادل نرسیدن نمونه خاک در سیکل اول از لحاظ زمان مورد نیاز برای تکمیل شدن واکنش‌های تبادل یونی در خاک می‌باشد. از سیکل دوم به بعد کاهش مقاومت در نمونه‌های تثبیت شده در طی سیکل‌های متوالی خشک و تر شدن روند ثابتی دارد. این بدین علت است که در این سیکل‌ها، عمل‌آوری نمونه‌های هر دو خاک (A و B) تقریباً کامل شده است و اثر تخریبی سیکل‌های خشک و تر شدن تقریباً در آن‌ها یکسان است.

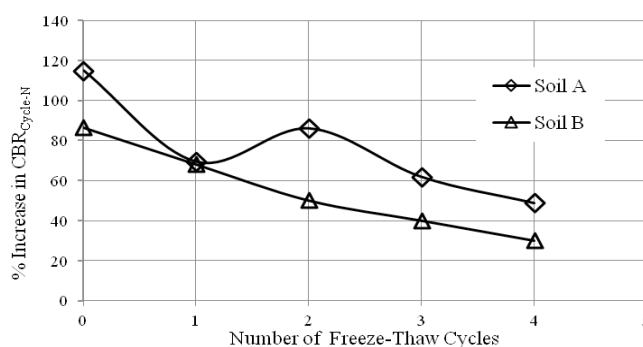
شدن ماده تثبیت‌کننده، این مواد تماس مستقیم با یکدیگر دارند و با توجه به اینکه این ماده تثبیت‌کننده حالت روغنی دارد، تماس آن‌ها با



شکل ۴: نمودار میله‌ای مقایسه بیشترین درصد افزایش CBR در نمونه‌های تثبیت شده خاک‌های A، B و C در حالت‌های اشباع و خشک

Fig.4. Comparison results of Dry and Soaked CBR values for different soil type

یکدیگر سبب کاهش چسبندگی بین دو ذره رس مجاور هم و در نتیجه کاهش مقاومت نمونه تثبیت شده با غلظت بالایی از محلول می‌گردد. با توجه به اینکه ماده تثبیت‌کننده یونی $CBR^{+۴}$ با کاهش میزان آب لایه دوگانه سبب تثبیت و بالابردن مقاومت خاک و همچنین سبب کاهش جذب آب نمونه خاک به هنگام اشباع شدن می‌گردد، انتظار می‌رود که این تثبیت‌کننده در نمونه‌های خیس‌خورده نسبت به نمونه‌های خشک (رطوبت بهینه) کارایی بیشتری داشته باشد. از این رو در شکل ۴ درصد افزایش CBR در نمونه‌های خیس‌خورده و خشک مقایسه شده‌اند. این شکل نشان می‌دهد که درصد افزایش CBR در هر سه خاک A، B و C در حالت خیس‌خورده بیش از حالت خشک است.

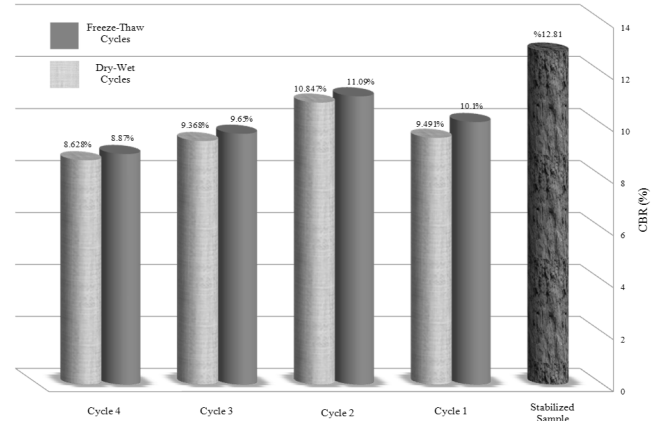


شکل ۵: تغییرات درصد افزایش مقاومت نمونه‌های تثبیت شده خاک‌های A و B نسبت به نمونه تثبیت نشده همان خاک در مقابل تعداد سیکل‌های یخبندان-ذوب

Fig.5. CBR values versus number of Freeze-Thaw cycles

۴-۴- مقایسه مقادیر CBR خاک‌های A و B در سیکل‌های یخبندان-ذوب و خشک و تر شدن

سیکل‌های یخبندان-ذوب و خشک و تر شدن سبب کاهش مقاومت و در نتیجه کاهش مقدار CBR نمونه‌های تثبیت شده از خاک‌های A و B



شکل ۷: مقایسه مقادیر CBR نمونه‌های تثبیت شده خاک A در سیکل‌های متوالی یخبندان-ذوب و خشک و تر شدن

Fig.7. Comparison results of CBR values of stabilized soils under Freezing and Thawing cycles

شد. برای بررسی اینکه کدام یک از این نوع سیکل‌هایی که خاک تثبیت شده در مدت عمر خود آن‌ها را تجربه می‌کند سبب کاهش بیشتری در میزان مقاومت خاک‌های تثبیت شده می‌شود لازم است تا میزان CBR نمونه‌های خاک در هر دو حالت با یکدیگر مقایسه شوند. در شکل ۷ به مقایسه مقادیر CBR دو خاک A و B در طی سیکل‌های یخبندان-ذوب و خشک و تر شدن پرداخته شده است.

شکل ۷ نشان می‌دهد که در خاک A، در تمام سیکل‌ها، مقاومت نمونه‌های تثبیت شده در سیکل‌های یخبندان-ذوب بیشتر از مقاومت نمونه‌های سیکل‌های خشک و تر شدن می‌باشد. علت بیشتر بودن مقاومت نمونه‌های سیکل‌های یخبندان-ذوب این است که در این نمونه‌ها میزان رطوبت ثابت است ولی در سیکل‌های خشک و تر شدن، در حین فرایند تر شدن نمونه در داخل آب قرار داده می‌شود که همین امر سبب جذب آب بیشتر و در نتیجه کاهش مقاومت بیشتری می‌گردد.

۵- نتایج

در این مقاله هدف اصلی بررسی راندمان استفاده از محلول تبادل یونی CBR⁺ در تثبیت خاک‌های رسی با PI مختلف بوده است، که با انجام آزمایش‌های CBR بر روی نمونه‌های مختلف خاک رس نتایج زیر به دست آمده است:

- غلظت مناسب از ماده تثبیت‌کننده یونی CBR⁺ که برای تثبیت نمونه‌های خاک رس با PI مختلف از آزمایش تبادل یونی به دست آمده است به ترتیب برابر ۰/۱۲۵، ۰/۱۱ و ۰/۱ گرم در لیتر برای خاک‌های

با PI، ۱۳/۱، ۱۹/۸ و ۲۷/۹ می‌باشد که مشابه مقادیر به دست آمده از آزمایش‌های CBR برای حداکثر مقاومت نمونه‌ها می‌باشد.

- انجام آزمایش‌های مقاومتی CBR بر روی نمونه‌های خاک رس تثبیت شده با غلظت‌های مختلف ماده تبادل یونی CBR⁺ در هر مورد بیانگر افزایش مقاومت CBR با افزایش درصد تبادل یونی تا یک مقدار مشخص بوده که پس از آن با افزایش غلظت ماده تبادل یونی مقاومت CBR نمونه خاک کاهش یافته است. در نمونه‌های خاک رس با PI کم‌تر از ۲۰ (نمونه A و B با PI به ترتیب ۱۳/۱ و ۱۹/۸) CBR نمونه تثبیت شده خاک در حالت خشک حداکثر ۶۳ درصد افزایش یافته است در صورتی که در نمونه‌های خاک رس با PI بیشتر از ۲۰ (نمونه C با PI=۲۷) مقدار درصد افزایش عدد CBR نمونه خشک به حداکثر ۳۰ درصد می‌رسد. در حالت خیس خورده افزایش درصد مقاومت CBR بیشتری در تمامی نمونه‌های خاک نسبت به حالت خشک مشاهده شده است به طوری که در نمونه‌های خاک با PI ۱۳/۱، ۱۹/۸ و ۲۷/۹ به ترتیب افزایش عدد CBR نمونه خیس خورده برابر ۱۱۴، ۸۶ و ۵۰ درصد به دست آمده است.

- نمونه‌های تثبیت شده در حالت خیس خورده نسبت به حالت خشک افزایش مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند. به این دلیل که محلول تبادل یونی سبب کاهش ضخامت آب لایه دوگانه می‌گردد، در محیط اشباع جذب آب نمونه کمتر می‌شود.

- اعمال سیکل‌های یخبندان-ذوب در نمونه‌های خاک رس با PI های مختلف تثبیت شده با محلول تبادل یونی CBR⁺ به طور کلی باعث کاهش مقاومت نمونه‌ها گردیده است. به طوری که با اعمال ۴ سیکل ذوب-یخبندان عدد CBR نمونه‌های خاک رس با PI، ۱۳/۱ و ۱۹/۸ به ترتیب ۵۲ و ۶۸ درصد کاهش یافته است. اما در هر صورت پس از اعمال ۴ سیکل ذوب-یخبندان بر روی نمونه‌های تثبیت شده عدد CBR نهایی خاک از نمونه تثبیت نشده بیشتر می‌باشد.

- اعمال سیکل‌های تر و خشک شدن در نمونه‌های خاک رس با PI های مختلف تثبیت شده با محلول تبادل یونی CBR⁺ به طور کلی باعث کاهش مقاومت نمونه‌ها گردیده است. به طوری که با اعمال ۴ سیکل تر و خشک شدن، عدد CBR نمونه‌های خاک با PI، ۱۳/۱ و ۱۹/۸ به ترتیب ۶۰ و ۷۸ درصد کاهش یافته است. اما در هر صورت پس از اعمال ۴ سیکل تر و خشک شدن بر روی نمونه‌های تثبیت شده عدد CBR نهایی خاک از نمونه تثبیت نشده بیشتر می‌باشد.

- در خاک A مقاومت خاک تثبیت شده در سیکل دوم بیشتر از سیکل اول می‌باشد. این پدیده می‌تواند به این علت باشد که با توجه به بالا بودن غلظت ماده تثبیت‌کننده، عمل تبادل یونی در آغاز سیکل اول به اتمام نرسیده است و تا آغاز سیکل دوم ادامه داشته و به همین علت میزان مقاومت خاک تثبیت شده در سیکل دوم بیش از سیکل اول بدست آمده است. در صورتی که زمان عمل‌آوری افزایش یابد و عمل تبادل یونی کامل شود این احتمال وجود دارد که سیکل‌های یخبندان-ذوب سبب

Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1787) (2002) 61-70.

- [11] S. Rao, B. Reddy, M. Muttharam, The impact of cyclic wetting and drying on the swelling behaviour of stabilized expansive soils, *Engineering geology*, 60(1) (2001) 223-233.
- [12] Y. Guney, D. Sari, M. Cetin, M. Tuncan, Impact of cyclic wetting–drying on swelling behavior of lime-stabilized soil, *Building and Environment*, 42(2) (2007) 681-688.
- [13] S. Khattab, M. Al-Mukhtar, J.-M. Fleureau, Long-term stability characteristics of a lime-treated plastic soil, *Journal of materials in civil engineering*, 19(4) (2007) 358-366.
- [14] K. Harichane, M. Ghrici, W. Khebizi, H. Missoum, Effect of the combination of lime and natural pozzolana on the durability of clayey soils, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15 (2010) 1194-1210.
- [15] Material safety data sheet, CBR Plus Con-Aid, CBR Plus (North American Inc.).
- [16] M. Ghazavi, M. Roustaie, The influence of freeze–thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay, *Cold regions science and technology*, 61(2) (2010) 125-131.
- [17] Radgozar, A.; Sahraeian, R.; Hashemi, A.; Mohammadi, M., “Soil Stabilization with Nanopolymers”, *First National Conference on Engineering and Infrastructure Management*, (2009).
- [18] Effective Soil Stabilization & Dust Control For Roads", *soil stabilization and dust control*, CBR PLUS (North America Inc.).
- [19] F. Chen, Foundation on Expansive Soil, Development in Geotechnical Engineering 12, in, Elsevier, *Scientific Publishing Co.*, New York, USA, 300p, (1975).
- [20] Azar, A., “Soil Science”, Urmia University publication.

کاهش پیوسته در مقاومت نمونه‌های تثبیت شده گردند. بنابراین زمان عمل آوری در تثبیت خاک رسی با PI مختلف حائز اهمیت است.

مراجع

- [1] P. Sherwood, Effect of sulfates on cement-and lime-stabilized soils, *Highway Research Board Bulletin*, (353) (1962).
- [2] J.K. Mitchell, Practical problems from surprising soil behavior, *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(3) (1986) 259-289.
- [3] D. Hunter, Lime-induced heave in sulfate-bearing clay soils, *Journal of geotechnical engineering*, 114(2) (1988) 150-167.
- [4] J.K. Mitchell, D. Dermatas, Clay soil heave caused by lime-sulfate reactions, in: *Innovations and uses for lime, ASTM International*, 1992.
- [5] P. Kota, D. Hazlett, L. Perrin, Sulfate-bearing soils: problems with calcium-based stabilizers, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1546) (1996) 62-69.
- [6] R.S. Rollings, J.P. Burkes, M.P. Rollings, Sulfate attack on cement-stabilized sand, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 125(5) (1999) 364-372.
- [7] D.E. Scholen, Non-standard stabilizers, (1992).
- [8] T. Petry, B. Das, Evaluation of Chemical Modifiers and Stabilizers for Chemically Active Soils—Clays, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1757) (2001) 43-49.
- [9] D.E. Scholen, Stabilizer mechanisms in nonstandard stabilizers, in: *Transportation research board conference proceedings*, 1995.
- [10] R. Santoni, J. Tingle, S. Webster, Stabilization of silty sand with nontraditional additives, *Transportation*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

R. Moayed, Seyed M.H Khatami, F. Allahyari, “Effect of Using Ion Exchange Solution in Increasing Bearing Capacity of Clayey Soils with Various Plasticity Index (PI)”. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(2) (2017) 305-311.
DOI:10.22060/ceej.2015.417



