

تأثیر سیکل های ذوب - یخبندان و تر - خشک شدن در خاک رس دارای سولفات تشبیت شده با محلول تبادل یونی Ca^{+2} CBR

رضا ضیائی مؤید* (دانشیار)

مرضیه السادات میرسجادی (کارشناس ارشد)
گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

سیکل های ذوب - یخبندان و تر - خشک شدن، مشخصات ژئوتکنیکی خاک ها را تحت تأثیر قرار می دهند و منجر به تغییر پارامترهای مقاومت خاک ها می شوند. یکی از خاک هایی که در طی این فرایندهای طبیعی دچار آسیب جدی، همچون افزایش تورم و کاهش مقاومت می شود، خاک رس سولفاته است؛ که با روش های سنتی از جمله تشبیت با آهک به علت تورم زیاد نمی توان آن را بهسازی کرد. در این پژوهش به منظور کاهش اثرات مخرب این فرایندهای طبیعی، خاک رس سولفاته با محلول تبادل یونی Ca^{+2} تشبیت شده است. در ابتدا، مقاومت CBR و تورم خاک تشبیت نشده در سیکل های ذوب - یخبندان و تر - خشک شدن اندازه گیری و سپس همین مراحل برای نمونه های تشبیت شده با Ca^{+2} انجام شده است. از نتایج به دست آمده مشاهده شده است که Ca^{+2} منجر به بهبود مشکل تورم و مقاومت رس سولفاته در حین سیکل های ذوب - یخبندان و تر - خشک شدن می شود. بنابراین می توان نتیجه گرفت که محلول تبادل یونی Ca^{+2} می تواند به عنوان یک تشبیت کننده مناسب و سازگار در خاک های رس سولفاته جهت جایگزینی با مواد سنتی نظیر آهک به کار رود.

واژگان کلیدی: خاک رس دارای سولفات، مقاومت CBR، تورم، تشبیت، محلول تبادل یونی Ca^{+2} .

۱. مقدمه

مقاومت بیشتر در برابر سیکل هاست. [۳] همچنین در پژوهشی در سال ۱۹۸۵، این نتیجه به دست آمده است که کاهش اساسی در مقاومت برشی خاک در سیکل اول ذوب یخبندان رخ می دهد و سیکل های بعدی تأثیر چندانی ندارند. [۴] در بررسی تأثیر سیکل تر - خشک و ذوب - یخبندان در مقاومت کششی خاک تشبیت شده با آهک و خاکستر بادی (۲۰۰۸)، نتایج پژوهش نشان داده است که بیشینه ی مقاومت کششی زمانی حاصل می شود که نسبت آهک به خاکستر بادی ۱ به ۳ باشد. [۵] در سال ۲۰۱۱، نیز تأثیر سیکل های تر - خشک شدن در رفتار توری می باشد. [۶] همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۷ نشان داده شده است که در مناطق سردسیر، عوامل ویژه یی در مشخصات مکانیکی خاک تأثیرگذار هستند. در این زمینه خواص مکانیکی خاک چندین بار تحت اثر تشکیل یخ بین ذرات در طول انجماد و رطوبت اضافی در طول آب شدن قرار گرفته و اثرات مذکور منجر به کاهش قابل توجه ظرفیت باربری خاک شده است. [۷] اعمال سیکل های تر - خشک روی نمونه ی خاک متورم شونده از روش تغییر مکش در دستگاه سه محوری

پژوهشگران زیادی تأثیر سیکل های ذوب - یخبندان و تر - خشک شدن را بر روی خاک های ریزدانه ی رسی تشبیت شده بررسی کرده اند. در سال ۱۳۸۱، در بررسی تأثیر آهک در مقاومت کاتولینیت در سیکل های ذوب - یخبندان و تر - خشک شدن مشاهده شده است که در اولین سیکل، خاک مقاومت خود را از دست می دهد، اما با افزایش تعداد سیکل ها به علت واکنش آهک با سیلیکا و آلومینیوم مقاومت خاک افزایش می یابد. [۱] در بررسی تأثیر سیکل های ذوب - یخبندان در نشست و نفوذ پذیری خاک های ریزدانه ی رسی تشبیت شده با آهک و میکروسیلیس (۲۰۱۱) نیز مشاهده شده است که این سیکل ها باعث افزایش نشست و نفوذ پذیری خاک می شود، اما با افزودن میکروسیلیس خاک عملکرد بهتری را از خود نشان می دهد. [۲] در بررسی اثرات سیکل های تر - خشک شدن در مقاومت فشاری محدود نشده ی نمونه های رسی تشبیت شده با آهک و پوزلان طبیعی (۲۰۱۲)، نمونه های تشبیت شده در مقایسه با نمونه ی تشبیت نشده در طی سیکل ها دچار کاهش مقاومت کمتری شده اند و مشخص شده است که درصد های ۴ و ۶، درصد های بهینه ی آهک برای

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۷، اصلاحیه ۱۳۹۴/۶/۱۴، پذیرش ۱۳۹۴/۶/۲۴.

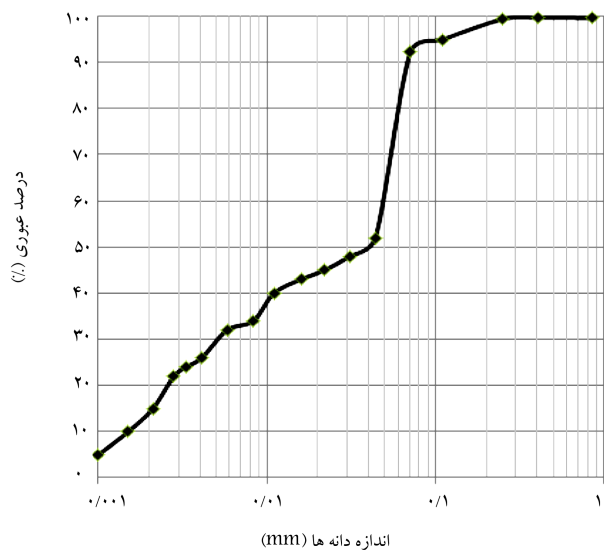
متعارف است و امکان بهسازی این نوع خاک‌ها با تثبیت‌کننده‌های سنتی مانند آهک به علت تشکیل کانی‌های متورم‌شونده اترینگات وجود ندارد و لذا نیازمند استفاده از تثبیت‌کننده‌های جدید عاری از کلسیم برای این نوع خاک‌هاست. همچنین وجه دیگر اهمیت پژوهش حاضر، بررسی اثر وقوع سیکل‌های ذوب - انجماد و تر - خشک شدن در مشخصات خاک رس دارای سولفات و تثبیت‌شده با محلول تبادل یونی CBR^{+4} است، که در شرایط محیطی پروژه حائز اهمیت است.

همان‌طور که در بخش مقدمه‌ی این نوشتار نیز اشاره شده است، در گذشته پژوهش‌های متعددی در ارتباط با بررسی رفتار مکانیکی خاک‌های رس معمولی در زمینه‌های مختلف مانند مقاومت برشی و تورم نمونه‌های خاک اصلی و بهسازی‌شده با تثبیت‌کننده‌های سنتی مانند آهک و پوزولان در اثر اعمال شرایط محیطی مختلف نظیر سیکل‌های ذوب - انجماد و تر - خشک شدن انجام شده است. اما در مورد خاک‌های رس دارای سولفات مطالعات محدودی انجام شده و به‌خصوص در دو مورد اثر استفاده از تثبیت‌کننده‌های جدید مانند محلول تبادل یونی CBR^{+4} و همچنین اثر اعمال شرایط محیطی سیکل‌های ذوب - انجماد و تر - خشک شدن در رفتار این نوع خاک‌ها مطالعاتی صورت نگرفته است، که نوآوری پژوهش حاضر را شامل می‌شود.

۳. مصالح

۱.۳. خاک

خاک مورد استفاده در این پژوهش، خاک ریزدانه‌ی رسی سولفاته در منطقه‌ی بوئین‌زهر، واقع در استان قزوین است، که دارای حد روانی $LL = 28.8$ و حدخمیری $PL = 14.4$ بر حسب درصد است. کد خاک در سیستم یونیفاید CL است. در شکل ۱، نمودار دانه‌بندی خاک نمایش داده شده است. آزمایش دانه‌بندی به روش الک و هیدرومتری مطابق با استاندارد ASTM D 422 انجام شده است. شکل ۲، تصویر SEM تهیه‌شده با میکروسکوپ الکترونی از خاک را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک رسی منطقه‌ی بوئین زهر.

با تحکیم اصلاح‌شده انجام شده و این نتیجه به‌دست آمده است که پتانسیل تورم در نتیجه‌ی چرخه‌های تر - خشک کاهش می‌یابد. [۸] در بررسی خاک رس با نشانه‌های خمیری مختلف و درصد‌های مختلف آهک در آزمایش CBR و سیکل‌های تر - خشک شدن (۱۳۹۲)، نتایج نشان داده است که مقادیر CBR در هر سیکل تر - خشک شدن، در حین مرحله‌ی ترکاهش و در حین مرحله‌ی خشک افزایش می‌یابد. [۹]

همچنین در بررسی اثرات سیکل‌های تر - خشک و ذوب - یخبندان در خاک رس با شاخص‌های خمیری مختلف (۱۲ و ۲۰)، به منظور تثبیت نمونه‌ها از محلول تبادل یونی CBR^{+4} استفاده شده و نتایج نشان داده است که در اثر اعمال سیکل‌های تر - خشک و ذوب - یخبندان، که مقاومت خاک در هر دو حالت تثبیت‌شده و تثبیت‌نشده کاهش می‌یابد، اما این کاهش مقاومت در حالت تثبیت‌نشده شدیدتر است. [۱۰]

در پژوهش دیگری (۱۹۸۴) این نتیجه به‌دست آمده است که پس از یک سیکل ذوب - یخبندان، خاک بیش از نیمی از مقاومت برشی خود را از دست می‌دهد؛ اما سیکل‌های دوم و سوم منجر به تغییرات کمتری بر روی مقاومت خاک خواهد شد. [۱۱]

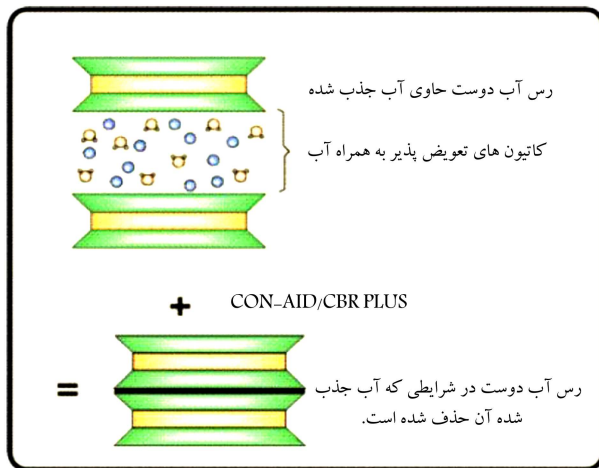
در بررسی رفتار کوتاه‌مدت نمونه‌های خاک رس دارای سولفات (۲۰ و ۱۵)، که با آهک و خاکستر بادی تثبیت شده بودند، این نتیجه به‌دست آمده است که تورم آزاد نمونه‌های خاک رس با ۴٪ سولفات به میزان ۷ تا ۱۸ درصد افزایش و نیز مقاومت فشاری آنها ۶۵٪ کاهش می‌یابد. همچنین اصلاح نمونه‌های خاک رس با آهک موجب تشکیل کانی مخرب اترینگات می‌شود و تورم خاک را افزایش می‌دهد. در صورتی که افزودن خاکستر بادی در حین تثبیت با آهک موجب جلوگیری از تشکیل اترینگات می‌شود، لذا تورم آزاد خاک را کاهش و مقاومت فشاری آن را افزایش می‌دهد. [۱۲]

در بررسی استفاده از یک نوع ژئوپلیمر فاقد کلسیم در تثبیت خاک‌های رسی دارای سولفات (۲۰ و ۱۵)، براساس نتایج به‌دست آمده مشخص شده است که تثبیت خاک رس با ژئوپلیمر فاقد کلسیم منجر به افزایش قابل توجه مقاومت فشاری، مدول ارتجاعی، و کرنش گسیختگی خاک و کاهش میزان تورم نمونه‌های خاک می‌شود و لذا استفاده از ژئوپلیمر فاقد کلسیم می‌تواند به‌عنوان راه‌کار مناسب برای خاک‌های رسی دارای سولفات مطرح باشد. [۱۳]

در بررسی رفتار نمونه‌های خاک رس CL دارای سولفات تثبیت‌شده با پلیمر و آهک (۲۰ و ۱۳)، این نتیجه به‌دست آمده است که با وجود ۴٪ سولفات در خاک رس، مقاومت فشاری نمونه‌ها ۲۵٪ کاهش یافته و با افزودن ۱۰٪ پلیمر به نمونه‌های خاک، مقاومت فشاری آنها پس از یک روز، افزایش ۴۳٪ درصدی از خود نشان داده‌اند. [۱۴]

۲. ضرورت پژوهش

در مورد اهمیت موضوع پژوهش باید به این نکته اشاره کرد که در کشور ایران، موارد متعددی از خاک‌های رس دارای سولفات با تراکم کم و نیازمند بهسازی در پروژه‌های عمرانی و در نقاط مختلف مانند استان‌های: قم، مرکزی، سمنان، و قزوین وجود دارد. مصالح خاکی استفاده‌شده در این پژوهش نیز برگرفته از یک پروژه‌ی اجرایی جاده‌سازی در منطقه‌ی بوئین‌زهر واقع در استان قزوین است، که از خاک رس دارای سولفات تشکیل شده است. در ضمن باید به این موضوع نیز توجه کرد که رفتار خاک‌های رس دارای سولفات متفاوت از خاک‌های رس



شکل ۳. افزایش حجم ذرات رس در نتیجه جایگزینی CBR^{+4} با کاتیون های خاک. [۱۲]

در خاک در مقررات ملی ساختمان مبحث نهم، شرایط محیطی از نظر میزان سولفات در رده ی شدید قرار دارد. [۱۵]

۳.۴. آزمایش تعیین درصد تبادل یونی خاک و تعیین غلظت مورد نیاز محلول CBR^{+4}

برای تعیین میزان تبادل یونی خاک از آزمایش تعیین درصد تبادل یونی خاک استفاده می شود. در این آزمایش، شیوه ی کار بدین صورت است که پس از جداسازی آب حاوی یون های قابل تبادل از خاک به وسیله ی افزودن «معرف» به آن میزان یون های قابل تبادل تعیین می شود.

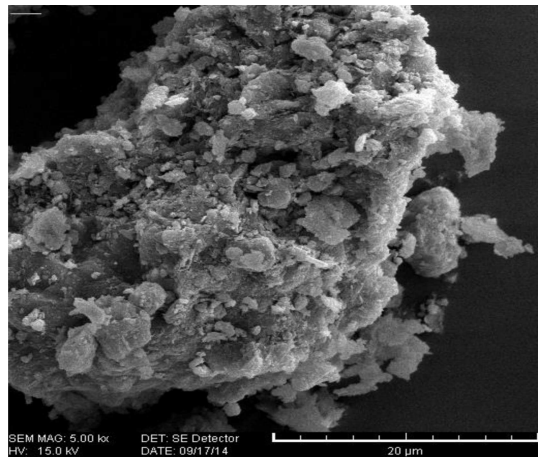
برای این منظور ابتدا در حدود ۵ تا ۶ سی سی از محلول حاوی یون را که از کاغذ صافی گذشته است، در لوله ی آزمایش ریخته و قطره قطره به آن معرف اضافه می شود. در ابتدا محلول در لوله ی آزمایش کدر و سپس اندک اندک با افزایش مقدار ماده ی معرف افزوده شده، رنگ آن روشن تر می شود. معرف باید به اندازه یی به لوله ی آزمایش اضافه شود تا وضوح محلول در لوله ی آزمایش به اندازه یی برسد که بتوان تصویر پشت لوله ی آزمایش را به راحتی دید. نسبت مقدار ماده ی معرف بر حسب میلی لیتر، که به لوله ی آزمایش افزوده شده است، به مقدار آب حاوی یون های قابل جایگزینی (آبی که از کاغذ صافی گذشته است) بر حسب میلی لیتر بیان کننده ی نسبی میزان تبادل یونی خاک است. با توجه به آزمایش انجام شده، غلظت محلول CBR^{+4} برای خاک مورد استفاده ۰/۰۱ است. [۱۶]

۴.۴. آزمایش CBR

آزمایش CBR مطابق با استاندارد ۹۹ - ASTM D 1557 بر روی نمونه های ساخته شده با درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه در حالت اشباع انجام شده است. در نمونه های اشباع، نمونه ها بعد از اتمام فرایند عمل آوری، ابتدا به مدت ۹۶ ساعت جهت اشباع شدن درون آب و پس از پایان این مدت، تحت آزمایش CBR قرار گرفته اند.

۴.۴.۱. عمل آوری نمونه های تثبیت شده با CBR^{+4}

جهت ساخت نمونه های تثبیت شده با CBR^{+4} ، ابتدا محلول CBR^{+4} را با غلظت به دست آمده در آزمایش تبادل یونی، در آب مورد نیاز برای رطوبت بهینه



شکل ۲. تصویر SEM خاک رس سولفاته.

۲.۳. محلول تبادل یونی CBR^{+4}

محلول تبادل یونی CBR^{+4} به نازگی به کشور وارد شده است و به سادگی می توان آن را تهیه کرد و مورد استفاده قرار داد. مشکل عمده یی که بر سر راه استفاده ی گسترده از ماده ی مذکور است، عدم وجود آزمون های آزمایشگاهی استاندارد است که برای پیش بینی عملکرد آن مورد نیاز است. محلول تبادل یونی CBR^{+4} فقط روی رس موجود در خاک تأثیر می گذارد، که به خاطر کوچک بودن و سطح زیاد ذرات رس است. با استفاده از محلول تبادل یونی CBR^{+4} ، یون های مثبت بین صفحات رس از آن جدا می شوند و می توان گفت که در این حالت صفحات رس به یکدیگر چسبیده و دیگر حالت صفحه یی را ندارند و شبیه به یک بلوک یک پارچه عمل می کنند. یون های محلول تبادل یونی CBR^{+4} خود را به سطح رس می چسبانند و جایگزین یون های با ظرفیت کمتر مثل Ca^{2+} و Na^{+} می شوند. با توجه به اینکه محلول تبادل یونی CBR^{+4} دارای بار $+4$ است، می تواند جایگزین ۴ یون سدیم با بار $+1$ و یا جایگزین ۲ یون کلسیم با بار $+2$ و یا ترکیبی از این یون ها شود. استفاده از محلول تبادل یونی CBR^{+4} سبب کاهش تعداد و غلظت کاتیون های خاک می شود و با توجه به اینکه کاتیون ها به حالت اشباع در آب اطراف خود هستند، سبب کاهش حجم آب لایه ی دوگانه می شود. شکل ۳، نحوه ی عملکرد کاتیون ۴ ظرفیتی CBR^{+4} در خاک رس را نشان می دهد.

۴. آزمایش ها

۴.۱. آزمایش تراکم

از آنجایی که هدف ساخت نمونه ها در وزن مخصوص بیشینه ی خشک و رطوبت بهینه بوده است، در ابتدا بر روی خاک، آزمایش تراکم طبق استاندارد ۷۸ - ASTM D 6۸۹ انجام شده است. وزن مخصوص خشک بیشینه ی خاک، ۱۹/۹ کیلونیوتون بر متر مکعب و رطوبت بهینه ی ۱۲٪ به دست آمده است.

۴.۲. آزمایش تعیین میزان سولفات موجود در خاک

به منظور تعیین میزان سولفات موجود در خاک، نمونه ی خاک در آزمایشگاه شیمی مطابق با استاندارد ۰۹ - ASTM C ۱۵۸۰ مورد آزمایش قرار گرفته است. میزان سولفات خاک ۱٪ به دست آمده است. با توجه به جدول رده بندی میزان سولفات ها

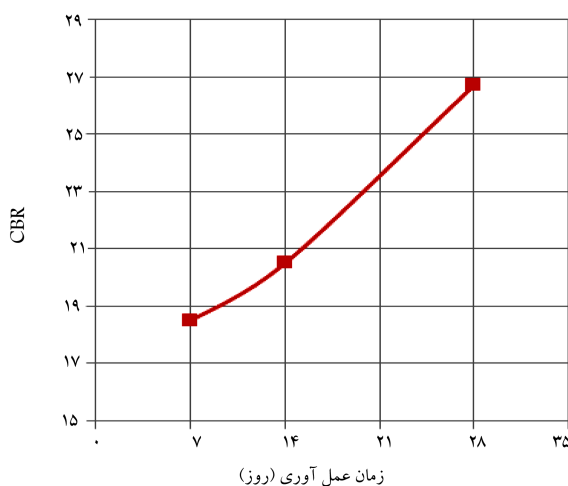
نیست و مقدار کمی تغییرات به محض افزودن به خاک مشاهده می‌شود، ولی در انتهای دوره‌ی تکامل (۲ تا ۴ هفته) خاک محکم و سخت می‌شود. در پژوهش حاضر، خاک رس تثبیت شده با این محلول در سه زمان عمل‌آوری مختلف، که شامل ۷ روزه، ۱۴ روزه، و ۲۸ روزه است، مورد بررسی قرار گرفته تا تأثیر زمان عمل‌آوری بر روی خاک سنجیده شود.

۱.۵.۴. تأثیر زمان عمل‌آوری $CBR^{+۴}$ در مقاومت خاک رس دارای سولفات

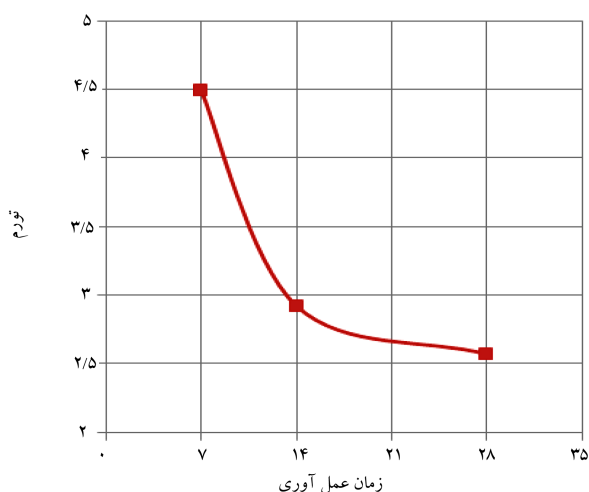
در شکل ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش زمان عمل‌آوری، میزان مقاومت نمونه‌ها نیز افزایش یافته و در زمان عمل‌آوری کامل، میزان مقاومت خاک در مقایسه با نمونه‌ی تثبیت نشده ۴ برابر شده است.

۲.۵.۴. تأثیر زمان عمل‌آوری $CBR^{+۴}$ در تورم خاک رس سولفات

در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش مدت زمان عمل‌آوری، میزان تورم نمونه‌ها کاهش یافته است. پس بهتر است به منظور کاهش اثرات مضر تورم، زمان عمل‌آوری مورد نیاز رعایت شود.



شکل ۵. نمودار آزمایش CBR اشباع نمونه‌های تثبیت شده با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت.



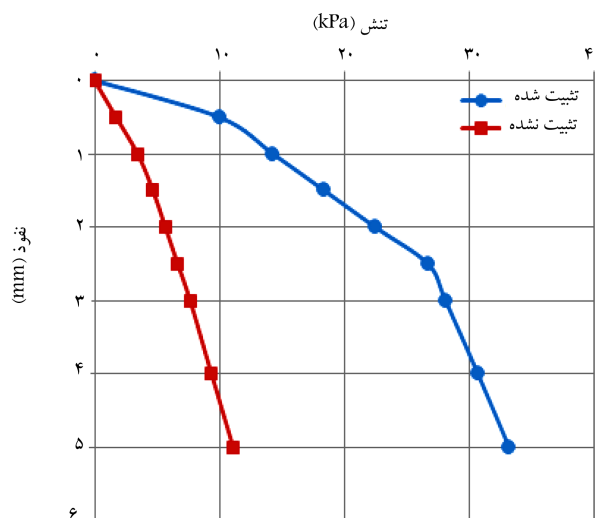
شکل ۶. نتایج آزمایش تورم نمونه‌های تثبیت شده با محلول تبادل یونی.

ریخته و بر روی خاک اسپری شده است، سپس خاک مرطوب شده درون کیسه‌ی ریخته و به مدت ۷۲ ساعت درون محیط آزمایشگاه قرار داده شده است. پس از آن خاک در قالب کوبیده و بدون هیچ پوششی جهت عمل‌آوری در محیط آزمایشگاه قرار داده شده است. عمل‌آوری زمانی کامل می‌شود که نمونه‌ی خاک نیمی از رطوبت خود را از دست بدهد.^[۱۷] این فرایند نیازمند مدت زمانی طولانی است، که در بسیاری از پروژه‌ها صرف این وقت ممکن نیست و می‌توان در زمان کمتری آن را انجام داد. در پژوهش حاضر، نمونه‌های تثبیت شده با محلول $CBR^{+۴}$ با عمل‌آوری کامل مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در شکل ۴، نتیجه‌ی آزمایش CBR نمونه‌ی تثبیت شده با $CBR^{+۴}$ و نمونه‌ی تثبیت نشده نشان داده شده است.

عدد CBR طبق استاندارد ASTM D1883 - 99 و بر مبنای نفوذ ۲/۵ میلی‌متر محاسبه شده است، که به ترتیب برای خاک تثبیت نشده ۶/۶ و خاک تثبیت شده ۲۶/۷ به دست آمده است. در حالت تثبیت نشده با توجه به جدول رده‌بندی خاک‌ها در پروژه‌های راه‌سازی (جدول ۱)، خاک از نظر مقاومتی در رده‌ی بد قرار می‌گیرد و نیازمند به تثبیت است. در حالت تثبیت شده با $CBR^{+۴}$ ، میزان مقاومت خاک ۳ برابر شده و از نظر مقاومتی در رده‌ی خوب قرار گرفته است، که نشان‌گر عملکرد مطلوب این محلول است.

۵.۴. بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری محلول $CBR^{+۴}$

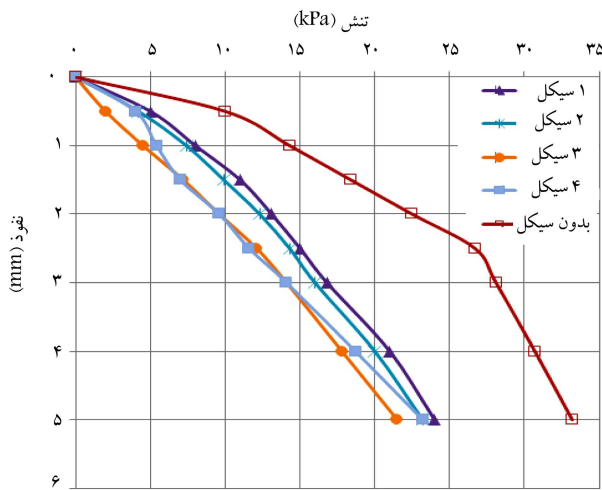
فرایند رساندن محلول تبادل یونی $CBR^{+۴}$ به تمام خاک رس موجود در خاک احتیاج به زمان معین به‌عنوان دوران سبز یا دوره‌ی تکامل دارد. تأثیر $CBR^{+۴}$ آبی



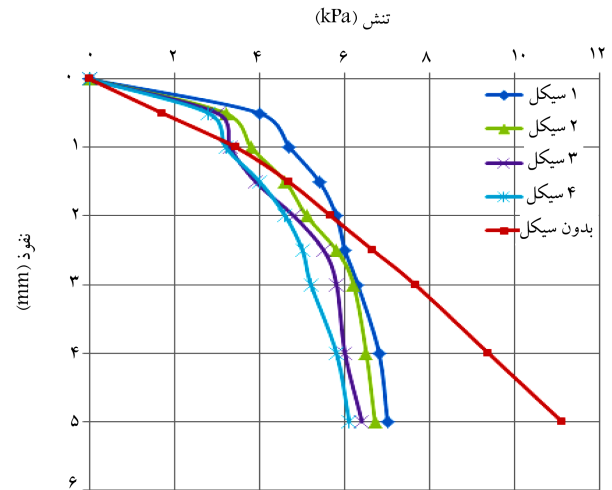
شکل ۴. مقاومت CBR نمونه‌ی تثبیت نشده و تثبیت شده با محلول $CBR^{+۴}$.

جدول ۱. رده‌بندی خاک‌ها در پروژه‌های راه‌سازی براساس CBR.^[۱۷]

مورد استفاده	کیفیت خاک	CBR
خاک بستر	خیلی بد	۰ - ۳
خاک بستر	بد	۳ - ۷
لایه‌ی زیراساس	متوسط	۷ - ۲۰
لایه‌ی زیراساس و اساس	خوب	۲۰ - ۵۰
لایه‌ی اساس	عالی	۵۰



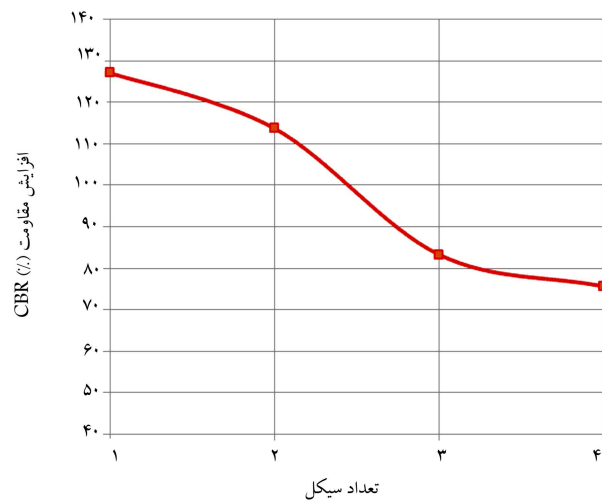
شکل ۸. نمونه‌های تثبیت شده تحت سیکل‌های تر - خشک شدن.



شکل ۷. نمودار سیکل تر - خشک شدن نمونه‌های تثبیت نشده.

جدول ۲. مقاومت CBR خاک تثبیت نشده در سیکل تر - خشک.

تعداد سیکل	۴	۳	۲	۱	۰
CBR	۵	۵٫۵	۵٫۸	۶	۶٫۶



شکل ۹. میزان افزایش مقاومت نمونه‌های تثبیت شده طی سیکل‌های تر - خشک شدن.

جدول ۳. مقاومت نمونه‌های تثبیت شده تحت سیکل‌های تر - خشک شدن.

تعداد سیکل	۴	۳	۲	۱	۰
CBR	۱۱٫۶	۱۲٫۱	۱۴٫۳	۱۵	۲۶٫۷

شدن در شکل ۸ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل‌های تر - خشک شدن، مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با محلول تبادل یونی $CBR^{+۴}$ با روند ملایمی کاهش یافته است، و در همه‌ی سیکل‌ها میزان مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با $CBR^{+۴}$ بیشتر از نمونه‌های تثبیت نشده است (جدول ۳)، که نشان می‌دهد این محلول عملکرد خوبی در سیکل‌های تر - خشک شدن از خود نشان می‌دهد.

در پژوهشی در سال ۱۳۹۱^[۱۸] بر روی نمونه‌های خاک رس بدون سولفات با PI‌های مختلف نیز مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با $CBR^{+۴}$ در همه‌ی سیکل‌های تر - خشک شدن بیشتر از نمونه‌های تثبیت نشده به دست آمده است، که مشابه نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر است.

۳.۶.۴. مقایسه‌ی مقاومت نمونه‌های تثبیت شده‌ی تحت سیکل تر - خشک شدن با نمونه‌ی تثبیت نشده

در شکل ۹، اثر اعمال سیکل‌های تر - خشک شدن در میزان افزایش مقاومت CBR

۶.۴. آزمایش سیکل‌های تر - خشک شدن

برای آزمایش سیکل‌های تر - خشک شدن، طبق استاندارد ۹۹ - ASTM D ۱۸۸۳ نمونه‌ها بعد از اتمام مدت زمان عمل‌آوری کامل، به مدت ۹۶ ساعت درون آب قرار داده شده و سپس جهت سیکل تر - خشک شدن به مدت ۲۴ ساعت از آب خارج شده و در محیط آزمایشگاه جهت از دست دادن رطوبت و سپس ۲۴ ساعت درون آب جهت افزایش رطوبت قرار گرفته‌اند. این فرایند ۲۴ ساعت خارج از آب و سپس ۲۴ ساعت درون آب، یک سیکل تر - خشک را تشکیل می‌دهد. به نمونه‌ها بعد از خارج شدن از آب به مدت ۱۵ دقیقه اجازه‌ی خروج آب داده شده و سپس تحت آزمایش CBR بر طبق استاندارد ۹۹ - ASTM D ۱۸۸۳ قرار گرفته‌اند. بر روی نمونه‌های مختلف، تعداد سیکل‌های متفاوتی انجام شده و در هر سیکل، میزان مقاومت و تورم نمونه مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است.

۱.۶.۴. نمونه‌های تثبیت نشده

نتایج آزمایش CBR بر روی نمونه‌های خاک تثبیت نشده تحت سیکل‌های تر - خشک شدن در شکل ۷ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل‌های تر - خشک شدن، میزان مقاومت نمونه‌های تثبیت نشده‌ی خاک کاهش یافته است (جدول ۲) و نیز همچنین مشاهده می‌شود که میزان مقاومت خاک در این سیکل‌ها بسیار کم بوده و خاک در رده‌ی ضعیف قرار گرفته است.

علت کاهش عدد CBR در سیکل‌های تر - خشک شدن آن است که در مرحله‌ی تر شدن، خاک به منظور تعادل بخشیدن به غلظت یون‌های آب لایه‌ی دوگانه‌ی خود، مقداری آب جذب می‌کند، که این آب جذب شده سبب آن می‌شود که فاصله‌ی بین ذرات رس افزایش یابد. افزایش فاصله‌ی بین ذرات رس سبب کاهش چسبندگی خاک و کاهش میزان مقاومت CBR خاک می‌شود.

۲.۶.۴. نمونه‌های تثبیت شده با $CBR^{+۴}$

نتایج آزمایش‌های CBR بر روی نمونه‌های تثبیت شده تحت سیکل‌های تر - خشک

مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل‌های ذوب - یخبندان، میزان مقاومت نمونه‌های تثبیت‌نشده به شدت کاهش یافته است، که این امر نشان می‌دهد خاک در برابر فرایند ذوب - یخبندان به شدت ضعیف و نیازمند تثبیت است.

۲.۷.۴. نمونه‌های تثبیت‌شده

جهت بررسی تأثیر سیکل‌های ذوب - یخبندان در مقاومت خاک‌های تثبیت‌شده با محلول CBR^{+2} و نیز به منظور تعیین میزان کاهش مقاومت نمونه‌ها در اثر این سیکل‌ها، نمونه‌های تثبیت‌شده پس از طی زمان عمل‌آوری کامل و نیز طی کردن مرحله‌ی اشباع‌سازی به مدت ۹۶ ساعت، تحت سیکل‌های متوالی ذوب - یخبندان قرار گرفته‌اند، که نتایج در شکل ۱۱ و جدول ۵ نمایش داده شده است.

مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل‌های ذوب - یخبندان، میزان مقاومت

نمونه‌های تثبیت‌شده با محلول CBR^{+2} به شدت کاهش یافته است.

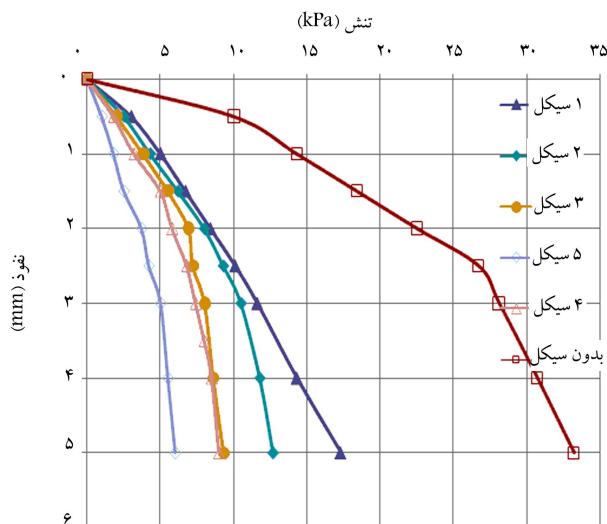
۳.۷.۴. مقایسه‌ی مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده‌ی تحت سیکل ذوب - یخبندان با نمونه‌ی تثبیت‌نشده

در شکل ۱۲، اثر اعمال سیکل‌های ذوب - یخبندان در میزان افزایش مقاومت CBR نمونه‌های خاک تثبیت‌شده نشان داده شده است. لازم به ذکر است که منظور از درصد افزایش مقاومت CBR در مقایسه با حالت تثبیت‌نشده است، که از رابطه‌ی ۲ در هر سیکل قابل محاسبه است:

$$\% \text{ Increase in } CBR_{\text{Cycle-N}} =$$

$$\frac{CBR_{(pIN)}(\text{در حالت تثبیت شده در سیکل}) - CBR_{(\text{در حالت تثبیت نشده})}}{CBR_{(\text{در حالت تثبیت نشده})}} \times 100 \quad (2)$$

با توجه شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل‌های ذوب - یخبندان از راندمان تثبیت‌کننده کاسته شده است، اما در تمامی سیکل‌ها درصد افزایش



شکل ۱۱. مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده با CBR^{+4} در سیکل‌های ذوب - یخبندان.

جدول ۵. مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده با CBR^{+4} در سیکل‌های ذوب - یخبندان.

تعداد سیکل	۵	۴	۳	۲	۱
CBR	۳٫۷	۶٫۸	۷٫۲	۹٫۳	۱۰٫۱

نمونه‌های خاک تثبیت‌شده نشان داده شده است. لازم به ذکر است که منظور از درصد افزایش CBR در مقایسه با حالت تثبیت‌نشده است، که از رابطه‌ی ۱ بصورت زیر در هر سیکل قابل محاسبه است:

$$\% \text{ Increase in } CBR_{\text{Cycle-N}} =$$

$$\frac{CBR_{(\text{در حالت تثبیت شده در سیکل})} - CBR_{(\text{در حالت تثبیت نشده})}}{CBR_{(\text{در حالت تثبیت نشده})}} \quad (1)$$

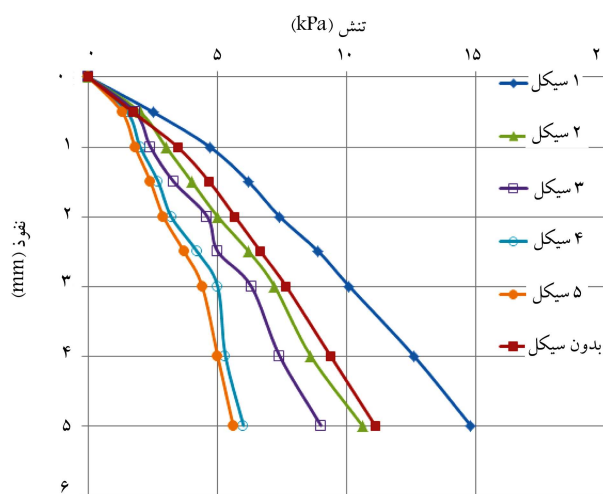
با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که در تمامی سیکل‌ها درصد افزایش CBR مثبت است، که این مسئله با توجه به رابطه‌ی ۱، نشان‌دهنده‌ی مثبت بودن صورت کسر، یعنی بیشتر بودن عدد CBR در حالت تثبیت‌شده به حالت تثبیت‌نشده در تمامی سیکل‌هاست.

۷.۴. آزمایش سیکل‌های ذوب - یخبندان

جهت انجام آزمایش سیکل‌های متوالی ذوب - یخبندان، نمونه‌ها بعد از اتمام مدت زمان عمل‌آوری کامل، به مدت ۹۶ ساعت درون آب قرار گرفته‌اند و سپس جهت یخبندان بعد از خارج کردن از آب به مدت ۲۴ ساعت درون فریزر در دمای $15^{\circ}C$ - قرار گرفته و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای $15^{\circ}C$ - جهت ذوب شدن قرار داده شده‌اند. انتخاب دمای $15^{\circ}C$ - برای یخبندان با توجه به میانگین دمایی استان قزوین در فصل زمستان است. 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 بر طبق استاندارد ۹۹ - ASTM D 1883 قرار گرفته‌اند.

۱.۷.۴. نمونه‌های تثبیت‌نشده

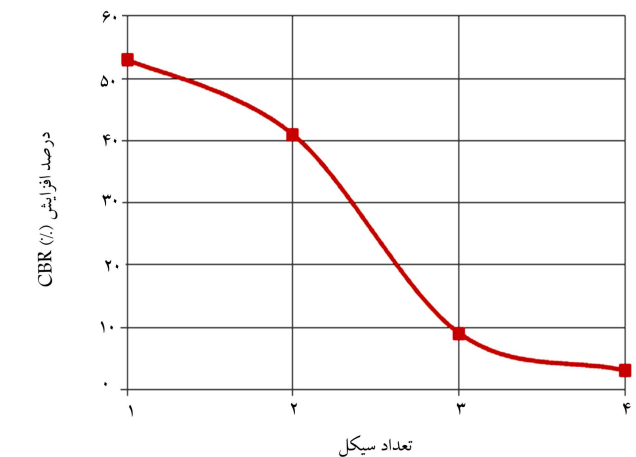
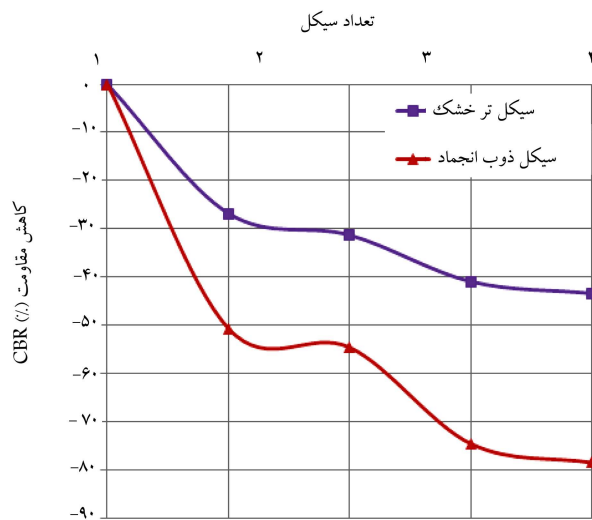
در شکل ۱۰ و جدول ۴، روند تغییرات مقاومت CBR نمونه‌های تثبیت‌نشده با افزایش تعداد سیکل‌های متوالی ذوب - یخبندان بررسی شده است.



شکل ۱۰. مقاومت نمونه‌های تثبیت‌نشده در سیکل‌های ذوب - یخبندان.

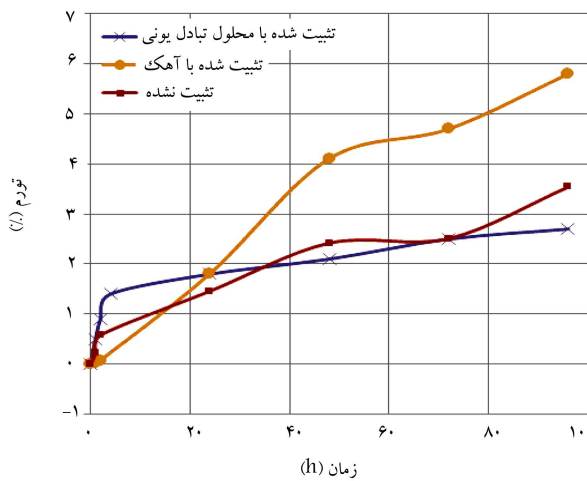
جدول ۴. مقاومت نمونه‌های تثبیت‌نشده در سیکل‌های ذوب - یخبندان.

تعداد سیکل	۴	۳	۲	۱
CBR	۴٫۲	۵	۶٫۲	۸٫۹



شکل ۱۲. میزان افزایش مقاومت نمونه‌های تثبیت شده طی سیکل‌های ذوب - یخبندان.

شکل ۱۳. مقایسه‌ی تأثیر محلول CBR^{+4} در سیکل‌های متوالی ذوب - یخبندان و تر - خشک شدن.



شکل ۱۴. تورم خاک تثبیت نشده، تثبیت شده با CBR^{+4} و تثبیت شده با آهک. جدول ۶. میزان تورم خاک تثبیت نشده، تثبیت شده با CBR^{+4} و تثبیت شده با آهک.

نوع نمونه	میزان تورم (%)
تثبیت نشده	۲٫۷
تثبیت شده با آهک	۶٫۳
تثبیت شده با CBR^{+4}	۲٫۵

۱.۹.۴. تورم نمونه‌های تثبیت نشده، تثبیت شده با آهک، و تثبیت شده با CBR^{+4}

تورم نمونه‌ها در ۳ حالت خاک: تثبیت نشده، تثبیت شده با CBR^{+4} و تثبیت شده با آهک پرداخته شده و نتایج در شکل ۱۴ و جدول ۶ ارائه شده است. مطابق جدول ۶، پس از افزودن آهک به خاک، تورم آن به ۶٫۳ افزایش یافته است. با توجه به طبقه‌بندی ترمی خاک ارائه شده توسط سید (جدول ۷)، نمونه‌ی خاک تثبیت شده با آهک در رده‌ی خاک‌ها با میزان تورم بالا ارزیابی می‌شود. اما خاک تثبیت شده با محلول تبادل یونی CBR^{+4} ، درصد تورم بیشینه‌ی ۲٫۵ دارد، که در حدود ۲٫۵ برابر کمتر از حالت تثبیت با آهک است و خاک را در

CBR مثبت است، که این مسئله با توجه به رابطه‌ی ۲ نشان دهنده‌ی بیشتر بودن عدد CBR در حالت تثبیت شده به حالت تثبیت نشده در تمامی سیکل‌هاست، لذا می‌توان نتیجه گرفت که محلول تبادل یونی CBR^{+4} عملکرد مطلوبی در سیکل‌های ذوب - انجماد دارد و در مناطق سردسیر، تثبیت‌کننده‌ی مناسبی برای خاک‌های متورم شونده‌ی رسی است.

۸.۴. مقایسه‌ی عملکرد خاک تثبیت شده با CBR^{+4} در سیکل

ذوب - یخبندان و تر - خشک شدن

در ادامه، به بررسی و مقایسه‌ی میزان تأثیر سیکل‌های متوالی ذوب - انجماد و تر - خشک شدن به طور هم‌زمان بر روی خاک تثبیت شده پرداخته شده است، تا مشاهده شود که کدام یک از این سیکل‌ها تأثیر مخرب‌تری در مقاومت خاک تثبیت شده خواهد گذاشت.

با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که در همه‌ی سیکل‌ها میزان درصد کاهش مقاومت در فرایند ذوب - انجماد بیشتر است. این نمودار بیان‌گر آن است که نمونه‌های تثبیت شده با محلول تبادل یونی CBR^{+4} در برابر فرایند ذوب - انجماد آسیب‌پذیرتر است و این محلول کارایی بهتر و مناسب‌تری در سیکل‌های تر - خشک شدن دارد.

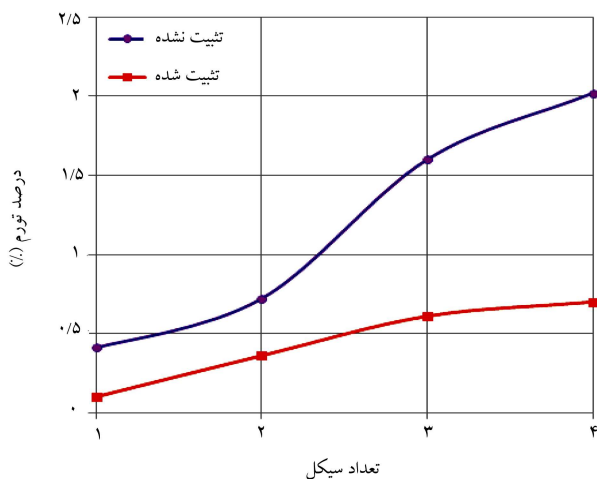
علت کاهش فاحش مقاومت در نمونه‌های تحت سیکل‌های متوالی ذوب - یخبندان این است که در مرحله‌ی انجماد، حجم آب بین منافذ و به تبع آن حجم کل نمونه‌ی خاک افزایش می‌یابد. ولی در مرحله‌ی ذوب، حجم کاهش نمی‌یابد و نمونه‌ی خاک حالت متخلخل ایجاد می‌کند. این تخلخل سبب می‌شود که خاک در حین آزمایش CBR مقاومت کمتری از خود نشان دهد.

۹.۴. تورم

مشکل اساسی که در تثبیت خاک‌های رسی سولفات با تثبیت‌کننده‌های سنتی مانند آهک با پایه‌ی کلسیمی وجود دارد، بحث تورم زیاد این خاک‌هاست. آلومینای خاک رس با کلسیم موجود در ماده‌ی تثبیت‌کننده و سولفات موجود در خاک واکنش می‌دهد و کانی متورم‌شونده‌ی به نام اترنگایت را تشکیل می‌دهد، که در حضور آب به شدت تورم‌زا است. لذا استفاده از آهک در خاک‌های رس سولفات، مؤثر نیست و استفاده از محلول تبادل یونی CBR^{+4} می‌تواند مطرح باشد.

جدول ۷. طبقه‌بندی خاک‌ها براساس میزان تورم (سید (۱۹۶۲) [۱۹]).

میزان تورم (%)	درجه تورم خاک
۰ - ۱٫۵	کم
۱٫۵ - ۵	متوسط
۵ - ۲۵	بالا
> ۲۵	خیلی بالا



شکل ۱۶. نمودار آزمایش تورم تحت سیکل‌های تر - خشک شدن.

در برابر سیکل‌های ذوب - یخبندان در افزایش تورم خاک شده است. همچنین با توجه به نمودار مشخص است که در کلیه سیکل‌های ذوب - یخبندان، میزان تورم نمونه‌های تثبیت‌شده با محلول تبادل یونی کمتر از تورم نمونه‌های خاک تثبیت‌نشده است.

۳.۹.۴. تورم در اثر سیکل‌های تر - خشک شدن

در شکل ۱۶، به بررسی تأثیر سیکل‌های تر - خشک شدن در تورم نمونه‌های تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده با محلول تبادل یونی $CBR^{+۴}$ پرداخته شده است. مطابق شکل ۱۶، روند افزایش تورم در نمونه‌های تثبیت‌نشده با افزایش تعداد سیکل‌های تر - خشک شدن، شدید بوده و این روند در همه سیکل‌ها صعودی است. در نمونه‌های تثبیت‌شده با محلول تبادل یونی $CBR^{+۴}$ ، با افزایش سیکل‌های تر - خشک شدن، میزان تورم نیز افزایش یافته است؛ اما این روند افزایش در مقایسه با نمونه‌های تثبیت‌نشده کمتر و نیز روند افزایش ملایم‌تر است. همچنین در کلیه سیکل‌های تر - خشک شدن میزان تورم نمونه‌های تثبیت‌شده کمتر از نمونه‌های تثبیت‌شده با $CBR^{+۴}$ است و این اختلاف به خصوص در سیکل‌های بالاتر کاملاً مشهود است.

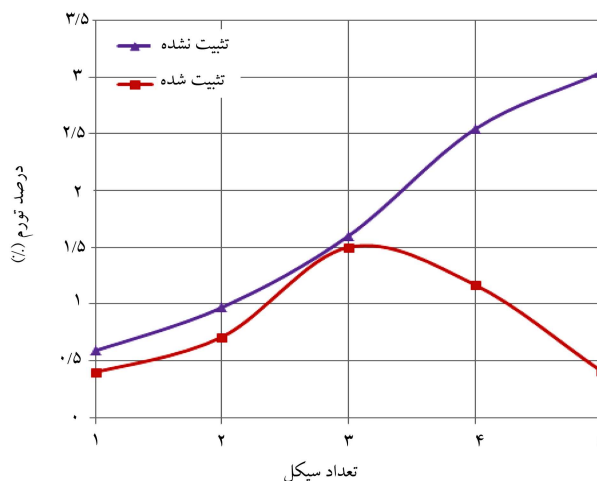
همچنین در مطالعات انجام‌شده دیگری بر روی خاک‌های رسی نیز این نتیجه به دست آمده است که چرخه‌های متوالی تر - خشک شدن موجب افزایش تورم خاک خواهد شد، که در تطابق با نتایج پژوهش حاضر است. [۲۱-۲۳]

در ادامه، نتایج بررسی مقایسه‌ی تأثیر سیکل‌های ذوب - یخبندان و تر - خشک شدن بر روی تورم نمونه‌های تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده با محلول تبادل یونی $CBR^{+۴}$ ارائه شده است.

۴.۹.۴. مقایسه‌ی تورم نمونه‌های تثبیت‌شده با $CBR^{+۴}$ در سیکل‌های ذوب - یخبندان و تر - خشک شدن

در شکل ۱۷، تأثیر سیکل‌های ذوب - یخبندان و تر - خشک شدن بر روی تورم نمونه‌های تثبیت‌شده با محلول تبادل یونی $CBR^{+۴}$ به صورت مقایسه‌ی ارائه شده است.

مطابق شکل ۱۷، میزان افزایش تورم نمونه‌ها در سیکل‌های ذوب - یخبندان در ابتدا افزایش می‌یابد، اما با افزایش تعداد سیکل‌ها، میزان افزایش تورم در فرایند ذوب - یخبندان رو به کاهش رفته و خاک دچار نوعی مقاومت در برابر فرایند مذکور شده است. اما در سیکل‌های تر - خشک شدن با افزایش تعداد سیکل‌ها، تورم همچنان رو به افزایش می‌رود.



شکل ۱۵. نمودار آزمایش تورم تحت سیکل‌های ذوب - یخبندان.

رده‌ی تورمی متوسط قرار می‌دهد، که تغییر خوب و قابل توجهی است. لذا می‌توان چنین نتیجه گرفت که استفاده از محلول $CBR^{+۴}$ نسبت به آهک سبب کاهش قابل توجه تورم خاک شده است و لذا استفاده از محلول تبادل یونی $CBR^{+۴}$ برای تثبیت و کنترل تورم خاک‌های رسی دارای سولفات می‌تواند گزینه‌ی مناسبی باشد.

در پژوهش انجام‌شده دیگری (۱۳۹۰) [۲۰] بر روی خاک رس تثبیت‌شده با آهک در معرض پوزلان مشاهده شده است که با افزودن آهک چه در مقدار کم و چه در مقدار زیاد به خاک رس دارای سولفات میزان تورم خاک افزایش پیدا کرده است، که در تطابق با نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر است.

۲.۹.۴. تورم در اثر سیکل‌های ذوب - یخبندان

در شکل ۱۵، میزان تورم نمونه‌های تثبیت‌نشده و نمونه‌های تثبیت‌شده با محلول تبادل یونی $CBR^{+۴}$ در طی سیکل‌های متوالی ذوب - یخبندان با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

با توجه به شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که در نمونه‌های تثبیت‌نشده، میزان تورم نمونه‌ها با افزایش تعداد سیکل‌ها نیز به شدت افزایش یافته و این روند همچنان صعودی است. این نتیجه در تطابق با پژوهش انجام‌گرفته دیگری (۲۰۰۶) [۱۷] در خصوص افزایش تورم نمونه‌های رسی تثبیت‌نشده در اثر اعمال سیکل‌های ذوب انجاماد است.

در نمونه‌های تثبیت‌شده تا سیکل سوم، با افزایش تعداد سیکل‌های ذوب - یخبندان، تورم نمونه‌ها نیز افزایش یافته است. اما از سیکل سوم به بعد، این روند رو به کاهش رفته و میزان تورم در سیکل پنجم به شدت کاهش یافته است، که این امر نشان می‌دهد که افزودن این تثبیت‌کننده‌ی پلیمری به خاک منجر به افزایش مقاومت خاک

نوع در ترکیب شیمیایی و نوع کانی خاک‌های رسی در نقاط مختلف، این نتیجه‌گیری می‌تواند مورد بررسی دقیق‌تر در شرایط خاص هر منطقه قرار گیرد.

عدد CBR خاک تثبیت‌شده با CBR^{+4} ، ۲۶/۶ است، که مقاومت آن در مقایسه با خاک تثبیت‌نشده افزایش ۴ برابری داشته است، که بیان‌گر عملکرد خوب ماده‌ی ذکرشده در ارتباط با مقاومت خاک است.

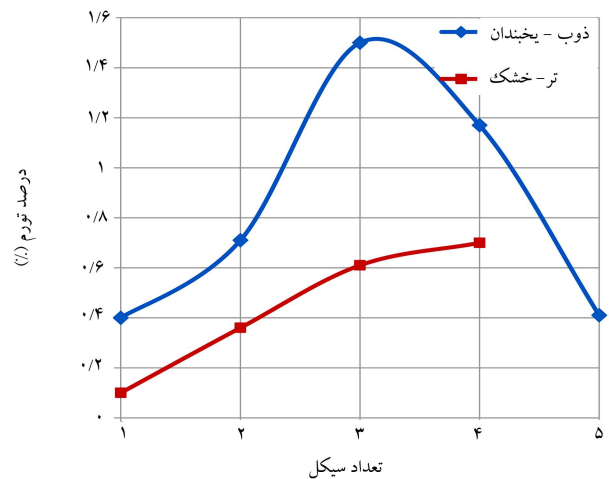
میزان تورم خاک تثبیت‌شده با CBR^{+4} ، ۲/۵٪ است، که در مقایسه با میزان تورم خاک تثبیت‌شده با آهک، که ۶/۲٪ است، ۱۳۰٪ کاهش یافته است؛ لذا می‌توان از دیدگاه کنترل تورم از محلول CBR^{+4} در تثبیت خاک رس دارای سولفات بهره جست. در مورد اهمیت این موضوع باید اشاره شود که در برخورد با خاک‌های رسی با باربری کم (عدد CBR پایین)، عموماً اولین روش مطرح جهت استفاده‌ی عوامل اجرایی پیمانکار، استفاده از روش سنتی تثبیت با آهک است، که به علت تشکیل کانی مخرب اترینگات موجب تورم بالا و عدم کارایی این روش در خاک رس دارای سولفات می‌شود، که این مشکل در مورد خاک پروژه‌ی بررسی‌شده در پژوهش حاضر نیز مشاهده شده است. لذا در صورت بی‌توجهی به این مسئله، ایجاد تورم زیاد موجب تخریب روسازی جاده پس از اجرا خواهد شد. در همین راستا، نتایج آزمایش‌های انجام‌شده نشان داده است که در صورت استفاده از محلول تبادل یونی CBR^{+4} در تثبیت خاک رس دارای سولفات، مشکل تورم کنترل خواهد شد. اعمال ۵ سیکل ذوب - یخبندان در نمونه‌های تثبیت‌شده با محلول CBR^{+4} منجر به کاهش ۸۶٪ مقاومت CBR نمونه‌ها شده و در حالت تثبیت‌نشده میزان مقاومت نمونه‌ها در ۴ سیکل ذوب - یخبندان ۵۷٪ کاهش یافته است.

اعمال ۴ سیکل تر - خشک شدن سبب کاهش ۲۴٪ مقاومت CBR در نمونه‌های تثبیت‌نشده و ۵۶٪ کاهش مقاومت CBR در نمونه‌های تثبیت‌شده با CBR^{+4} شده است.

در نمونه‌های تثبیت‌شده با CBR^{+4} ، درصد کاهش مقاومت نمونه‌ها در سیکل‌های ذوب - یخبندان و تر - خشک شدن در مقایسه با نمونه‌های تثبیت‌نشده قابل توجه است، که نشان می‌دهد این محصول در مناطق بارانی و با امکان تغییرات فاحش آب زیرزمینی باید با دقت بیشتری مورد مصرف قرار گیرد.

کاهش مقاومت CBR خاک رس دارای سولفات تثبیت‌شده با CBR^{+4} در سیکل‌های ذوب - یخبندان، ۸۶٪ و در سیکل‌های تر - خشک شدن، ۵۶٪ است؛ که نشان می‌دهد این محلول در فرایند ذوب - یخبندان عملکرد ضعیف‌تری دارد. در همه‌ی سیکل‌های ذوب - یخبندان و تر - خشک شدن، میزان تورم نمونه‌های تثبیت‌نشده بیشتر از نمونه‌های تثبیت‌شده با CBR^{+4} بوده است.

میزان تورم خاک تثبیت‌شده با CBR^{+4} در سیکل‌های ذوب - یخبندان بیشتر از سیکل‌های تر - خشک شدن بوده است، اما با افزایش تعداد سیکل‌ها، میزان تورم خاک در ذوب - یخبندان روندی نزولی را طی کرده است، ولی تورم در سیکل‌های تر - خشک شدن همچنان روندی صعودی داشته است.



شکل ۱۷. مقایسه‌ی تأثیر سیکل‌های متوالی ذوب - یخبندان و تر - خشک شدن در تورم نمونه‌های تثبیت‌شده با CBR^{+4} .

مشاهده می‌شود که نمونه‌های تثبیت‌شده در اثر سیکل‌های تر - خشک شدن افزایش تورم داشته‌اند، که نشان می‌دهد در مناطق بارانی و با امکان تغییرات آب زیرزمینی محلول تبادل یونی CBR^{+4} با دقت بیشتری مورد مصرف قرار گیرد.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تأثیر تثبیت‌کننده‌ی سنتی آهک و تثبیت‌کننده‌ی مدرن CBR^{+4} در رفتار خاک رس سولفات پودخته و در ابتدا مقاومت و تورم خاک تثبیت‌نشده اندازه‌گیری شده و سپس مقاومت و تورم خاک تثبیت‌شده با آهک و CBR^{+4} مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است. همچنین به بررسی تأثیرات سیکل‌های ذوب - یخبندان و تر - خشک شدن در رفتار خاک رس سولفات تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده با CBR^{+4} پرداخته شده است. نتایج حاصل از پژوهش حاضر در ادامه ارائه شده است.

خاک تثبیت‌نشده، عدد CBR اشباع ۶/۶ دارد و از نقطه نظر کارایی خاک‌ها در پروژه‌های راه‌سازی در رده‌ی بد قرار دارد و نیازمند تثبیت است.

نمونه‌ی خاک رس دارای سولفات تثبیت‌نشده، تورم ۲/۵٪ دارد. میزان تورم در نمونه‌ی تثبیت‌شده با آهک ۶/۳٪ است، که نشان می‌دهد میزان تورم ۲/۵ برابر افزایش یافته است. لذا استفاده از آهک در تثبیت خاک رس دارای سولفات بررسی‌شده در پژوهش حاضر (خاک رس منطقه‌ی بوئین‌زهر) مفید نیست. بدیهی است با توجه به

منابع (References)

1. Tabarsa, A. and Abdi, M. "The effect of Lime on soil resistance against freezing-melting kaolinite", *3rd International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Iran* (2002).

2. Mostar, M., Olapour, M. and Gaffari, M. "The effect of freezing cycles on stabilized soil with lime and microsilica", *6th National Congress of Civil Engineering* (2011).
3. Harichane, K., Ghrici, M., Khebizi, W. and Missoum, H. "Effect of the combination of lime and natural pozzolana on the durability of clayey soils", *EJGE*, **15**, pp. 1194-1210 (2010).

4. Yong, R., Boonsinsuk, P. and Yin, C. "Alteration of soil behaviour after cyclic freezing and thawing", *Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing*, Sapporo, Japan, pp. 187-195 (1985).
5. Soni, D. and Jain, A. "Effect of freezing-thawing and wetting-drying on tensile strength of lime-fly ash stabilized by black cotton soil", *12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, Goa, India, pp. 1-6 (2008).
6. Popescu, M. "Behavior of expansive soils with a crumb structure", *4th International Conference on Expansive Soils*, Denver, pp. 158-171 (1980).
7. Wang, D., Ma, W., Niu, Y., Chang, X. and Wen, Z. "Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay", *Cold Regions Science and Technology*, **48**(1), pp. 34-43 (2007).
8. Mogaddas, M., Raeesi, A. and Abdolahi, J. "Swell-Shrinkage paths of a swelling soil in wetting and drying cycles with saline water", *Journal of Soil and Water Science*, **22**(3), pp. 129-138 (2012).
9. Naeini, A., Golampour, N. and Najmossadat, A. "The effect of wet - dry cycles and plastic index on clay stabilized by lime", *Journal of Engineering Geology*, **9**(2), pp. 2817-2840 (2015).
10. Ziaie Moayed, R. and Allahyari, F. "Determination of required ion exchange solution for stabilizing clayey soils with various PI", *World Academy of Science, Engineering and Technology Journal*, **61**(1), pp. 1098-1102 (2012).
11. Formanek, G.E., McCool, D.K. and Papendick, R.I. "Freeze thaw and consolidation effects on strength of a wet silt loam", *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **27**(6), pp. 1749-1752 (1984).
12. Mohammed, A. and Vipulanandan, C. "Testing and modeling the short-term behavior of lime and fly ash treated sulfate contaminated CL soil", *Geotechnical and Geological Engineering*, **33**(4), pp. 1099-1114 (2015).
13. Zhang, M., Zhao, M., Zhang, G., Nowak, P., Coen, A. and Tao, M. "Calcium-free geopolymer as a stabilizer for sulfate-rich soils", *Applied Clay Science*, **108**(5), pp. 199-207 (2015).
14. Vipulanandan, C. and Mohammed, A. "Characterization the behavior of polymer & lime treated sulfate contaminated CL soil", *Proceedings of CIGMAT*, Houston, USA (2013).
15. Iran National Building Regulations, *Design and Construction of Reinforced Concrete Structures* (2013).
16. *Guidelines for the CON-AID CBR Plus Soil Stabilizer*, Soil Stabilization and Dust Control, CBR PLUS (North America Inc.) (2013).
17. Management and Planning Organization of Iran, *Instruction of Pavement of Roads and Embankment Layers Stabilization*, No. 286 (2003).
18. Allahyari, F. "Effect of using ion exchange solution in increasing bearing capacity of clayey soils with various plasticity index (PI) by the use of nano technology in CBR test", A Thesis Submitted to the Department of Technical and Engineering of Imam Khomeini International University (2012).
19. Seed, M.B., Woodward, R.J. and Lundgren, R. "Prediction of swelling potential of compacted soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE*, **88**(3), pp. 53-88 (1962).
20. Pashabavandpouri, M.A. "Pozzolan effect on compression and swelling properties of the stabilized sulfated clays", *6th National Congress of Civil Engineering*, Semnan, Iran (2011).
21. Bolouri Bazzaz, J. and Sajedi, K. "Mechanical behavior of gypsum soils and the effects of cycles of wetting and drying and cycles of loading and unloading on their properties", A Thesis Submitted to the Department of Technical and Engineering of Tabriz University (2008).
22. Day, R.W. "Swell-shrink behavior of expansive compacted clay", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **120**(3), pp. 618-623 (1994).
23. Guney, Y., Sari, D., Cetin, M. and Tuncan, M. "Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil", *Building and Environment*, **42**(2), pp. 681-688 (2007).