تأثیر محلول SSR400 بر خواص مهندسی بستر روسازی‌های آسفالتی

محمدحسن میرابی مقدم*، استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان،ایران

احمد گلی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان،اصفهان،ایران

فرهاد شهرکی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد راه و ترابری، اصفهان،ایران

Email: mhmirabi@eng.usb.ac.ir

دریافت: ۹۵/۰۳/۲۲ – پذیرش: ۹۶/۰۱/۰۱

چکیده

در این مقاله، تأثیر یک نوع ماده تثبیت‌کننده، موسوم به "محلول SSR400" که از شورابه کویر مرکزی ایران حاصل شده و سرشار از محلول کلرید کلسیم و کلرید منیزیم می‌باشد، بر بهبود مقاومتی و تورم خاک بستر ریزدانه (خاک‌های لای‌دار و رس-دار) روسازی‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، از خاک بستر چندین راه فرعی واقع در منطقه سیستان ایران نمونه‌برداری شده و با انتخاب درصدهای مختلف (بین ۱۲/۵ تا ۲۲/۵ درصد) محلول SSR400، نمونه‌هایی از خاک به روش استاندارد تهیه شده و تحت آزمایش‌های درصد تراکم، درصد رطوبت، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، مقاومت فشاری تک‌محوری (UC) و حدود آتربرگ (حد روانی و حد خمیری) قرار گرفتند. نتایج نشان داد که استفاده از محلول SSR400 به‌عنوان یک ماده تثبیت‌کننده، ظرفیت باربری خاک‌های لای‌دار و رس‌دار را افزایش داده، اما در کنترل میزان تورم از کارایی لازم برخوردار نمی‌باشد. بعلاوه، مناسب‌ترین میزان اختلاط محلول یاد شده با خاک لای‌دار ۱۶/۵ درصد و برای خاک رس‌دار حدود ۱۴/۵ درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: محلول SSR400، کلرید منیزیم، آزمایش CBR، آزمایش تک‌محوری، روسازی آسفالتی

۱. مقدمه

اصلاح مناسب خاک‌های مشکل‌آفرین و آماده‌سازی بستر طبیعی راه برای اطمینان از دوام درازمدت روسازی بسیار مهم و فراهم ساختن یک خاک یکدست به لحاظ رده‌بندی بافت، رطوبت و وزن واحد حجم در سطح بستر روسازی، اهمیت زیادی دارد (نیازی، ۱۳۹۰). برای بهبود بخشیدن مقاومت و کاستن از تأثیر تغییرات آب-وهوایی بستر طبیعی راه بر عملکرد روسازی، معمولاً از فن تثبیت خاک استفاده می‌شود که در آن مواد تثبیت-کننده به دو نوع سنتی و مدرن تقسیم‌بندی می‌گردند (لطیفی و همکاران، ۲۰۱۵a). مواد تثبیت‌کننده سنتی اغلب آهک، سیمان، زئولیت، گچ، ضایعات صنعتی و خاکستر بادی بوده (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۰) و تثبیت‌کننده‌های مدرن نیز شامل آنزیم‌ها، پلیمرهای مایع، رزین‌ها، اسیدها، سیلیکات‌ها، یون‌ها و مشتقات گیاهی می‌باشند که به دو شکل پودر و مایع غلیظ مصرف می-شوند (هورپیبولسوک و همکاران، ۲۰۱۶). هنگام ترکیب

مواد تثبیت‌کننده با خاک، یک سری واکنش‌های پوزولانی، تبادل کاتیونی، فولکولی، کربناته، بلوری شدن و تجزیه به‌وقوع می‌پیوندد که این امر موجب تقویت و بهبود خاک‌های ریزدانه می‌گردد (گُنگ، ۲۰۰۵)]. بعلاوه، از آنجا که مشکلات اصلی این خاک‌ها را مقاومت کم، انقباض زیاد، شکست سریع و پایداری نامناسب در حضور آب تشکیل می‌دهند، فرایند مذکور پیوند بین دانه‌های خاک را تقویت نموده و ضمن پر کردن فضای خالی، مقاومت و سفتی خاک مورد نظر را افزایش می‌دهد (بل، ۱۹۹۵).

محلول SSR400 به‌عنوان یک ماده تثبیت‌کننده مدرن، ترکیبی از کلرید کلسیم و کلرید منیزیم می‌باشد. مطالعات سال‌های اخیر نشان داده که کلرید منیزیم از توانایی لازم جهت تثبیت مواد رویه و کنترل ذرات بی-دوام برخوردار بوده است (لطیفی و همکاران، ۲۰۱۵b) و همچنین قادر است تورم خاک‌های ریزدانه بستر روسازی را مهار و مقاومت این خاک‌ها را افزایش دهد (تُرکوز و توسان، ۲۰۱۱). علاوه بر این، هگزا هیدرات کلرید منیزیم در رویه‌های آسفالتی و بتنی به منظور کنترل گرد و غبار، رطوبت، به حداقل رساندن پراکندگی ذرات درشت و ممانعت از یخ زدن سطح رویه‌های آسفالتی و بتنی راه کاربرد داشته (Thenoux، ۲۰۰۲) و از ترکیب کلرید منیزیم آن نیز در کشورهای آمریکای شمالی، اسکاندیناوی و اروپا به‌عنوان یک ماده تثبیت‌کننده سبز برای رویه راه‌ها استفاده شده است (Canada، ۲۰۰۱).

در این تحقیق، با استفاده از محلول تجاری SSR400، رفتار خاک‌های لای‌دار و رس‌دار تحت تثبیت، با انجام آزمایش‌هایی روی نمونه‌هایی که از اختلاط این خاک‌ها با درصدهای مختلفی از محلول یاد شده تهیه شده‌اند، بررسی و نتایج حاصل مورد بحث قرار گرفته است.

۲. انتخاب مصالح و برنامه آزمایشگاهی

۲-۱. نمونه‌های خاک

نمونه‌های خاک از دشت سیستان واقع در استان سیستان و بلوچستان تهیه شده است. علت انتخاب این منطقه جهت برداشت نمونه‌های خاک، سه عامل وسیع بودن دشت، ریزدانه بودن خاک بستر و نبود مصالح مناسب بوده است. مطابق با تحقیقات انجام شده، دشت سیستان فروافتادگی تکتونیکی است که به همراه قسمت‌های شرق آن در افغانستان تحت عنوان دلتای هیرمند در آخرین دوران زمین‌شناسی، به علت حرکات فاز کوه-زایی آلپی رسوبات انباشته شده و با آبرفت‌های حاصل از رودخانه هیرمند پُر و به شکل کنونی پدید آمده است. ضخامت رسوبات دشت سیستان در اطراف شهر زابل حدود ۲۵۰۰ متر از سنگ بستر تخمین زده شده است (حسینی و همکاران، ۱۳۹۲). طبقه‌بندی خاک این دشت که بر اساس سیستم متحد انجام گرفته است در جداول ۱ و ۲ و منحنی‌های دانه‌بندی خاک‌های موجود در این دشت که عمدتاً لای و رس می‌باشند در شکل‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

۲-۲. محلول SSR400

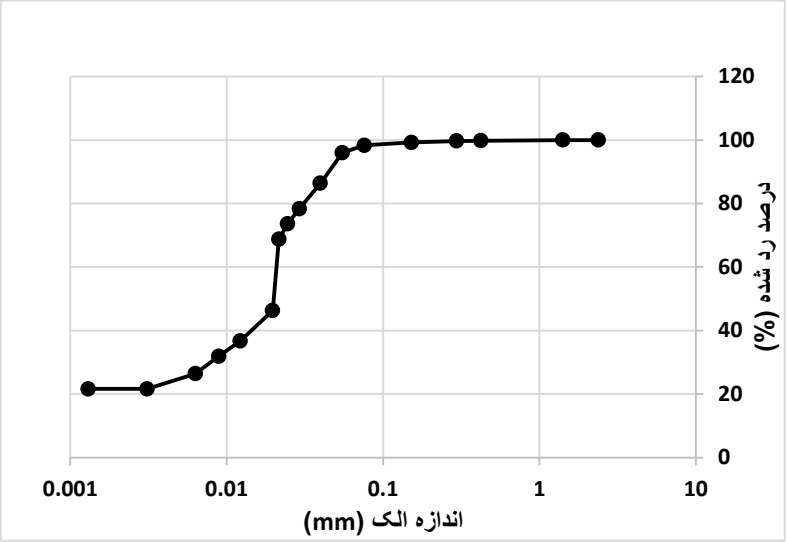
محلول مورد استفاده در این مطالعه، از مجتمع پتاس خور و بیابانک اصفهان تهیه شده است. این محلول از تبخیر شورابه کویر مرکزی ایران حاصل می‌شود. بدین ترتیب که برای حذف نمک از محلول، شورابه به استخرهای تبخیر خورشیدی پمپاژ و در آنجا با افزایش دانسیته شورابه، نمک آن حذف و محلولی غنی از کلرید کلسیم و کلرید منیزیم به دست می‌آید. دانسیته این محلول ۱/۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است و سایر مشخصات آن که از مجتمع پتاس خور و بیابانک اصفهان دریافت شده است، به شرح جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۱. مشخصات خاک بستر روسازی راه فرعی زابل

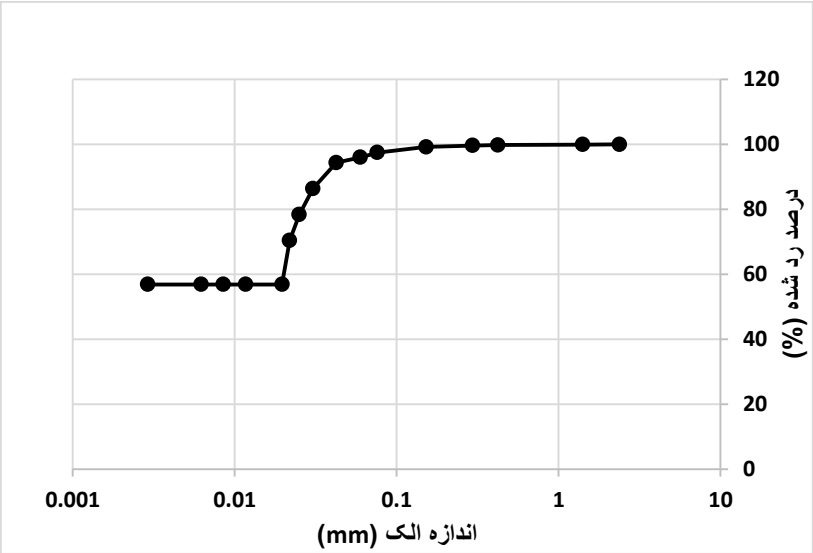
مشخصات خاک	مقدار
الف) دانه‌بندی	
شن	–
ماسه	٪۱/۷
لای	٪۷۶/۶۷
رس	٪۲۱/۶۳
ب) حدود آتربرگ	
حد روانی	٪۲۸/۷
حد خمیری	٪۲۳/۸۶
شاخص خمیری	٪۴/۸۴
ج) وزن مخصوص (gr/cm^3)	۱/۸
د) طبقه‌بندی خاک	ML

جدول ۲. مشخصات خاک بستر روسازی راه فرعی زهک

مشخصات خاک	مقدار
الف) دانه‌بندی	
شن	–
ماسه	٪۵/۵
لای	٪۳۶/۵
رس	٪۵۸
ب) حدود آتربرگ	
حد روانی	٪۴۳/۸
حد خمیری	٪۲۳/۲۱
شاخص خمیری	٪۲۰/۶
ج) وزن مخصوص (gr/cm^3)	۱/۸۸
د) طبقه‌بندی خاک	CL



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی لای



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی رس

جدول ۳. مشخصات محلول SSR400

ترکیبات و مشخصات	گرم در لیتر	درصد وزنی
H_2O	۷٤۲	۵۱/۲
$CaCl_2$	٤۳۵	۳۰
$MgCl_2$	۲۱۷	۱۵
KCl	۵	۰/۳٤
NaCl	۵	۰/۳٤
$Ca(NO_3)_2$	٤۵	۳/۱
چگالی	۱/٤۵ (gr/cm^3)	

۲-۳. فرایند ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌ها، ابتدا نمونه‌های خاک به منظور حذف رطوبت و بقایای مواد آلی، در خشک‌کن با دمای ۱۱۰ °C خشک گردیده است. سپس، خاک خشک شده از الک شماره ۴ عبور داده شده و با درصدهای مختلفی از محلول SSR400 (۱۲/۵، ۱۴/۵، ۱۶/۵، ۱۸/۵، ۲۰/۵، ۲۲/۵ درصد) مخلوط و با ریختن آنها در قالب‌های مخصوص، نمونه‌های مورد نظر تهیه گردیده است. همچنین، مطابق با روش اول آزمایش فشاری تک‌محوری، مخلوط‌ها به مدت هفت روز رها شده‌اند تا واکنش میان خاک و محلول تکمیل گردد. آنگاه در روز هفتم، مخلوط از الک شماره ۴ عبور داده شده و مجدداً در خشک‌کن با دمای ۱۱۰ °C خشک گردیده است تا رطوبت آن به‌طور کامل حذف و از این بابت خللی در فرایند آزمایش ایجاد نشود.

۲-۴ آزمایش‌ها

آزمایش‌هایی به شرح زیر روی نمونه‌های شاهد و تهیه شده با درصدهای مختلف محلول SSR400 انجام شده است:

آزمایش تراکم اصلاح شده: آزمایش تراکم اصلاح شده روی نمونه‌ها، طبق استاندارد ASTM D1557.1994 انجام شده و برای هر درصد محلول، حداکثر وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه تعیین گردیده است. نتایج حاصل از این آزمایش برای نمونه‌های خاک لای‌دار و رس‌دار به تفکیک در جداول ۴ و ۵ ارائه گردیده است.

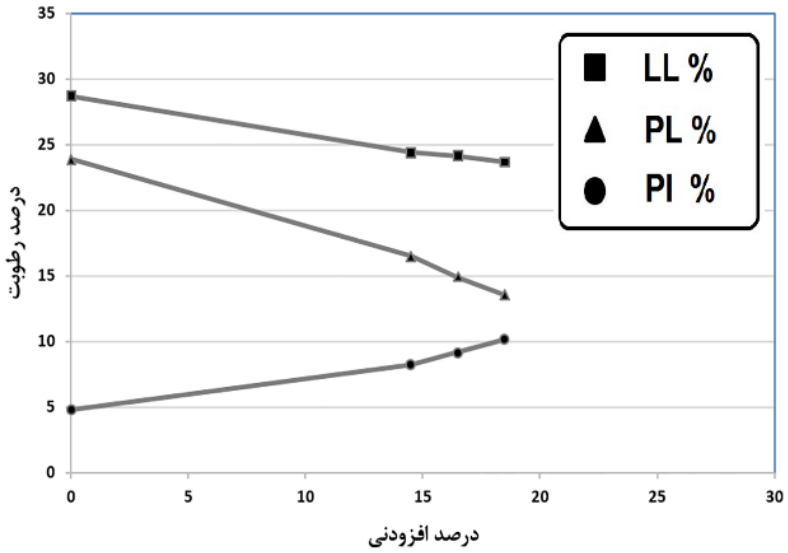
جدول ۴. نتایج تراکم نمونه‌های لای‌دار

نوع ترکیب	وزن مخصوص خشک (gr/cm^3)	رطوبت بهینه (٪)	وزن خاک خشک (g)	محلول SSR400 (g)	محلول SSR400		آب کل مخلوط (g)	ترکیب نهایی مخلوط (g)
					آب (g)	مقدار حل شونده (g)		
خاک طبیعی	۱/۹۴	۱۳/۵	۲۰۰۰	۰	۰	۰	۲۷۰	(۲۰۰۰۰ خاک)+(۰ $MgCl_2$)+(۲۷۰ آب)
خاک + ۱۴/۵٪	۲/۰۴	۹/۴	۲۰۰۰	۲۹۰	۱۴۸/۴۸	۱۴۱/۵۲	۱۸۸	(۲۰۰۰۰ خاک)+(۴۳/۵ $MgCl_2$)+(۱۸۸ آب)
خاک + ۱۶/۵٪	۲/۰۷	۱۰	۲۰۰۰	۳۳۰	۱۶۸/۹۶	۱۶۱/۰۴	۲۰۰	(۲۰۰۰۰ خاک)+(۴۹/۵ $MgCl_2$)+(۲۰۰ آب)
خاک + ۱۸/۵٪	۱/۹۷	۱۲	۲۰۰۰	۳۷۰	۱۸۹/۴۴	۱۸۰/۵۶	۲۴۶	(۲۰۰۰۰ خاک)+(۵۵/۵ $MgCl_2$)+(۲۴۶ آب)
خاک + ۲۰/۵٪	۱/۹۹	۱۳/۶	۲۰۰۰	۴۱۰	۲۰۹/۹۲	۲۰۰/۰۸	۲۶۰	(۲۰۰۰۰ خاک)+(۶۱/۵$MgCl_2$)+(۲۶۰ آب)
خاک + ۲۲/۵٪	۲/۰۳	۱۳/۵	۲۰۰۰	۴۵۰	۲۳۰/۴	۲۱۹/۶	۲۷۰	(۲۰۰۰۰ خاک)+(۶۷/۵$MgCl_2$)+(۲۷۰ آب)

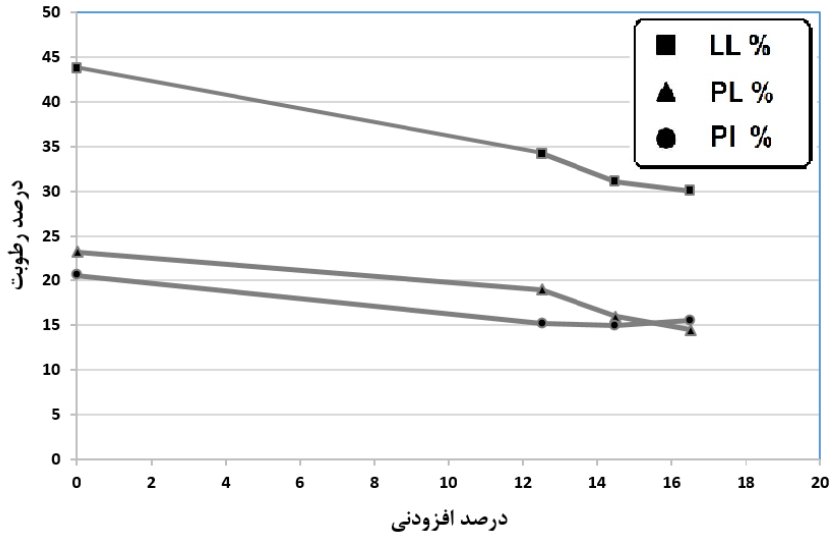
جدول ۵. نتایج تراکم نمونه‌های رس‌دار

نوع ترکیب	وزن مخصوص خشک (gr/cm^3)	رطوبت بهینه (٪)	وزن خاک خشک (g)	محلول SSR400 (g)	محلول SSR400		آب کل مخلوط (g)	ترکیب نهایی مخلوط (g)
					آب (g)	مقدار حل شونده (g)		
خاک طبیعی	۱/۹	۱۴/۵	۲۰۰۰	۰	۰	۰	۲۹۰	(۲۰۰۰۰ خاک)+(۰ $MgCl_2$)+(۲۹۰ آب)
خاک + ۱۲/۵٪	۱/۹۶	۱۳	۲۰۰۰	۲۵۰	۱۲۸	۱۲۲	۲۶۰	(۲۰۰۰۰ خاک)+(۳۷/۵ $MgCl_2$)+(۲۶۰ آب)
خاک + ۱۴/۵٪	۱/۹۸	۱۲/۷	۲۰۰۰	۲۹۰	۱۴۸/۴۸	۱۴۱/۵۲	۲۵۴	(۲۰۰۰۰ خاک)+(۴۳/۵$MgCl_2$)+(۲۵۴ آب)
خاک + ۱۶/۵٪	۱/۹۷	۱۱/۴	۲۰۰۰	۳۳۰	۱۶۸/۹۶	۱۶۱/۰۴	۲۲۸	(۲۰۰۰۰ خاک)+(۴۹/۵$MgCl_2$)+(۲۲۸ آب)
خاک + ۱۸/۵٪	۱/۹۱	۱۲	۲۰۰۰	۳۷۰	۱۸۹/۴۴	۱۸۰/۵۶	۲۴۰	(۲۰۰۰۰ خاک)+(۵۵/۵ $MgCl_2$)+(۲۴۰ آب)
خاک + ۲۰/۵٪	۱/۹	۱۳/۸	۲۰۰۰	۴۱۰	۲۰۹/۹۲	۲۰۰/۰۸	۲۷۶	(۲۰۰۰۰ خاک)+(۶۱/۵$MgCl_2$)+(۲۷۶ آب)

آزمایش حدود آتربرگ: به منظور بررسی رفتار خاک‌های لای‌دار و رس‌دار قبل و بعد از اضافه نمودن محلول SSR400، آزمایش حدود اتربرگ طبق استاندارد AASHTO T98-90.1994 روی نمونه‌هایی از خاک که با درصدهای مختلف محلول (۱۲/۵، ۱۴/۵، ۱۶/۵، ۱۸/۵، ۲۰/۵) تهیه شده‌اند، انجام شده است. نتایج حاصل از این آزمایش به‌صورت نمودار در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه گردیده است.

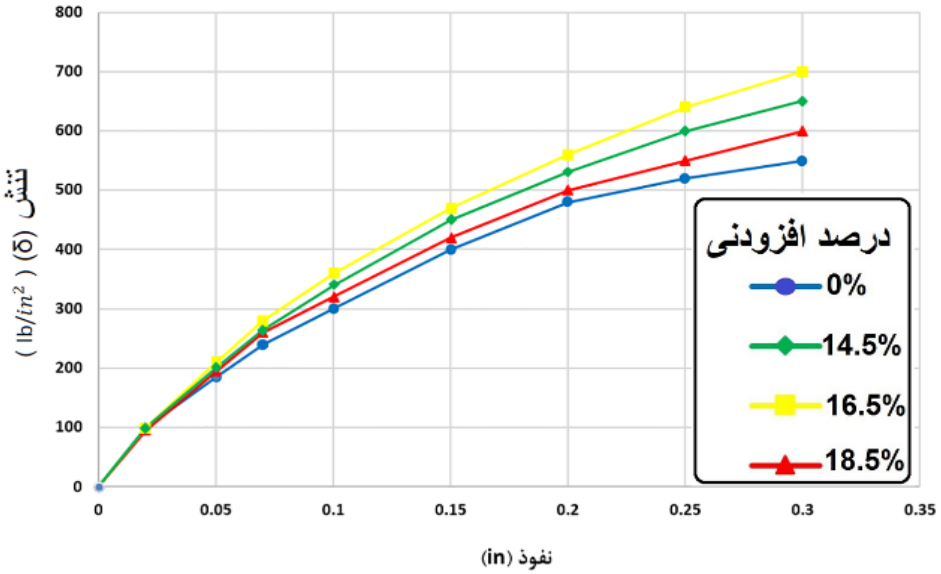


شکل ۳. نتایج آزمایش حدود آتربرگ روی نمونه‌های خاک لای‌دار

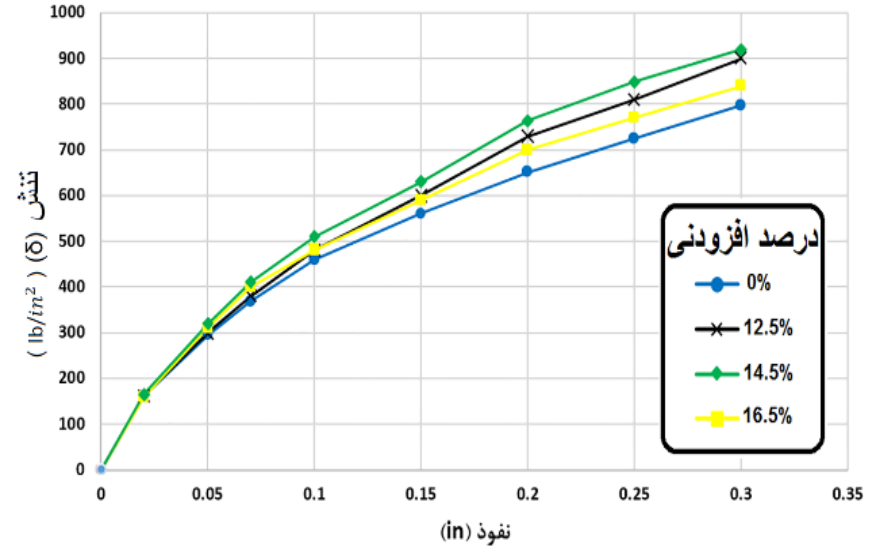


شکل ۴. نتایج آزمایش حدود آتربرگ روی نمونه‌های خاک رس‌دار

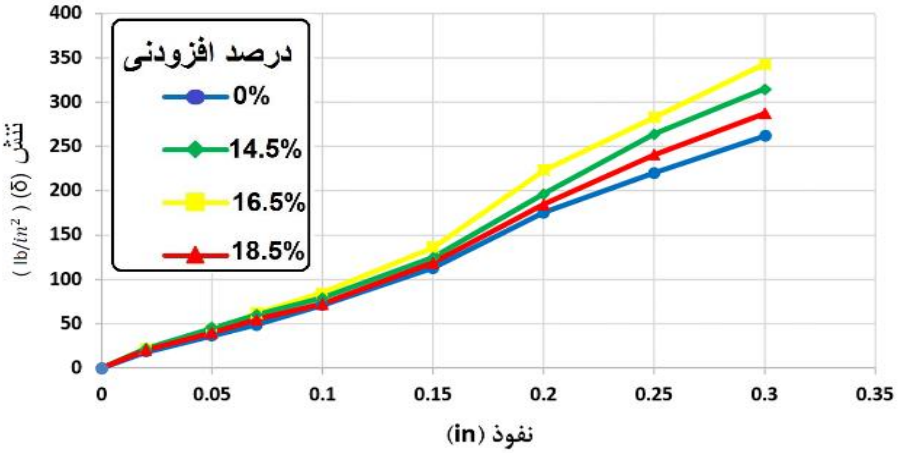
آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا: برای تعیین مقاومت نمونه‌ها از آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) مطابق با استاندارد ASTM D1883.1994 استفاده شده است. طی این آزمایش، که به دو صورت خشک و اشباع انجام گرفته، مقاومت و میزان تورم خاک‌ها اندازه‌گیری شده است. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل‌های ۵ تا ۸ میزان تورم خاک‌ها در شکل‌های ۹ و ۱۰ و همچنین نتایج عددی آنها در جداول ۶ و ۷ ارائه گردیده است.



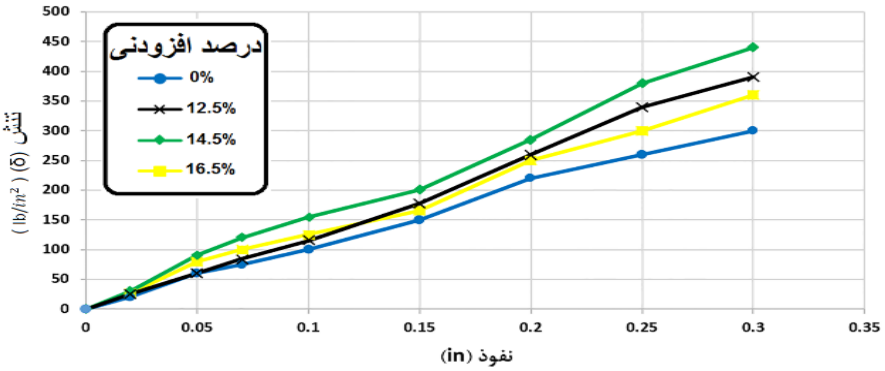
شکل ۵. مقاومت اندازه‌گیری شده نمونه لای‌دار به روش CBR خشک



شکل ۶. مقاومت اندازه‌گیری شده نمونه رس‌دار به روش CBR خشک



شکل ۷. مقاومت اندازه‌گیری شده نمونه لای‌دار به روش CBR تر



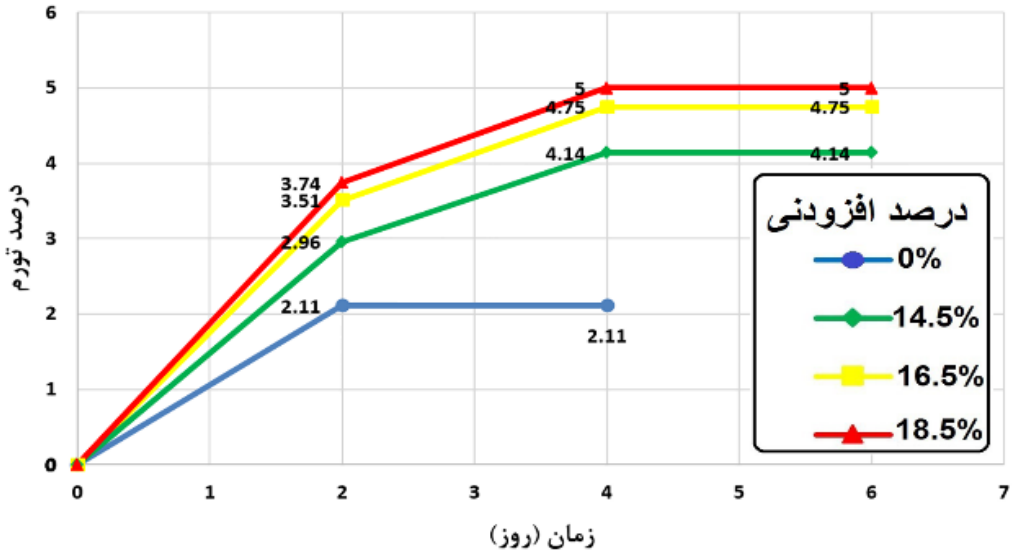
شکل ۸. مقاومت اندازه‌گیری شده نمونه رس‌دار به روش CBR تر

جدول ۶. نتایج CBR نمونه‌های لای‌دار

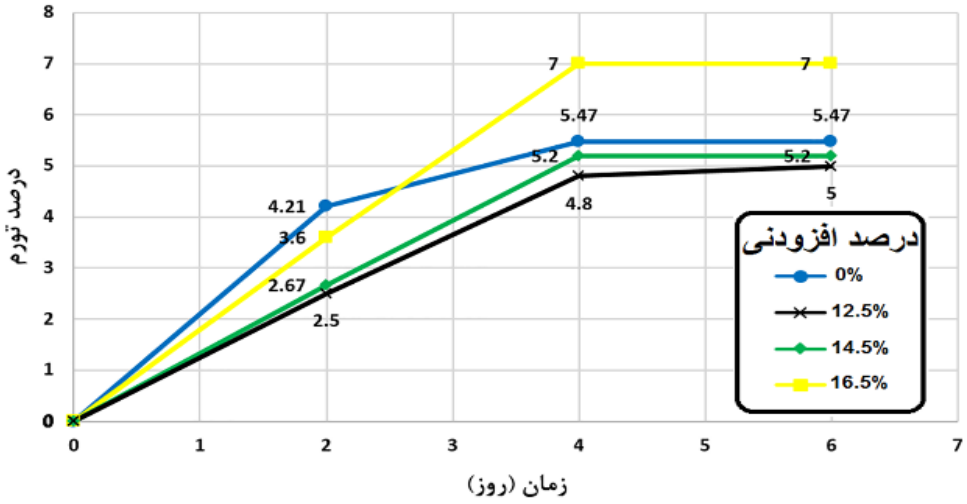
نفوذ (in)	درصد افزودنی	CBR خشک	CBR تر
۰/۱	۰	۳۰	۷/۱
	۱۴/۵	۳۴	۷/۹
	۱۶/۵	۳۶	۸/۵
	۱۸/۵	۳۲	۷/۳
۰/۲	۰	۳۲	۱۱/۷۳
	۱۴/۵	۳۵/۳۴	۱۳/۱۳
	۱۶/۵	۳۷/۳۴	۱۴/۸۶
	۱۸/۵	۳۳/۳۴	۱۲/۳۴

جدول ۷. نتایج CBR نمونه‌های رس‌دار

نفوذ (in)	درصد افزودنی	CBR خشک	CBR تر
۰/۱	۰	۴۶/۱	۱۰
	۱۲/۵	۴۸	۱۱/۵
	۱۴/۵	۵۱	۱۵/۵
	۱۶/۵	۴۸	۱۲/۵
۰/۲	۰	۴۳/۳۴	۱۴/۶۷
	۱۲/۵	۴۸/۶۷	۱۳/۳۴
	۱۴/۵	۵۱	۱۹
	۱۶/۵	۴۶/۶۷	۱۶/۶۷

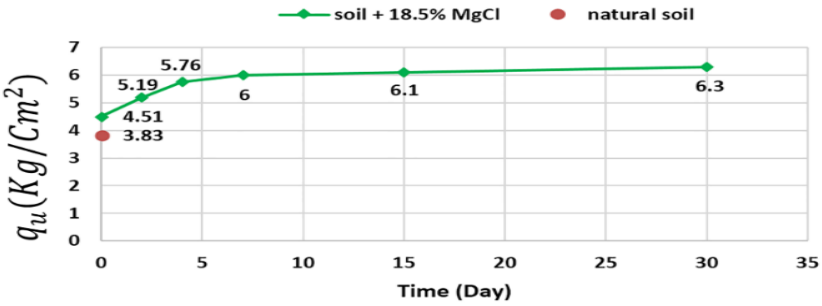


شکل ۹. تورم اندازه‌گیری شده نمونه لای‌دار به روش CBR

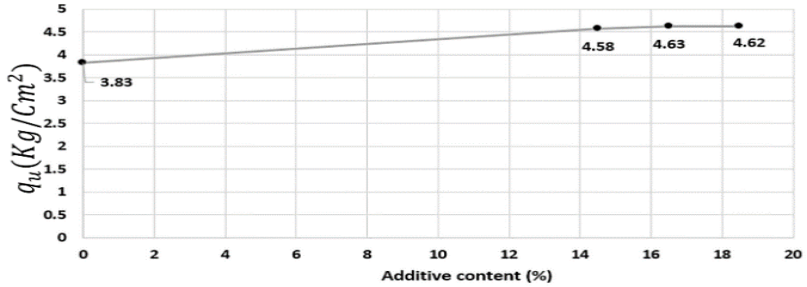


شکل ۱۰. تورم اندازه‌گیری شده نمونه رس‌دار به روش CBR

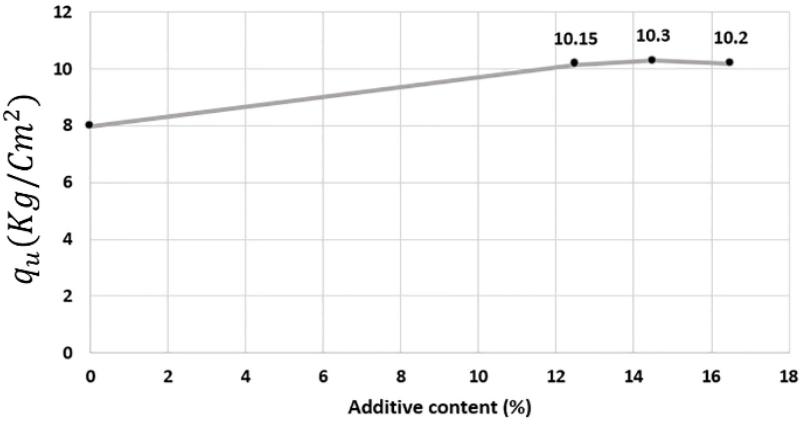
آزمایش مقاومت تک‌محوری: آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره (UC) مطابق استاندارد ASTM D2166.1994 انجام شده است. برای انجام این آزمایش، ابتدا میزان رطوبت بهینه خاک اندازه‌گیری و سپس ۱۸/۵ درصد وزنی محلول به آن اضافه و رطوبت بهینه خاک از میزان رطوبت محلول کسر تا درصد رطوبت باقیمانده مشخص گردد. آنگاه، به منظور تعیین مدت زمان عمل‌آوری، اختلاط به‌دست‌آمده در قالب‌های مخصوص ریخته شده و در بازه‌های زمانی مختلف (۰، ۲، ۴، ۷، ۱۵ و ۳۰ روزه) تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. نتایج این آزمایش در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ به دو روش اول و دوم، نشان داده شده است.



شکل ۱۱. نتایج آزمایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌های خاک لای‌دار به روش اول

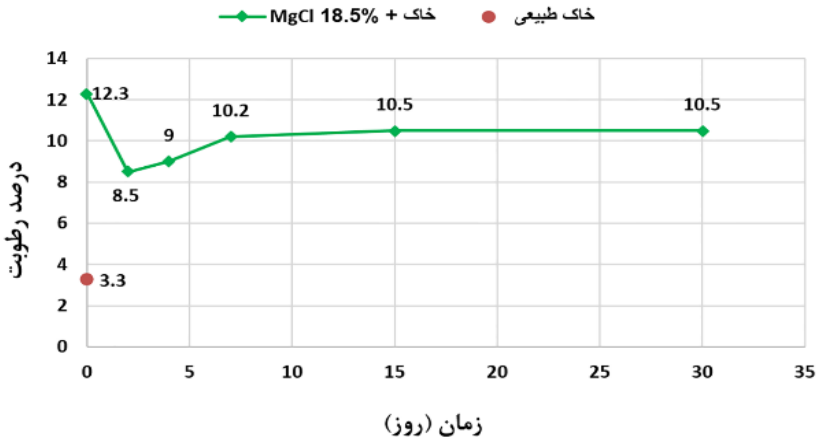


شکل ۱۲. نتایج آزمایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌های خاک لای‌دار به روش دوم

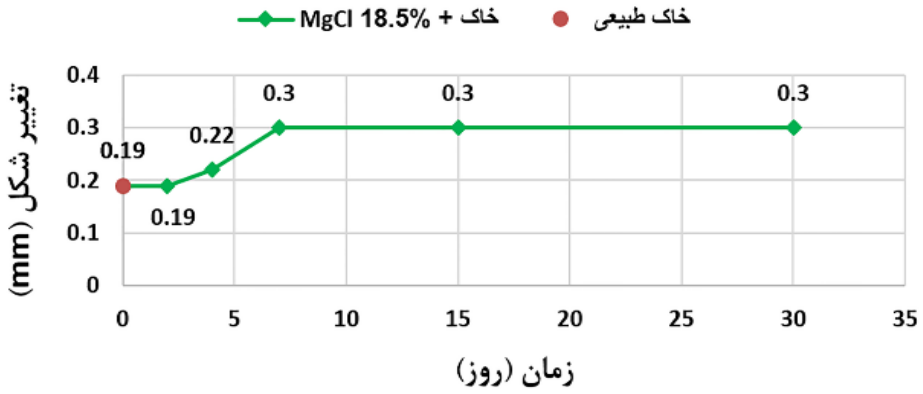


شکل ۱۳. نتایج آزمایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌های خاک رس‌دار به روش دوم

آزمایش تعیین درصد رطوبت: نتایج حاصل از انجام این آزمایش که مطابق با استاندارد ASTM 2216.1994 روی نمونه‌های خاک لای‌دار بدون افزودنی و نمونه‌های با ۱۸/۵ درصد افزودنی شکسته شده در آزمایش تک‌محوری (روش اول) در شکل ۱۴ و همچنین تغییرشکل نمونه‌ها در شکل ۱۵ ارائه شده است.



شکل ۱۴. نتایج آزمایش درصد رطوبت نمونه‌های تحت آزمایش تک‌محوری



شکل ۱۵. نتایج آزمایش تغییرشکل نمونه‌های تحت آزمایش تک‌محوری

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

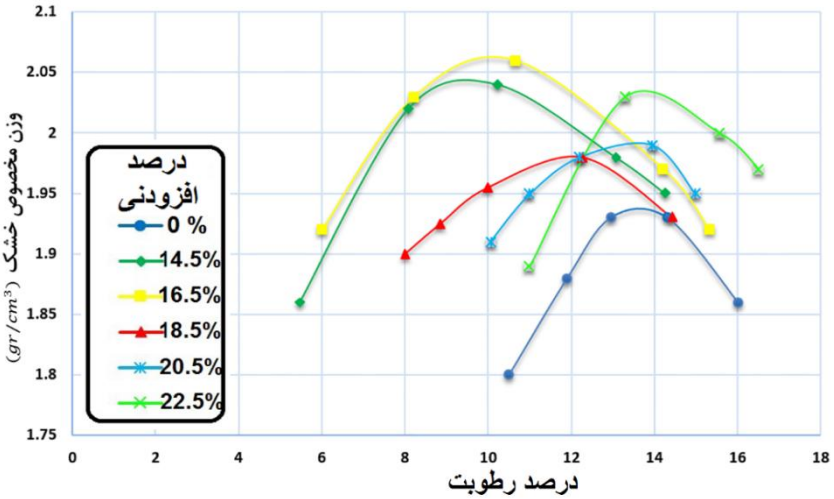
۳-۱ وزن مخصوص و درصد رطوبت بهینه

نتایج حاصل از آزمایش تراکم اصلاح شده در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به‌ترتیب برای خاک‌های لای‌دار و رس‌دار (نمونه شاهد و نمونه‌های تهیه شده با درصدهای مختلف محلول) ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که:

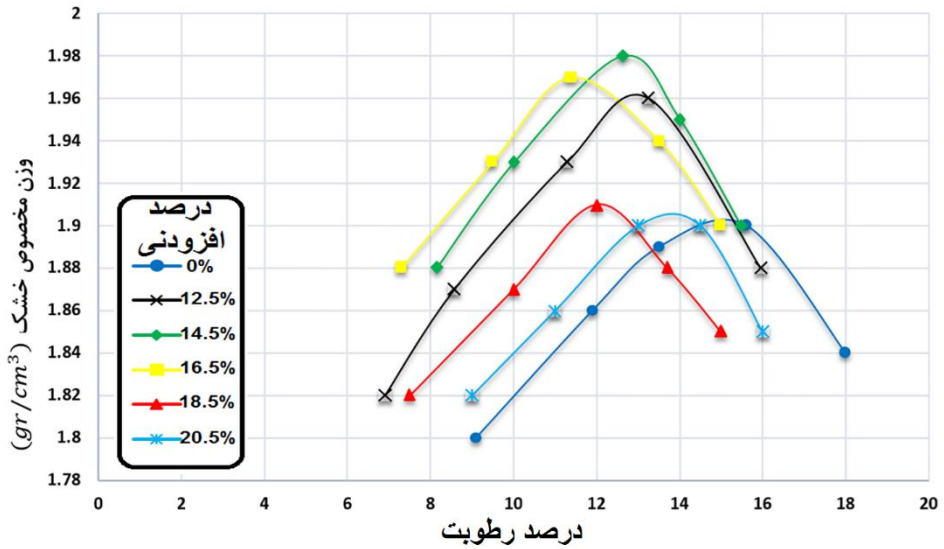
الف) در خاک‌های لای‌دار، تا رسیدن محلول به ۱۴/۵ درصد و در خاک رس تا ۱۲/۵ درصد، تغییر محسوسی در وزن مخصوص و رطوبت بهینه ایجاد نشده و اما برای مقادیری بیش از این درصدها، میزان تغییرات زیاد بود. به‌طوری که در ۱۶/۵ درصد محلول با خاک لای و ۱۴/۵ درصد با خاک رس، وزن مخصوص خشک به حداکثر مقدار خود رسیده و با افزایش محلول بیش از مقادیر یاد شده، مقدار آن به‌تدریج کاهش می‌یابد. دلیل این امر، افزایش کلرید منیزیم و نیروی دافعه در خاک (ترکوز و همکاران، ۲۰۱۴) و به تبع آن از هم گسستن بافت اولیه خاک می‌باشد.

ب) با افزایش محلول به میزان ۱۸/۵ درصد، میزان رطوبت خاک لای تغییر نکرده، ولی وزن مخصوص خشک این خاک کاهش محسوسی داشته است. برای خاک رس نیز با همان درصد محلول، وزن مخصوص کاهش داشته، اما میزان آن در مقایسه با خاک لای بیشتر می‌باشد و این به این دلیل است که در خاک رس بین کاتیون و ذرات منفی پیوند بیشتری وجود دارد.

ج) برای میزان محلول بین ۲۰/۵ تا ۲۲/۵ درصد، وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه خاک لای مجدداً افزایش یافت. لیکن در نمونه‌های خاک رس، این افزایش فقط به درصد رطوبت بهینه محدود شده است. افزایش وزن مخصوص لای بیشتر به دلیل زیاد شدن بیش از حد کلرید منیزیم بوده که مانع از انجام واکنش بیشتر خاک با محلول می‌شود، و رطوبت بهینه نیز در این خاک به‌خاطر زیاد شدن میزان کلرید کلسیم به‌عنوان جذب کننده رطوبت می‌باشد. در حقیقت، با افزایش میزان محلول و به تبع آن افزایش میزان کلرید کلسیم در نمونه‌ها، تمایل به جذب آب در خاک لای‌دار بیشتر می‌شود. لازم به ذکر است که نمونه‌ها با درصد رطوبتی معادل ۸۰ تا ۱۰۰ درصد رطوبت بهینه رفتار خمیری از خود نشان داده که به‌دلیل سخت شدن فرایند تراکم-گیری و به منظور دستیابی به نتایج قابل قبول، آزمایش-های CBR و تک‌محوری روی نمونه‌ها با ۸۰ درصد رطوبت بهینه انجام گرفته است.



شکل ۱۶. وزن مخصوص و درصد رطوبت بهینه نمونه‌های خاک لای‌دار



شکل ۱۷. وزن مخصوص و رطوبت بهینه خاک رس‌دار

۳-۲ حدود آتربرگ

نتایج آزمایش حدود آتربرگ (حد روانی و حد خمیری) به صورت نمودار برای نمونه‌های خاک لای-دار در شکل ۳ و برای خاک رس در شکل ۴ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزودن محلول به این خاک‌ها، حد روانی و خمیری این خاک‌ها کاهش و دامنه خمیری آنها افزایش می‌یابد. این امر نشان‌دهنده کنترل حدود آتربرگ خاک‌ها توسط محلول SSR400 می‌باشد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که صرف‌نظر از نوع خاک، افزایش مقدار محلول منجر به افزایش نشانه خمیری می‌گردد.

۳-۳ نسبت باربری کالیفرنیا

نتایج حاصل از آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) با ۸۰ درصد رطوبت بهینه و در دو حالت خشک و اشباع در شکل‌های ۵ و ۷ برای نمونه خاک‌های لای‌دار و در شکل‌های ۶ و ۸ برای خاک‌های رس‌دار نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که نمونه‌های با ۱۸/۵ و ۱۶/۵ درصد محلول در هر دو نوع خاک لای‌دار و رس‌دار با افت مقاومت همراه بوده و بیشترین مقاومت این خاک‌ها در حداکثر وزن مخصوص حاصل می‌گردد، که امری طبیعی می‌باشد. همچنین، نمونه‌های اشباع شده مقاومت خود را به‌شدت از دست داده و با تکرار ۳ بار آزمایش نتایج اختلاف کم شده است. این امر نشان دهنده تخلخل و نفوذپذیری زیاد خاک‌ها، بخصوص لای، و به تبع آن حساسیت شدید نسبت به رطوبت می‌باشد. در آزمایش CBR اشباع تقریباً همان نتایج حالت خشک به‌دست آمده، با این تفاوت که نمونه‌های خاک رس با ۱۴/۵ درصد محلول از همان ابتدا مقاومت بیشتری از خود نشان داده‌اند.

در مورد تورم خاک‌ها نیز همان‌طور که در نمودارهای شکل‌های ۹ و ۱۰ ملاحظه می‌شود، برای ۱۴/۵درصد محلول، میزان تورم در نمونه‌ها زیاد و با افزایش محلول به میزان ۱۶/۵ و ۱۸/۵ درصد، تورم خا کها افزایش بیشتری از خود نشان می‌دهد، که حاکی از ناتوانی محلول SSR400 در کنترل تورم خاک‌ها می‌باشد. نتایج مطالعات تُرکوز و همکاران (۲۰۱۴) نیز

نشان می‌دهد که با افزایش بیشتر محلول کلرید منیزیم به خاک، میزان تورم نمونه‌ها کاهش می‌یابد که این امر ناشی از وجود کلرید کلسیم و جذب آب توسط نمونه خاک می‌باشد. به همین جهت، استفاده از محلول SSR400 تا زمانی که کلرید کلسیم به همراه دارد برای پروژه‌های حساس به تورم توصیه نمی‌گردد.

۴-۳ مقاومت تک‌محوری

آزمایش تک‌محوری (روش اول) روی نمونه‌های خاک لای‌دار با ۱۶/۵ و ۱۸/۵ درصد محلول (به‌دلیل تعیین مدت زمان دوره عمل‌آوری و تأثیر آب محلول بر میزان روبت) و خاک رس‌دار با ۱۴/۵ درصد محلول انجام شده است تا میزان مقاومت نمونه‌ها مشخص گردد. نتایج نشان داد که حداکثر مقاومت نمونه خاک لای با ۱۶/۵ درصد محلول برابر با $q_u = ۷/۵\ \ \mathrm{kg/cm^2}$ و برای نمونه‌های حاوی خاک رس برابر با ۲۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد که اولی تقریباً دو برابر مقاومت تک‌محوری خاک‌های طبیعی و دومی نشان از افزایش ۲/۷۵ برابری ظرفیت باربری خاک دارد. همچنین، مطابق با این نتایج، مقاومت نمونه‌های خاک ۲ ساعت بعد از افزودن محلول به سرعت افزایش و تا روز هفتم با همین سرعت ادامه داشته، اما بین روزهای هفتم تا سی‌ام (دوره زمانی عمل‌آوری) این روند بدون توقف کاهش داشته است.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثرهای یک نوع محلول حاوی کلرید کلسیم و کلرید منیزیم موسوم به "SSR400 " که از تبخیر شورابه کویر مرکزی ایران توسط مجتمع پتاس خور و بیابانک اصفهان تولید می‌شود، بر رفتار و خصوصیات بستر ریزدانه روسازی راه بررسی‌شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که:

الف) استفاده از محلول SSR400 به‌عنوان یک ماده تثبیت‌کننده، ظرفیت باربری بستر روسازی به روش CBR را افزایش داده، اما در کنترل تورم خاک‌ها ناتوان است.

ب) مناسب‌ترین درصد اختلاط محلول SSR400 برای خاک‌های لای‌دار و رس‌دار جهت دستیابی به اهداف مورد نظر به ترتیب ۱۶/۵ و ۱۴/۵ درصد می‌باشد.

ج) با درصدهای اختلاط ذکر شده، محلول SSR400 از قابلیت کنترل حد روانی و حد خمیری خاک‌های ریزدانه لای و رس برخوردار می‌باشد.

۵. مراجع

حسینی، ر.، رهنماراد، ج. و سلوکی، ح. ر. ۱۳۹۲. "بررسی تثبیت خاک با استفاده از آهک و محلول تجاری tx-033 برای اهداف راه‌سازی، مطالعه موردی: منطقه شرق دشت سیستان". هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.

نیازی، ی. ۱۳۹۰. "مهندسی روسازی". انتشارات نما، چاپ اول.

Bell, F. 1995. "Cement stabilization and clay soils, with examples". Environ Eng. Geosci., 1(2): 139-151.

Cui, X., Zhang, N., Zhang, J. and Gao, Z. 2014. "In situ tests simulating traffic-load-induced settlement of alluvial silt subsoil". Soil Dyn. Earthq. Eng., 58: 10-20.

Canada E. 2001. Priority Substances List Assessment Report: Road Salts. Canadian Environmental Protection Act,.

Gong, X. 2005. "Guide to design of groundwater treatment for high-type highway". China Communications Press, Beijing.

Horpibulsuk, S., Yangsukkaseam, N., Chinkulkijniwat, A. and Du, Y. J. 2011. “Compressibility and permeability of Bangkok clay compared with kaolinite and bentonite”. Appl. Clay Sci., 52(1-2): 150-159.

Horpibulsuk, S., Suksiripattanapong, C., Samingthong, W., Rachan, R. and Arulrajah, A. 2016. “Durability against wetting-drying cycles of water treatment sludge-fly ash geopolymer and water treatment sludge-cement and silty clay-cement systems”. J. Mater. Civil Eng., 28(1): 04015078 .

Latifi, N., Marto, A. and Eisazadeh, A. 2015a. “Analysis of strength development in non-traditional liquid additive-stabilized laterite soil from macro-and micro-structural considerations”. Environ. Earth Sci., 73(3): 1133-1141.

Latifi, N., Marto, A. and Eisazadeh, A. 2015b. “Physicochemical behavior of tropical laterite soil stabilized with non-traditional additive”. Acta Geotech., 11(2): 433-443.

Türköz, M. and Tosun, H. 2011. “A GIS model for preliminary hazard assessment of swelling clays, a case study in Harran Plain (SE Turkey)”. Environ. Earth Sci., 63(6): 1343-1353 .

Turkoz, M. and Vural, P. 2013. “The effects of cement and natural zeolite additives on problematic clay soils”. Sci. Eng. Compos. Mater., 20(4): 395-405.

Turkoz, M., Savas, H., Acaz, A. and Tosun, H. 2014. “The effect of magnesium chloride solution on the engineering properties of clay soil with expansive and dispersive characteristics”. Appl. Clay Sci., 101: 1-9.

Thenoux G, Vera S. 2002. Evaluación de la efectividad del cloruro de magnesio hexahidratado (Bischofita) como estabilizador químico de capas de rodadura granulares. Materiales de construcción. (265):5-22.

Zhang, Y., Sun, W. and Li, Z. 2010. “Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement”. Appl. Clay Sci., 47(3-4): 271-275.