تأثیر شوری آب منفذی بر ویژگی‌های مکانیکی خاک رسی

جهانگیر عابدی‌کوپایی[۱*]، ماریه فتاحی‌زاده[۱] و محمدرضا مصدقی[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱/۱۴)

چکیده

امروزه سازه‌های آبی با صرف هزینه‌های بسیار زیاد به‌منظور استفاده بهینه از منابع آب و خاک احداث می‌گردند. عدم انجام مطلوب مطالعات فنی، اجتماعی و اقتصادی باعث تحمیل هزینه‌های نامتعارف نگهداری این تأسیسات در دوران بهره‌برداری می‌گردد. منابع آب به دلیل رشد صنایع، افزایش جمعیت بشر و عدم رعایت استانداردهای زیست محیطی آلوده گردیده‌اند. اکثر سازه‌های آبی هم در مناطقی با کیفیت آب نامناسب ساخته می‌شوند. از طرف دیگر، ویژگی‌های مهندسی خاک‌های ریزدانه به‌ویژه خاک‌های رسی تابع عوامل از جمله املاح موجود در آب منفذی است. به‌طوری که تغییر در آن سبب ایجاد تغییر در ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها گردیده و در نتیجه سازه‌های بنا شده برروی خاک در معرض آسیب قرار می‌گیرند. این پژوهش، تأثیر آب‌های شوری بر خصوصیات مهندسی خاک را بررسی نمود. در این رابطه کلرور سدیم (NaCl) با ۵ سطح مختلف (۰، ۰/۱، ۰/۲۱، ۰/۴۱ و ۰/۷۲ مول بر لیتر) به خاک افزوده شد و مشخصات تراکمی، پارامترهای برشی، حدود اتربرگ و پارامترهای تحکیم بررسی شدند. نتایج نشان داد که افزودن شوری تغییرات معنی‌داری بر وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه خاک ایجاد نمی‌کند ولی باعث کاهش چسبندگی خاک و افزایش زاویه اصطکاک داخلی می‌گردد همچنین نتایج نشان داد افزایش شوری حد روانی را کاهش داده ولی تأثیر ناچیزی بر حد خمیری خاک داشت.

واژه‌های کلیدی: آلودگی آب، خاک رسی، شوری آب، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، تحکیم، تراکم، حدود اتربرگ

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۲. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: koupai@cc.iut.ac.ir

مقدمه

خاک‌های رسی مهم‌ترین جزء خاک هستند، که به‌طور عمده از هوازدگی شیمیایی مواد معدنی سنگ‌ها تکامل می‌یابد، و به‌عنوان خاک‌های ریز دانه در مهندسی ژئوتکنیک درنظر گرفته شده است (۲۷). ویژگی مهندسی خاک‌های ریزدانه به‌ویژه خاک‌های رسی تابع عوامل متعددی چون دانسیته، تخلخل، ساختمان، تاریخچه تنشی، میزان رطوبت، بافت، میزان و نوع کانی‌های رسی، خاصیت خمیری، میزان و نوع املاح موجود در آب منفذی است. به‌طوری که تغییر در هریک از این ویژگی‌ها باعث ایجاد تغییر در ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها گردیده و در نتیجه سازه‌های بنا شده برروی خاک دچار تغییر و یا تهدیداتی می‌گردد. تحکیم‌پذیری و تراکم‌پذیری از جمله ویژگی‌های مهندسی خاک هستند که در طراحی مربوط به پی و بستر اغلب سازه‌های عمرانی به‌ویژه سازه‌های آبی نقش اساسی داشته و تعیین ویژگی‌های تراکمی و ضرایب تحکیم خاک‌ها از ملزومات طراحی محسوب می‌شوند. امروزه با پیشرفت صنایع و افزایش جمعیت بشر و عدم رعایت استانداردهای زیست محیطی، خطرات زیادی از لحاظ آلودگی منابع آبی وجود دارد. اما متأسفانه بیشتر کمیت منابع آب مورد مطالعه قرار گرفته و کمتر به مطالعه کیفی آب پرداخته می‌شود (۳). تغییر در کیفیت شیمیایی آب منفذی و یا به عبارت دیگر تغییر در میزان و نوع املاح موجود در خاک (کاهش یا افزایش) پدیده‌ای است که وقوع آن در اثر فعالیت‌های مختلف بشری و یا به‌طور طبیعی اجتناب‌ناپذیر است. تغییر در ویژگی‌های مهندسی خاک می‌توانند باعث تغییراتی در پارامترهای مورد استفاده در طراحی سازه‌های خاکی و پی‌های سایر سازه‌ها و بناهای آبی و عمرانی گردد. بنابراین شناخت رفتار و عکس العمل خاک‌ها تحت تأثیر محلول‌ها و مواد مختلف می‌توانند در طراحی‌ها و تصمیم‌گیری صحیح مؤثر واقع شود (۲). در خصوص بررسی و تعیین اثر محلول‌ها بر خواص مهندسی خاک‌های رسی تحقیقاتی توسط محققان مختلف انجام گرفته است. لمب بیان کرده است که در یک نسبت تخلخل معین، هر تغییری در سیستم آب- خاک که لایهٔ دوگانه را متورم کند، تمایل دارد که مقاومت خاک را کاهش دهد. وقوع چنین پدیده‌ای به‌علت افزایش دافعهٔ بین ذرات است (۱۶). عبدالله و همکاران (۱۹۹۷) به این نتیجه رسیدند افزایش غلظت شوری سبب کاهش حد خمیری می‌شود (۴). تیواری و همکاران نسبت‌های مختلفی از مونت‌موریلونیت، کائولینیت، ایلیت و کوارتز را در ۴۱ مخلوط مختلف مورد استفاده قرار دادند. این نمونه‌ها با محلول ۰/۵ مولار نمک مخلوط شدند. نتایج نشان داد وجود آب شور به‌عنوان یک سیال منفذی به‌طور قابل توجهی حد روانی و شاخص الاستیسیته خاک مونت‌موریلونیت غالب را کاهش می‌دهد. با این حال، اثر آن برروی حد روانی و شاخص الاستیسیته خاک کائولینیت غالب ناچیز بود و تأثیری کمی در خاک‌های ایلیت غالب داشت (۲۳). چاتوپادهیای نمونه‌هایی از رس‌های مونت‌موریلونیت طبیعی را که آب منفذی نمک اولیهٔ آنها در شرایط حجم ثابت نفوذ داده شده بود، مورد آزمایش قرار داد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقاومت برشی پسماند با افزایش در غلظت آب منفذی، افزایش می‌یابد (۸). سریدهاران و جایادوا در مورد تئوری لایه مضاعف و تراکم‌پذیری خاک رس بحث کرده‌اند. نتیجه‌گیری اصلی آنها این بود که رابطه نسبت پوکی- فشار به‌طور قابل توجهی با توجه به نوع خاک رس، غلظت یون، ظرفیت کاتیون، ثابت دی‌الکتریک متوسط منافذ و درجه حرارت تحت تأثیر قرار دارد (۲۲). دیکسترا و همکاران بیان کردند که شوری در آب منفذی به شدت می‌تواند مقاومت برشی خاک رسی را تغییر دهد (۱۲). کنی نتایجی از مقاومت برشی پسماند تعدادی مواد رسی با آب منفذی مختلف را ارائه داد. نتایج آزمایش‌های او که برای رس‌ها در آب منفذی با غلظت‌های متفاوت، بر نمونه‌های ساخته شده با درصد رطوبت‌های مختلف بود نشان داد که مقاومت برشی رس، به‌ویژه برای رس‌های مونت‌موریلونیت تابع شیمی آب منفذی است (۱۵). ژانک فانیو و همکاران به بررسی اثر غلظت نمک طعام در آب

جدول ۱. مشخصات خاک مورد استفاده

مشخصات	مقادیر
درصد رس	٪۳۸
حد روانی (LL)	٪۴۵/۴
حد خمیری (PL)	٪۲۵/۱
شاخص خمیری (PI)	٪۲۰/۳
حد انقباض (SL)	٪۱۹/۲
رده بندی در سیستم متحد (USCS)	CL
وزن واحد حجم خشک خاک بیشینه (gr/cm^3)	۱/۶۴
چگالی نسبی دانه‌های خاک (Gs)	۲/۶۵
رطوبت بهینه	٪۲۲
رنگ خاک	قهوه‌ای روشن
pH	۷/۴۵
EC (dS/m)	۰/۴۵

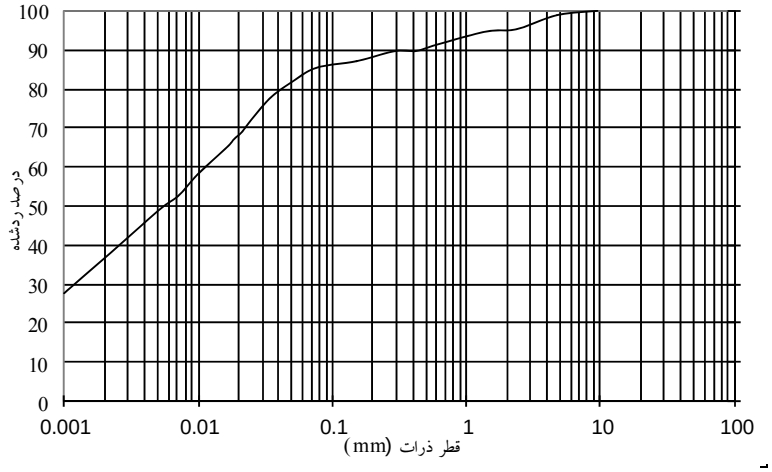
جدول ۲. مشخصات شیمیایی خاک مورد مطالعه

خصوصیات شمیایی	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	HCO_3^-	CO_3^{2-}	So_4^{2-}
مقدار(meq/L)	۰/۰۵	۱	۷	۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۸

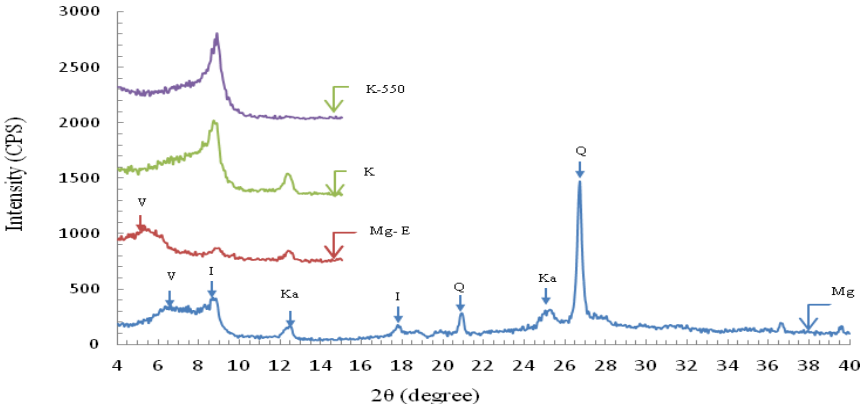
حفره‌ای بر رفتار برشی زهکشی نشده در لس پرداخت. براساس نتایج آزمایش رفتار برشی زهکشی نشده لس اشباع به غلظت نمک طعام آب منفذی حساس است و تغییرات غلظت نمک طعام اثر قابل توجهی بر مقاومت برشی اوج و مقاومت حالت پایدار دارد (۲۸). چن و همکاران اثر محلول‌های نمک آبی و مایعات مختلف آلی بر تراکم‌پذیری کائولینیت را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و نتیجه گرفتند که اثرات فیزیکی منتسب به نیروهای واندروالس جاذبه است و آنها بر تراکم‌پذیری در تنش قائم کم (زیر ۳۰۰ کیلو پاسکال) تسلط دارند، در حالی که در تنش عمودی بالاتر فعل و انفعالات مکانیکی از اهمیت بیشتری برخوردار می‌شود و ترکیب سیال منفذی عملاً تأثیری در تراکم‌پذیری ندارند (۹). نتایج دنگ و همکاران نشان دادند که شاخص فشردگی، شاخص تورم و ضریب تحکیم ثانویه در مورد آب دیونیزه بیشتر هستند وشوری سبب کاهش این پارامترها و همچنین منجر به افزایش تخلخل، شده است (۱۰). با توجه به تأثیراتی که محلول‌های شیمیایی بر کیفیت خاک‌ها دارند، بررسی چگونگی خواص مهندسی خاک‌ها امری ضروری است. به‌ویژه آنکه بسیاری از سازه‌های آبی در مناطق خشک و نیمه خشک ساخته می‌شوند، جایی که فقط منابع آب زیرزمینی شور در دسترس است. در این پژوهش تأثیر غلظت شوری آب منفذی بر خصوصیات مقاومتی و تراکمی و حدود پایداری مورد مطالعه قرار گرفته است.

موادها و روش‌ها

خاک مورد استفاده در این تحقیق خاک رسی بوده که از محل قرضه در منطقه اطراف پاوه واقع در شمال غربی کرمانشاه تهیه شد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک در جداول (۱ و ۲) منحنی دانه‌بندی در شکل (۱) آورده شده است. نتایج حاصل از



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک



شکل ۲. دیفرکتوگرام کانی‌های رسی برای نمونه خاک مورد مطالعه

طیف انکسار اشعهٔ ایکس (XRD) خاک مورد نظر شامل کانی‌های ایلیت، کائولینیت و ورمی‌کولایت می‌شود. طیف انکسار در شکل (۲) نشان داده شده است. برای تهیه نمونه‌های مصنوعی، نمونهٔ خاک را از الک شماره ۱۰ عبور دادیم. سپس با محلول‌های صفر، ۰/۱، ۰/۲۱، ۰/۴۱و ۰/۷۲ مول بر لیتر اشباع کرده و نمونه‌ها به مدت ۹۰ روز در ظرف‌های پلی اتیلن نگهداری شدند. سپس برای انجام آزمایش‌های مورد نظر آماده گردیدند.

آزمایش‌های دانه‌بندی، تراکم ، حدود اتربرگ، و برش مستقیم و تحکیم به‌ترتیب براساس استانداردهای ASTM D422-63، ASTM D698-07εl، ASTM D4318-10، ASTM D3080/D3080M-11 و ASTM-D2435/2435M-11 انجام شد (۵).

بحث و نتایج

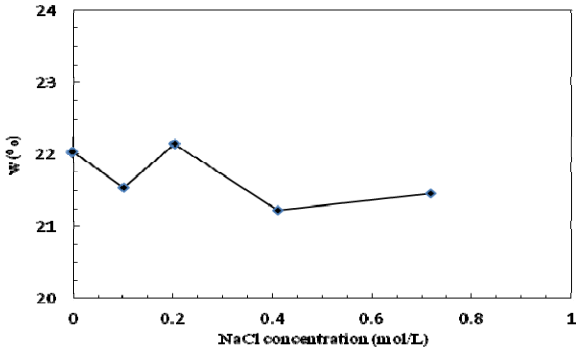
تجزیه و تحلیل آماری نتایج مربوط به تأثیر شوری آب منفذی بر ویژگی‌های مکانیکی خاک

نتایج تجزیه و تحلیل آماری حاصل از آزمایش‌های مکانیکی خاک در جدول (۳) ارائه گردیده است. نتایج به‌دست آمده نشان داد که شوری آب تفاوت معنی‌داری در پارامترهای تراکم شامل رطوبت بهینه (w_{opt}) و وزن واحد خشک بیشینه (γ_{dmax}) تیمارها ایجاد نکرد، ولی بر حد روانی اثر معنی‌داری

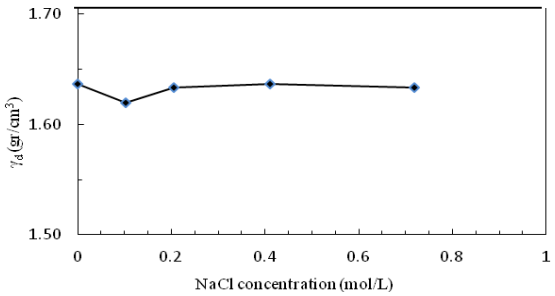
جدول ۳. تجزیه واریانس اثر تیمار شوری آب بر پارامترهای مکانیکی خاک شامل γ_{dmax}، w_{opt} ، LL ، PL و PI

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات صفت‌های اندازه‌گیری شده								
		γ_d	w_{opt}	LL	PL	PI	c	φ	C_C	C_S
تیمار	۴	۰/۰۶۸ ns	۰/۶۲ns	۰/۰۰۰۱***	۰/۵۲ns	۰/۰۰۰۳***	۰/۰۰۷**	۰/۰۱*	۰/۰۰۰۱***	۰/۰۰۵۸**
خطا	۸	۰	۰/۶۶	۰/۳۶	۰/۲۵	۰/۶۰	۰/۲۷	۱/۰۸	۰	۰
CV		۰/۴۲	۳/۷۶	۱/۳۶	۲/۰۲	۴/۰۵	۳/۵۴	۳/۷۴	۵/۱۸	۶/۵۶

ns، *، **، *** به‌ترتیب بیانگر عدم معنی‌دار شدن اثر در سطح آماری (P > ۰/۰۵)، (P > ۰/۰۱) و (P > ۰/۰۰۱) می‌باشند



شکل ۳. تغییرات درصد رطوبت بهینه نسبت به تغییرات غلظت NaCl آب منفذی



شکل ۴. تغییرات وزن واحد حجم خشک بیشینه نسبت به تغییرات غلظت NaCl آب

(P< ۰/۰۰۱) داشت. اثر شوری بر حد خمیری خاک (PL) به لحاظ آماری معنی‌دار نبود ، در حالی که اعمال سطوح مختلف شوری اختلاف معنی‌داری (P< ۰/۰۰۱) در شاخص خمیری خاک (PI) ایجاد کرد.

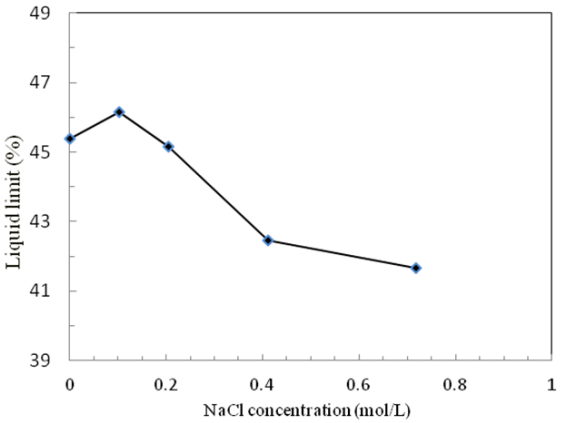
مقادیر مختلف شوری اثر معنی‌داری بر چسبندگی خاک (p< ۰/۰۱) و زاویه اصطکاک داخلی خاک (P< ۰/۰۵) داشت و مقاومت برشی را نیز تحت تأثیر قرار داده است. پارامترهای تحکیم نیز تحت تأثیر شوری قرار گرفت، به‌طوری که اختلاف معنی‌دار در شاخص فشردگی (P< ۰/۰۰۱) و شاخص تورم (P< ۰/۰۱) مشاهده شد.

بررسی نتایج آزمایش تراکم

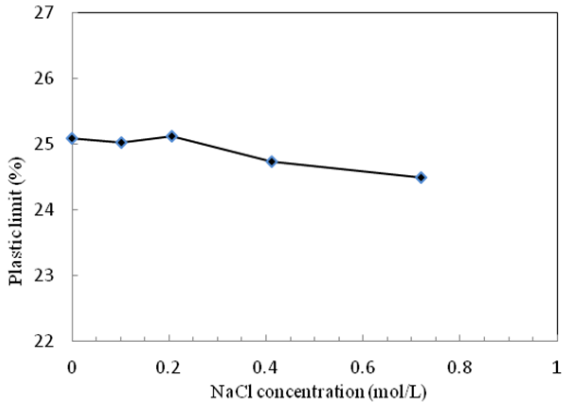
نتایج حاصل از آزمایش تراکم به صورت میانگین آزمایش‌های تراکم استاندارد با ۳ تکرار برای تیمارهای مختلف برای محاسبه رطوبت بهینه (ω_{opt}) و وزن واحد حجم خشک بیشینه ($(\gamma_d)_{max}$) انجام گرفت. در شکل‌های (۳ و ۴) اثر غلظت شوری بر درصد رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه نشان داده شده است. با توجه به شکل‌ها ملاحظه می‌گردد که به‌طور کلی افزودن شوری به خاک رس تأثیر چندانی بر رطوبت بهینه (ω_{opt}) و وزن واحد حجم خشک بیشینه (γ_{dmax}) نداشته است. در پژوهش‌های گذشته شهسواری و همکاران (۱۳۹۰) با انجام آزمایش تراکم برروی نمونه‌های مصنوعی نمک‌های کلرید سدیم تأثیر قابل توجهی در مقادیر رطوبت بهینه و دانسیته خشک ماکزیمم نمونه‌های مورد بررسی مشاهده نکردند (۱). اما عبدالله و همکاران با آزمایش برروی خاک رس که به‌طور عمده از ایلیت یک لایه از مخلوط ایلیت- اسمکتیت بود، نشان دادند عمل‌آوری با محلول‌های Ca^{+2} ، k^+ و Na^+ دانسیته خشک حداکثر متفاوت بوده است (۱۰).

بررسی نتایج آزمایش حدود اتربرگ

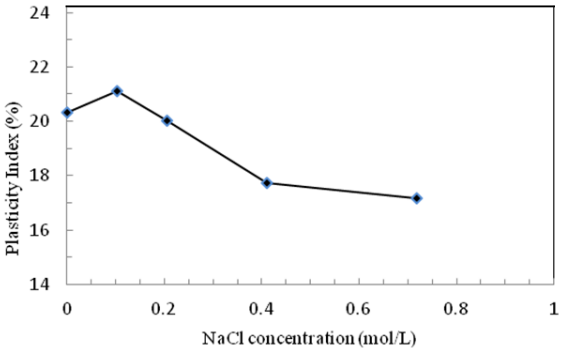
در شکل‌های (۵، ۶ و ۷) تأثیر شوری آب منفذی بر پارامترهای حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری



شکل ۵. تأثیر غلظت شوری آب منفذی بر حد روانی خاک



شکل ٦. تأثیر شوری آب منفذی بر حد خمیری خاک

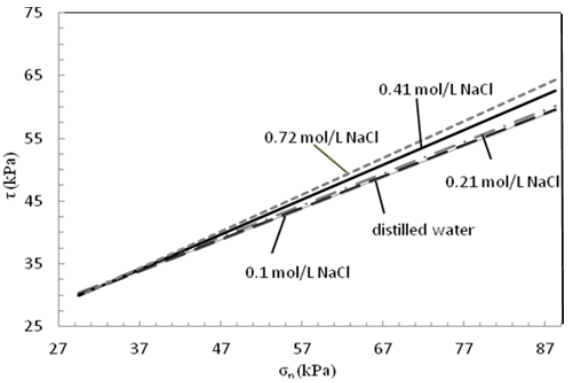


شکل ۷. تأثیر شوری آب منفذی بر شاخص خمیری خاک

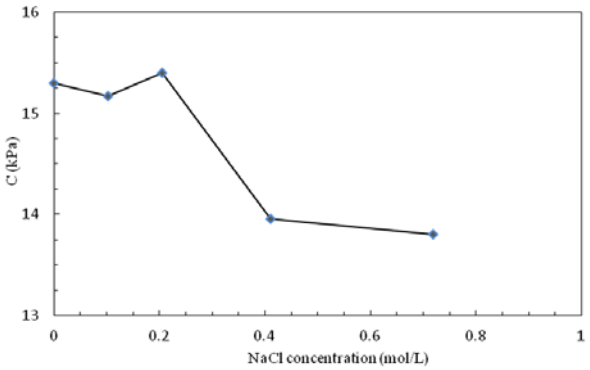
پرداخته شده است. با توجه به شکل (۵) ملاحظه می‌گردد که با افزایش غلظت محلول شوری به خاک در درصدهای کمتر ابتدا افزایش ناچیزی در حد روانی مشاهده شده و در غلظت‌های بیشتر حد روانی کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر به‌طور کلی افزایش شوری سبب کاهش حد روانی می‌گردد. همچنین از روی شکل (۶) مشخص است این افزایش شوری تأثیری زیادی بر حد خمیری نداشته است و در شکل (۷) شاخص خمیری نیز ابتدا اندکی افزایش و سپس کاهش یافته است. دلیل این کاهش احتمالاً این است که با افزایش شوری آب منفذی نیروی دافعهٔ بین ذره‌های خاک کم شده و در نتیجه سبب کاهش در میزان رطوبت و حد روانی می‌شود (۲۳ و ۲۵). بسیاری از مطالعات قبلی نشان می‌دهد که افزایش در غلظت شوری سبب کاهش حد روانی می‌شود. در پژوهش‌هایی مانند مور (۱۹۹۱)، دی ماریو و فینیل (۱۹۹۴)، انسون و هاوکینز (۱۹۸۸) و تیواری و همکاران (۲۰۰۵) و واحد و همکاران (۲۰۱۱) کاهش در حد روانی با افزودن شوری آب منفذی را تأیید کرده‌اند (۶، ۱۱، ۲۰، ۲۴ و ۲۶). در پژوهش ژانک و فانینو (۲۰۱۳) هم افزودن شوری به آب منفذی سبب کاهش حد روانی شد اما به‌دلیل اینکه مقدار رس خاک کم (حدود ۶٪) بود، کاهش آن ناچیز گزارش شد (۲۸). در پژوهش گوارنیر و همکاران برای رس Ozzano، که کانی رس ایلیت آن زیاد است، همبستگی حدود اتربرگ با غلظت خاک منفی است، یعنی سدیم کلرید می‌تواند الاسیسیته را کاهش دهد. اما برای خاک رس Matera که شامل مواد معدنی کائولینیت است، افزایش غلظت شوری تأثیر زیادی بر حد روانی خاک ندارد و علت آن را هم مواد معدنی کائولینیت عنوان کردند که شرایط بسیار دشواری را برای آب و سدیم برای ورود به شبکه کریستالی ایجاد می‌کنند (۱۳). در مورد اثر شوری بر حد خمیری برخی از پژوهشگران چون باربور و همکاران و میشرا و همکاران دریافتند که حد خمیری به شیمی آب منفذی حساس نیست که در توافق با پژوهش حاضر می‌باشد (۷، ۱۷ و ۱۸).

بررسی نتایج آزمایش مقاومت برشی مستقیم

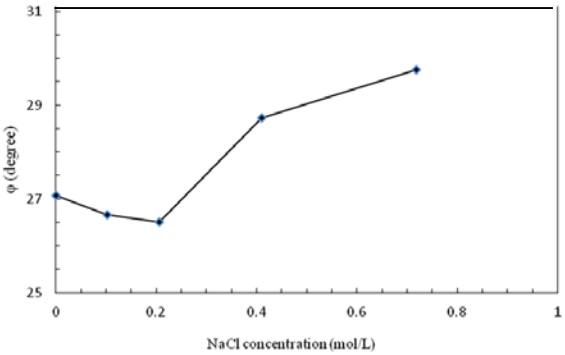
با انجام آزمایش برش مستقیم تحت سه بار ذکر شده برای



شکل ۸. نمودار فشار عمودی- تنش برشی در لحظه شکست نمونه‌های مختلف



شکل ۹. تأثیر غلظت شوری آب منفذی بر چسبندگی خاک

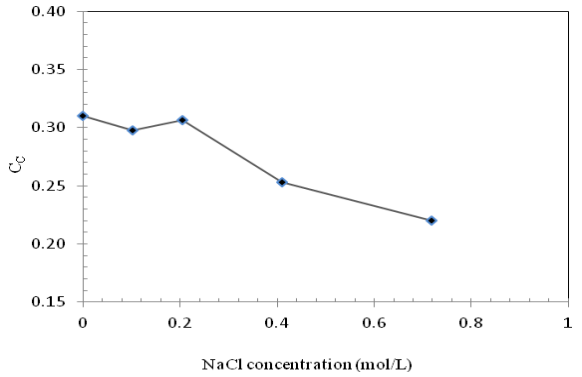


شکل ۱۰. تأثیر غلظت شوری آب منفذی بر زاویه اصطکاک داخلی خاک

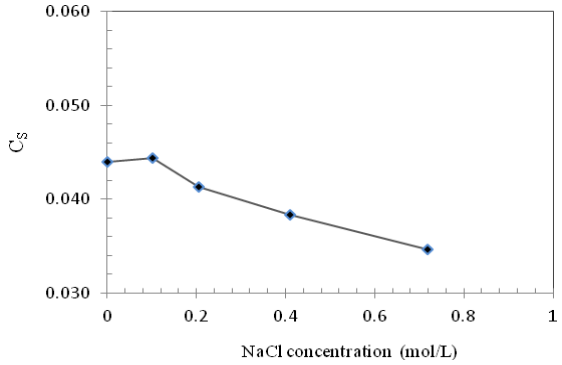
تمامی نمونه‌ها می‌توان نمودار تنش برشی در برابر تنش عمودی تهیه نمود تا به پارامترهای مقاومت برشی که شامل زاویه اصطکاک و چسبندگی با استفاده از بهترین خط ترسیم شده، دست یافت. تنش عمودی اعمال شده ۲۹/۴۲، ۵۸/۸۴ و ۸۸/۲۶ کیلو پاسکال بود. تأثیر شوری آب منفذی بر پارامترهای برشی در شکل‌های (۸، ۹ و ۱۰) آمده است. با بررسی نمودارهای آزمایش برش مستقیم، مشخص شد زاویه اصطکاک داخلی حدود ۲ تا ۳ درجه افزایش و چسبندگی حدود ۱/۵ کیلوپاسکال کاهش یافته است و به‌طور کلی مقاومت برشی خاک افزایش داشته است. دلیل افزایش مقاومت را می‌توان به این صورت بیان نمود که افزایش شوری تا حد معینی، باعث پراکنش ذرات خاک شده و مقاومت برشی را افزایش می‌دهد. بسیاری از پژوهش‌های قبلی در خاک نشان دادند که افزایش غلظت نمک منجر به باعث افزایش مقاومت برشی می‌شود. در پژوهش شهسواری نتایج آزمایش نشان داد پارامترهای برشی خاک به شدت به نمک حساسیت نشان می‌دهند و با کوچکترین افزایش نمک، تغییر قابل ملاحظه‌ای در پارامترهای برشی رخ می‌دهد. به‌طوری که با افزایش ۰/۵ درصد نمک چسبندگی کاهش و بر عکس زاویه اصطکاک افزایش می‌یابد (۱). در پژوهشی که هو انجام داد نیز همین افزایش در زاویه اصطکاک را گزارش نمود. اما از آنجا که آزمایش‌های انجام شده به‌وسیله وی از نوع تحکیم یافته زهکشی نشده (CU) بودند، کاهش در چسبندگی را گزارش نکرده است (۱۴). نتایج ژانک و همکاران نشان دادتا ۱۲ درصد وزنی غلظت نمک آب منفذی مقاومت برشی را افزایش می‌دهد. در غلظت‌های بالاتر از این مقدار، مقاومت برشی کاهش می‌یابد (۲۸).

بررسی نتایج آزمایش تحکیم

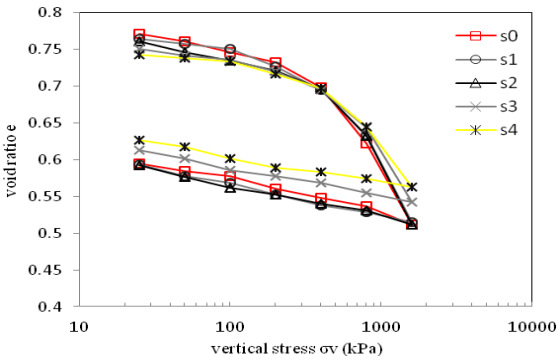
شکل‌های (۱۱ و ۱۲) به‌ترتیب اثر شوری آب منفذی بر شاخص‌های فشردگی و شاخص تورم و در شکل (۱۳) به بررسی منحنی تحکیم پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل‌های بالا مشخص است، با افزایش غلظت شوری آب منفذی، تراکم‌پذیری خاک، شاخص‌های فشردگی و تورم کاهش می‌یابد. حضور محلول نمک‌ها، با توجه به قدرت یونی



شکل ۱۱. تأثیر غلظت شوری آب منفذی بر شاخص فشردگی خاک



شکل ۱۲. تأثیر غلظت شوری آب منفذی بر شاخص تورم خاک



شکل ۱۳. نمودار تنش عمودی- نسبت تخلخل نمونه‌های مختلف

بالا آب شور منفذی، سبب تغییر در ساختمان خاک و بسته شدن منافذ خاک می‌شود، در نتیجه پارامترهای تحکیم کاهش می‌یابند (۲۷). پژوهش نگوین و همکاران نتایجی مشابه با پژوهش حاضر داشت. آنها بیان کردند، تغییرات در پارامترهای تراکم‌پذیری و تورم بر اثر شوری در غلظت معینی تثبیت شده و این غلظت محدود به نظر می‌رسد با افزایش مواد معدنی خاک رس فعال مانند اسمکتیت کاهش می‌یابد (۲۱). برای رس بوم غیر اشباع متراکم، مونکی و همکاران با افزایش غلظت شوری آب منفذی دریافتند، مقدار قابل توجهی از غلظت نمک اثر ناچیزی بر تراکم‌پذیری خاک داشت. علت آن این است که احتمالا تفاوت اندکی بین این دو محلول، آب مقطر و آب مصنوعی درنظر گرفته شده برای خاک رس بوم وجود دارد (۱۹). میشرا و همکاران تغییرات در تراکم‌پذیری مخلوط خاک بنتونیت- بازالت با داشتن آب منفذی متشکل از NaCl در غلظت‌های مختلف را مورد مطالعه قراردادند. نتایج حاصل از آزمایش تحکیم در چهار نوع مختلف از بنتونیت انجام شده نشان داد که نوع حضور بنتونیت، تراکم‌پذیری و رفتار تورم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌طور خاص، بنتونیت با سطح بزرگتر اثرات برجسته تری داشت (۱۷ و ۱۸).

نتیجه‌گیری

براساس مجموعه نتایج حاصل از آزمایش‌ها و بررسی‌های به عمل آمده در این پژوهش نتیجه‌گیری‌های زیر قابل ارائه می‌باشند:

۱- نتایج حاصل از آزمایش‌های تراکم استاندارد نشان داد که به‌طور کلی افزودن محلول منفذی شور به خاک رس به هیچکدام از نمونه‌های ساخته شده، تغییر قابل توجهی بر رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه ایجاد نکرد.

۲- افزودن محلول منفذی شوری به خاک سبب کاهش حد روانی در غلظت‌های ۰/۴۱ و ۰/۷۲ تا ۸٪ درصد به خاک شد. در حالی که حد خمیری خاک تغییرات زیادی نداشت. شاخص خمیری هم کاهشی در غلظت‌های ۰/۴۱ و ۰/۷۲ مول بر لیتر داشت که این کاهش در غلظت ۰/۷۲ برابر ۱۵٪ بود. شوری سبب کاهش ۱۰ درصدی در چسبندگی خاک در غلظت‌های ۰/۴۱ و ۰/۷۲، می‌شود.

۳- محلول شوری منفذی زاویه اصطکاک داخلی را ۱۰ درصد افزایش و چسبندگی خاک را درغلظت‌های ۰/۴۱ و ۰/۷۲

مول بر لیتر، تا ۱۰ درصد کاهش می‌دهد.

۴- پارامترهای شاخص فشردگی و تورم در غلظت‌های شوری زیاد کاهش یافته است. به‌طوری که در غلظت ۰/۷۲ مول بر لیتر سبب کاهش ۳۰٪ در شاخص فشردگی و ۲۰٪ کاهش در شاخص تورم بود. پس با افزایش شوری تراکم‌پذیری خاک کاهش می‌یابد.

۵- به‌طوری کلی با توجه به آزمایش‌های انجام شده بر ویژگی‌های مکانیکی خاک می‌توان بیان کرد که در غلظت‌های کم شوری، خصوصیات مکانیکی خاک مورد مطالعه تغییر قابل توجهی نکرده و غلظت‌های زیاد شوری، خصوصیات خاک را تغییر داده‌اند.

سپاسگزاری

از کلیه کارکنان آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی استان کرمانشاه، به‌ویژه جناب آقای مهندس محسن کفاشی، مهندس نثار خالدی، خانم الهام مطاعی و زینب حسنوند به‌دلیل در اختیار گذاشتن امکانات و همکاری فراوان تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع مورد استفاده

۱. شهسواری، ا. و ن. عباسی. ۱۳۹۰. ارزیابی تأثیر کلرید سدیم بر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک های رسی. همایش ملی سازه، راه، معماری. دانشگاه آزاد اسلامی واحد چالوس. ۳ اسفند تا ۴ اسفند ۱۳۹۰.

۲. مجللی، ح. ۱۳۸۶. *شیمی خاک*. چاپ چهارم، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی تهران، صفحه ۷۷.

۳. مهدوی، م.، ۱۳۹۰. *هیدرولوژی کاربردی*، انتشارات دانشگاه تهران، جلد اول، ویرایش اول، چاپ نهم، صفحه ۴۰۱.

4. Abdullah, W. S., M. S. Al-Zou'bi and K. A. Alshibli. 1997. On the physicochemical aspects of compacted clay compressibility. Can. Geotech. J. 34: 551-559.
5. American Society for Testing and Materials (ASTM). 2012. ASTM Annual Book of Standards, S., Vol. 04. 08.
6. Anson, R. and A. Hawkins. 1998. The effect of calcium ions in pore water on the residual shear strength of kaolinite and sodium montmorillonite. Geotechnique 48: 787-800.
7. Barbour, S. and N. Yang. 1993. A review of the influence of clay-brine interactions on the geotechnical properties of Ca-montmorillonitic clayey soils from western Canada. Can. Geotech. J. 30: 920-934.
8. Chattopadhyay, P. K. 1972. Residual shear strength of some pure clay minerals. Ph. D Thesis, University of Alberta.
9. Chen, J., A. Anandarajah and H. Inyang. 2000. Pore fluid properties and compressibility of kaolinite. J. Geotech. Geoenviron 126: 798-807.
10. Deng, Y. F., X. B. Yue, Y. J. Cui, G. H. Shao, S. Y. Liu and D. W. Zhang. 2014. Effect of pore water chemistry on the hydro-mechanical behaviour of Lianyungang soft marine clay. Appl. Clay. Sci. 95: 167-175.
11. Di Maio, C. and G. Fenellif .1994. Residual strength of kaolin and bentonite: the influence of their constituent pore fluid. Geotechnique 44: 217-226.
12. Dijkstra, T., C. Rogers, I. Smalley, E. Derbyshire, Y. J. Li and X. M. Meng. 1994. The loess of north-central China: geotechnical properties and their relation to slope stability. Engineering Geology 36: 153-171.
13. Guarnieri, A., A. Fabbri and G. Molari. 2005. Influence of Sodicity and Salinity on the Mechanical Properties of two Italian Soils. Biosys. Eng. 91: 239-243.
14. Ho, Y. 1985. The effects of brine contamination on the properties of soils. M.Sc.
15. Kenney, T. 1967. The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils. Proceedings of the Geotechnical Conference 1: 123-129.
16. Lambe, T. W. 1958. The engineering behavior of compacted clay. J. Soil Mech. Found Divi, ASCE. 84: 1.
17. Mishra, A. K., M. Ohtsubo, L. Li and T. Higashi. 2005. Effect of salt concentrations on the permeability and compressibility of soil-bentonite mixtures. J. Fac. Agric. 50: 837-849.
18. Mishra, A. K., M. Ohtsubo, L. Y. Li, T. Higashi and J. Park. 2009. Effect of salt of various concentrations on liquid limit, and hydraulic conductivity of different soil-bentonite mixtures. Environ. Geol. 57: 1145-1153.
19. Mokni, N., E. Romero and S. Olivella. 2012. Joint effects of osmotic and matric suctions on hydro-mechanical behaviour of Boom Clay. Presented at the Clay in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement. 5th International Meeting, Montpellier.

20. Moore, R. 1991. The chemical and mineralogical controls upon the residual strength of pure and natural clays. Geotechnique. 41: 35-47.
21. Nguyen, X. P., Y. J. Cui, A. M. Tang, Y. F. Deng, X. L. Li and L. Wouters. 2013. Effects of pore water chemical composition on the hydro-mechanical behavior of natural stiff clays. Eng. Geol. 166: 52-64.
22. Sridharan, A. and M. Jayadeva. 1982. Double layer theory and compressibility of clays. Geotechnique. 32: 133-144.
23. Tiwari, B. and B. jmera. 2013. Effects of saline fluid on compressibility of clay minerals. Environ. Geotech. 1: 108 –120.
24. Tiwari, B., G. R. Tuladhar and H. Marui. 2005. Variation in residual shear strength of the soil with the salinity of pore fluid. J. Geotech. Geoenviron. 131: 1445-1456.
25. van Paassen, L. and L. Gareau. 2004. Effect of Pore Fluid Salinity on Compressibility and Shear Strength Development of Clayey Soils. In: R. Hack, R. Azzam and R. Charlier, editors, Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe. Springer Berlin Heidelberg 104: 327-340.
26. Wahid, A., A. Gajo and R. Di Maggio. 2010. Chemo-mechanical effects in kaolinite. Part 1: prepared samples. Géotechnique 61: 439-447.
27. Yukselen-Aksoy, Y., A. Kaya and A. H. Ören. 2008. Seawater effect on consistency limits and compressibility characteristics of clays. Eng. Geol. 102: 54-61.
28. Zhang, F., G. Wang, T. Kamai, W. Chen, D. Zhang and J. Yang. 2013. Undrained shear behavior of loess saturated with different concentrations of sodium chloride solution. Eng. Geol. 155: 69-79.