تأثیر نمک بر ریزساختار و مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ای دریاچه ارومیه

سولماز دارسنج[1]، پرنگ امینی فرد[2]، مهرداد امامی تبریزی[3]*

۱-دکتری ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران، مرکز تحقیقات زلزله، دانشگاه صنعتی تبریز (سهند)، تبریز، ایران

۲- کارشناسی ارشد ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران، مرکز تحقیقات زلزله، دانشگاه صنعتی تبریز (سهند)، تبریز، ایران

۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، مرکز تحقیقات زلزله، دانشگاه صنعتی تبریز (سهند)، تبریز، ایران

چکیده

خاک‌های شور به طور گسترده درمناطق خشک، نیمه خشک و ساحلی جهان پراکنده هستند. شناخت ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی این خاک‌ها در راستای شناسایی مشکلات مربوطه در پروژه‌های عمرانی دارای اهمیت بسیاری است. در این مطالعه اثر نوع و میزان نمک بر مقاومت برشی و تغییرات مکش در ماسه‌های بادی شور حوضه دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور پس از فرآیند نمک‌زدایی از خاک، نمک‌های سدیم کلرید و سدیم سولفات در محدوده ۲ تا ۱۲٪ به آن‌ها اضافه شده و نمونه‌های ساخته شده با این خاک‌ها تحت آزمایش برش مستقیم در دو درصد رطوبت مختلف قرار گرفتند. همچنین تغییرات ریزساختار خاک‌ها در حالات مختلف با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نوری مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت تغییرات مکش در شرایط رطوبتی متفاوت در دو نوع خاک نمکی با مقدار نمک ۱۲٪ اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج، تأثیر نمک‌ها بر مقاومت برشی ماسه‌های بادی به میزان رطوبت و فرآیندهای تبلور-انحلال نمک‌ها بستگی دارد. در این مطالعه با افزایش درصد هر دو نوع نمک سدیم کلرید و سدیم سولفات در رطوبت ثابت، مقاومت برشی در نمونه‌ها افزایش یافت در حالیکه، با افزایش رطوبت از ۵ به ۱۰٪ در مقدار نمک ثابت، مقاومت برشی در نمونه‌های سدیم کلرید کاهش و در نمونه‌های سدیم سولفات افزایش یافته است. همچنین نمک سدیم کلرید بیشتر بر جزء اسمزی و نمک سدیم سولفات بیشتر بر جزء بافتی مکش کل، اثرگذار بوده‌اند. یافته‌های این پژوهش به درک بهتر مکانیزم اثر دو نوع نمک مختلف در خاک‌های دانه‌ای فاقد رس کمک می‌کند.

کلمات کلیدی

خاک‌های دانه‌ای، ماسه، خاک های شور، ریزساختار، مقاومت برشی.

* **نویسنده مسئول: مهرداد امامی تبریزی، ایمیل: m.emami@sut.ac.ir**

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱-مقدمه

خاک‌های شور به طور گسترده درمناطق خشک، نیمه خشک و ساحلی جهان پراکنده هستند و به طور تقریبی ۴۲٪ از مساحت مناطق خشک جهان را شامل می‌شوند [۱]. در چرخه‌های مکرر کریستالیزاسیون، حل شدن و تبلور مجدد، ساختار چنین خاک‌هایی دچار آسیب شده و در نهایت تغییرات عمده‌ای در رفتار فیزیکی و مکانیکی خاک، به ویژه تحت تأثیر تغییر فاز نمک، رخ می‌دهد[۲]. برای مثال، در شیروانی‌های لسی، آب نفوذی در ترک‌ها می‌تواند نمک‌های موجود را در خود حل کرده و با کاهش مقاومت برشی، سبب بروز ناپایداری گردد [۳]. توسعه ساخت و سازها و فعالیت‌های عمرانی در مناطق مذکور، مواجهه با خاک‌های شور را اجتناب ناپذیر می‌سازد. از طرفی استفاده از مصالح محلی، همواره از نظر اقتصادی و سهولت عملیات اجرایی در الویت قرار دارد. لذا شناخت ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی این خاک‌ها در راستای شناسایی مشکلات مربوطه و اتخاذ اقدامات موثر برای رفع آن‌ها دارای اهمیت بسیاری است.

تأثیر نمک بر مقاومت برشی خاک، پیچیده بوده و تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد. نوع و میزان نمک‌های موجود در خاک بر مقاومت برشی خاک‌های شور اثرگذارند. از طرفی، تغییرات رطوبت با تأثیر بر انحلال نمک و نیز ایجاد تغییر در مکش خاک، می‌تواند بر مقاومت برشی تأثیرگذار باشد [۴-۶]. مکش کل در خاک، مجموع مکش بافتی[1] و مکش اسمزی می‌باشد. مکش بافتی، ناشی از نیروهای مویینگی و جاذبه بین ذرات خاک و آب بوده و در خاک‌های ریزدانه بیشتر از خاک‌های درشت‌دانه است [۷]. با افزایش رطوبت و کاهش مکش بافتی، سه فضای مختلف رطوبتی: pendular، funicular و capillary درخاک‌های غیر اشباع تشکیل می‌شود[۸]. از سوی دیگر، مکش اسمزی به دلیل وجود املاح محلول در آب حفره‌ای، ایجاد می‌شود و افزایش غلظت املاح باعث افزایش مکش اسمزی می‌گردد[۹]. سدیم سولفات یکی از رایج‌ترین نمک‌های محلول موجود در خاک‌های شور است [۲]. زمانی که محلول سدیم سولفات به حد فوق اشباع برسد، هر مولکول سدیم سولفات۱۰ مولکول آب را جذب کرده و متبلور می‌شود[۱۰]. این فرایند جذب آب، موجب کاهش مقدار رطوبت موجود در خاک و افزایش حجم ذرات نمک، تا حداکثر ۳/۴ برابر حجم اولیه جود، در بازه دمایی ۱۰ تا ۳۰ درجه سانتیگراد می‌گردد[۱۱]. میزان حلالیت این نمک بسیار به دما وابسته است [۱۲]. در خاک‌های سیلتی سولفاته، به دلیل افزایش حجم ذرات نمک و کاهش میزان آب آزاد در خاک، افزایش کریستال‌های سدیم سولفات موجب افزایش مکش بافتی می‌شود [۱۳]. از طرفی، Ying و همکاران، با مطالعه اثر شوری بر مکش بافتی و مکش کل خاک‌های لسی دریافتند، وجود ترکیبی از یون‌های مختلف، مکش بافتی خاک را به مقدار کمی کاهش داده و در مقابل بر جزء اسمزی مکش می افزاید. از این رو اثر شوری بر مکش کل نسبت به مکش بافتی برجسته‌تر بوده است [۹, ۱۴]. بر اساس مطالعه ژانگ در سال ۲۰۲۳، افزودن نمک سدیم کلرید به خاک سیلتی تا مقدار ۵ ٪، مکش کل را به مقدار قابل توجهی افزایش داده و سبب افزایش چسبندگی در خاک می‌گردد، در حالی که تغییرات مکش بافتی ناچیز است. همچنین افزودن سدیم کلرید مقاومت کششی خاک را در طی خشک شدن افزایش داده و باعث افزایش تماس بین ذرات به وسیله سیمانتاسیون نمک می‌شود [۱۵]. نمک در خاک غیراشباع تمایل به رسوب در نقاط تماس ذرات دارد. کریستال‌های ایجاد شده در خاک حین فرآیند خشک شدن می‌توانند با ایجاد چسبندگی سبب افزایش مقاومت برشی و سختی خاک شوند [۱۶]. اگرچه انحلال مجدد ذرات نمک می تواند به فروپاشی غیر منتظره انجامیده و آسیب های جبران ناپذیری به سازه ها وارد کند. از این رو پدیده سیمانتاسیون ناشی از تبلور نمک [۱۷] ماهیتی فیزیکی و غیر پایدار داشته و سخن از اثرات مثبت نمک‌ها بر مقاومت برشی در پروژه‌های کوتاه‌مدت و بویژه در شرایط خاص رطوبتی ممکن خواهد بود و در شرایط درازمدت جایگزین روش‌های بهسازی شیمیایی نمی‌باشد [۱۸]. از آنجایی که انحلال مواد معدنی تدریجی است، تغییر شکل ناشی از آن نیز به صورت آنی رخ نمی دهد[۱۸]. علاوه بر انحلال نمک، در برخی موارد فشار تبلور زیاد ناشی از نمک سدیم سولفات نیز می‌تواند منجر به بروز ترک در ساختار خاک گردد [۱۹]. Wen و He در سال ۲۰۱۲ نشان دادند که افزایش تعداد دفعات نمک زدایی خاک شور منجر به کاهش چسبندگی و زاویه اصطکاک

[1] Matric suction

ACCEPTED MANUSCRIPT

داخلی در خاک رس می‌شود. در این مطالعه، نمک‌زدایی دو نمونه از خاک شورلسی قرمز، موجب کاهش مقاومت برشی پسماند در محدوده ۵۴ تا ۶۵٪ و زاویه اصطکاک داخلی پسماند در محدوده ۴۶ تا ۶۲ ٪ مقدار اولیه، در حالت اشباع گردید [۲۰]. در مطالعه ژانگ و همکاران (۲۰۲۵) افزودن سدیم کلرید به خاک رس در فشارهای پایین تأثیر کمی بر مقاومت برشی خاک داشته اما در فشارهای بالا سبب افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک ناشی از تغییر ساختار منفذی و مکش اسمزی گردید [۲۱]. در مطالعات پیشین عمدتاً تأثیر نمک بر روی رفتار خاک‌های ریزدانه مورد بررسی قرار گرفته و درک کاملی از تأثیر نوع، غلظت نمک و رطوبت بر رفتار مکانیکی ماسه‌های بادی در حضور نمک در دسترس نیست. این در حالیست که به ویژه در مناطقی نظیر حوضه دریاچه ارومیه که پیشتر در مناطق ساحلی قرار داشتند، فراوانی ماسه‌های بادی شور قابل توجه می‌باشد. بر این اساس، پژوهش حاضر با تمرکز بر ماسه بادی فاقد رس و تفکیک مکانیزم‌های اثرگذاری نمک‌ها، دیدگاهی متفاوت و نوین ارائه می‌دهد که به‌ویژه در درک رفتار خاک‌های شور برای محیط‌های خشک و نیمه‌خشک حائز اهمیت است.

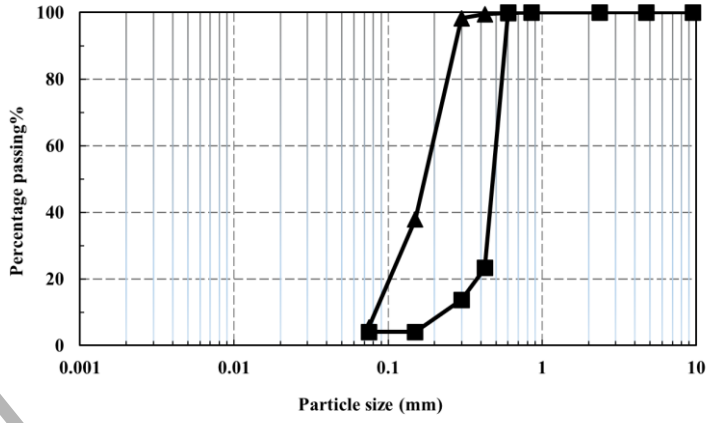
در این مطالعه اثر نوع و میزان نمک بر مقاومت برشی و تغییرات مکش در ماسه‌های بادی شور حوضه دریاچه ارومیه بررسی شده است. برای این منظور، نمونه‌های ماسه بادی شور از ساحل غربی دریاچه، جمع‌آوری و پس از فرآیند نمک‌زدایی، نمک‌های سدیم کلرید ($NaCl$) و سدیم سولفات (Na_2SO_4)، هر یک با ویژگی‌های متفاوت در خواص فیزیکی، روند کریستالیزاسیون و انحلال‌پذیری، در محدوده ۲ تا ۱۲٪ به صورت کنترل‌شده به ماسه‌های بادی نمک‌زدایی‌شده اضافه شدند. در این مطالعه، سدیم کلرید و سدیم سولفات به‌صورت هدفمند به‌عنوان دو نمک شاخص با رفتار هیدراتاسیون کاملاً متفاوت انتخاب شده‌اند تا امکان تفکیک اثر نمک فاقد فاز هیدراته پایدار از نمکی با ظرفیت بالای تبلور هیدراته فراهم گردد. نمونه‌های ساخته‌شده با دانسیته مشخص در درصدهای رطوبت ۵ و ۱۰٪، تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفته و اثر تبلور و انحلال نمک‌های مختلف بر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک بررسی گردیدند. همچنین تغییرات ریزساختار خاک‌ها در حالات مختلف با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نوری مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت تغییرات مکش در شرایط رطوبتی متفاوت در دو نوع خاک نمکی مورد مطالعه با درصد نمک ۱۲٪ اندازه‌گیری شد.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱- خاک مبنا

نمونه‌برداری از ماسه‌های بادی منطقه جبل کندی واقع در ساحل قدیمی غرب دریاچه ارومیه در شمال غربی ایران انجام گرفت. شکل ۱ پوش منحنی‌های دانه‌بندی خاک مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مطابق طبقه بندی یونیفاید، خاک از نوع ماسه یکنواخت بد دانه‌بندی شده (SP) می‌باشد. همچنین در جدول ۱ مشخصات فیزیکی و شیمیایی مهم خاک ارائه گردیده است. با توجه به مقدار هدایت الکتریکی اندازه گیری شده و بر اساس نشریه ۴۶۷ [۲۲]، خاک مورد مطالعه در رده‌ی شور قرار می‌گیرد. جهت دستیابی به نمونه‌های همگن، خاک مبنا، دانه بندی شده و با توجه به دانه بندی اصلی، سایزهای روی الک‌های NO.100 و NO.200 به نسبت ۶۰ به ۴۰ ٪ مجدداً با یکدیگر ترکیب شده و در ساخت نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۱- پوش منحنی‌های دانه بندی خاک مبنای مورد مطالعه از منطقه جبل کندی واقع در ساحل غربی دریاچه ارومیه

Fig. 1. Grain size distribution envelope of the base soil studied, Jabal Kandy region, west coast of Urmia Lake.

جدول۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مبنا

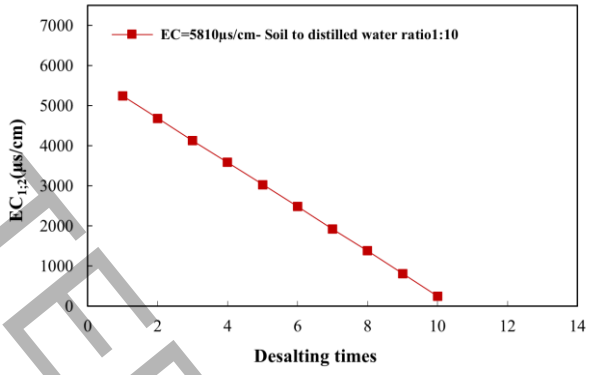
Table 1. Physical and chemical properties of the base soil.

پارامتر	مقدار	روش
ضریب خمیدگی (Cc)	۰/۹	[۲۳]
ضریب یکنواختی (Cu)	۲	
نوع خاک	SP	[۲۳]
دانسیته خشک حداقل (gr/cm^3)	۱/۴۹	[۲۴]
دانسیته خشک حداکثر (gr/cm^3)	۱/۶۸	[۲۵]
چگالی ویژه خاک با نفت	۲/۴۷	[۲۶]
$EC_{1:2}$ (µs/cm)	۱۴۴۲-۵۸۱۰	[۲۲]
$pH_{1:1}$	۸/۶	[۲۷]
SO_4^{2-} (ppm)	۷۶۰	Ion Chromatography
NO_3^- (ppm)	۲۵۰	
Cl^- (ppm)	۴۳۵۸	
NH_4^+ (ppm)	۵۲/۵	
Na^+ (ppm)	۲۸۱۰	
K^+ (ppm)	۶۰۰	
Ca^{2+} (ppm)	۳۴۲۰	
Mg^{2+} (ppm)	۳۵۰	
Carbonate($CaCO_3$) (ppm)	۷۰	
Bi-Carbonate($CaCO_3$) (ppm)	۲۶۲۵	

ACCEPTED MANUSCRIPT

۲-۲- نمک زدایی خاک شور

بر اساس نشریه ۴۶۷ [۲۲]، چنانچه میزان هدایت الکتریکی در عصاره ۱ به ۲ (خاک به آب مقطر)، کمتر از ۲۵۰ µS/cm باشد، خاک، غیرشور محسوب می‌گردد. لذا به منظور نمک زدایی، خاک شور مبنا به نسبت ۱ به ۱۰ با آب مقطر، ترکیب گردیده و پس از طی زمان کافی برای ته نشینی کامل خاک، مقدار هدایت الکتریکی در محلول روئی اندازه گیری گردید. سپس محلول، حذف شده و عملیات تا زمانی که هدایت الکتریکی به کمتر از ۲۵۰ µS/cm برسد، ادامه یافت [۲, ۳, ۲۸]. در شکل ۲، تغییرات هدایت الکتریکی برای نمونه‌ای با هدایت الکتریکی اولیه ۵۸۱۰ µS/cm نشان داده شده است. مطابق این شکل، به طور میانگین به ازای هر مرتبه نمک زدایی یک ساعته خاک شور به روش فوق، میزان هدایت الکتریکی ۵۳۱ µS/cm در هر مرحله کاهش یافته است .



شکل۲- افت هدایت الکتریکی خاک‌های نمکی پس از هر مرتبه نمک زدایی با آب مقطر

Fig. 2. Reduction in electrical conductivity of saline soils after each washing cycle with distilled water.

۲-۳- آماده سازی خاک نمکی همگن

برای تهیه خاک شور جهت استفاده در آزمایش‌ها، نمک سدیم کلرید و سدیم سولفات با مقادیر ۲، ۴، ۶ و ۱۲٪ وزنی از خاک خشک در آب حل شده و روی خاک اسپری شده و ۲۴ ساعت در ظرف در بسته جهت واکنش نمک و خاک قرار داده شد. سپس خاک شور به مدت ۲۴ ساعت در آون ۶۰ درجه خشک گردیده و با استفاده از چکش لاستیکی و الک، خاک‌های کلوخه شده مجدداً خرد و الک شدند تا خاک نمکی همگن حاصل شود [۲, ۳, ۹].

۲-۴- آزمایش مکش

تغییرات مکش بافتی و کل در نمونه‌های خاک نمک زدایی شده، خاک سدیمی و سولفاته در درصد نمک ۱۲٪ بر اساس به روش کاغذ صافی [۲۹]، در ۵ میزان رطوبت مختلف و با ۳ تکرار اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها در ۶ لایه تا رسیدن به دانسیته خشک ۱/۶۲۳gr/cm^3 در قالب‌های دایره‌ای تفلون به قطر ۲/۵ و ارتفاع ۵ cm کوبیده شده و کاغذهای صافی خشک بین لایه سوم و چهارم و پس از لایه ششم قرار داده شدند. سپس نمونه‌ها مهر و موم شده و به مدت ۷ روز در محفظه‌ای با دمای ثابت نگهداری شدند. پس از این زمان، کاغذ ها با پنس جدا شده و به سرعت وزن گردیدند. در آزمایش‌های مکش خاک شور، نمک به کاغذ صافی چسبیده و در اندازه‌گیری رطوبت خطا ایجاد می‌کند، از این رو، کاغذهای صافی مرطوب، مجدداً خشک شده و وزن گردیدند و با تفاضل وزن آن‌ها مقدار رطوبت واقعی (W_f) مطابق رابطه (۱) محاسبه شد [۱۳]. در این رابطه، M_w جرم کاغذ صافی مرطوب وظرف آلومینیومی سرد، M_f جرم کاغذ صافی خشک و ظرف آلومینیومی گرم، M_{fs} جرم کاغذ صافی خشک به اضافه جرم نمک و ظرف آلومینیومی گرم، M_s جرم نمک حاصل اختلاف M_{fs} و M_f و M_{ws} جرم کاغذ صافی مرطوب، جرم نمک و ظرف آلومینیومی سرد است. در نهایت مقدار مکش کل و بافتی (h) مطابق رابطه (۲) محاسبه گردید.

$$W_f = \frac{M_w}{M_f} = \frac{M_{ws} - M_s}{M_{fs} - M_s} \qquad (1)$$

ACCEPTED MANUSCRIPT

$$h = 5.332 - 0.0779(W_f) \quad (2)$$.

۵-۲- آزمایش برش مستقیم

خاک شور با میزان رطوبت ۵ و ۱۰٪ (بر اساس نسبت جرم آب به جرم خاک و نمک) در ۳ لایه در قالب آزمایش برش تا رسیدن به دانسیته خشک $1/623 gr/cm^3$ کوبیده شد. سپس نمونه به مدت ۲۴ ساعت مهر و موم شد تا نمک موجود در خاک رسوب کند. در نهایت آزمایش برش مستقیم با دو تکرار بر روی نمونه‌های غیراشباع انجام گردید.

۶-۲- بررسی تغییرات ریز ساختار خاک

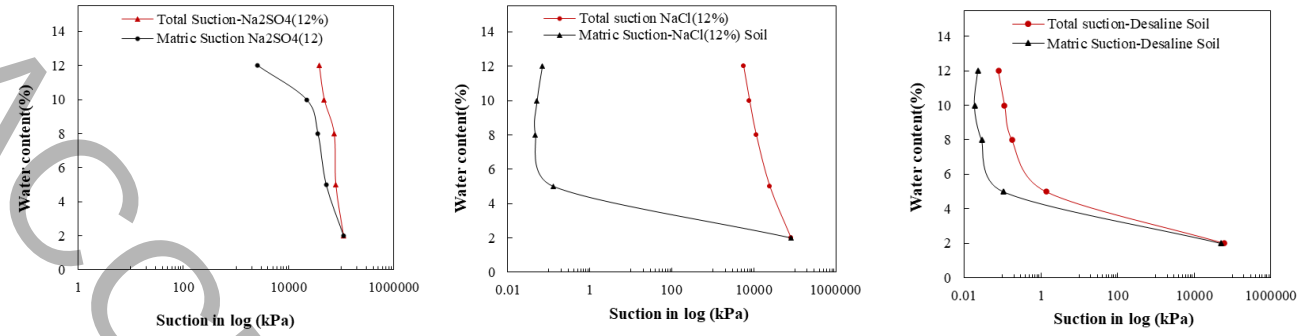
برای بررسی تغییرات ریزساختار خاک شور بر اثر وجود نمک‌های سدیم سولفات و سدیم کلرید در محدوده ۲ تا ۱۲٪، خاک شور، در قالب‌های دایره‌ای به قطر و ارتفاع ۲/۵ cm در دانسیته هدف در رطوبت‌های ۵ و ۱۰٪ کوبیده شده و به مدت ۲۴ ساعت مهر و موم گردید تا کریستال‌های نمک بین ذرات خاک تشکیل شوند. سپس ریزساختار نمونه‌های ساخته شده با میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۴۰ برابر مورد بررسی قرار گرفت.

۳-نتایج و بحث

۱-۳- نتایج آزمایش مکش خاک

شکل ۳-الف نتایج اندازه گیری مکش در خاک نمک‌زدایی شده را نشان می‌دهد که در آن، مکش بافتی و مکش کل، تفاوت ناچیزی با یکدیگر دارند و حداکثر مکش کل و مکش بافتی در میزان رطوبت ۲٪ رخ می‌دهد. این میزان رطوبت که در رژیم رطوبتی pendular شناخته می‌شود، به دلیل ایجاد لایه نازکی از آب و چسبندگی ظاهری ناشی از آن مشاهده می‌شود. با افزایش رطوبت و ضخیم تر شدن لایه آب، رژیم رطوبتی به حالت funicular تغیر یافته و تنش های مویینگی از بین می‌روند، در نتیجه مقدار مکش کاهش می‌یابد. در نهایت در درصد اشباع بالا در رژیم رطوبتی capillary، مکش خاک به مقدار حداقل خود می‌رسد[۳۰]. بر اساس شکل ۳-ب با افزایش ۱۲ درصدی سدیم کلرید، مکش بافتی نسبت به خاک نمک زدایی شده تغییرات جزیی دارد اما مکش کل با افزایش درصد رطوبت به دلیل انحلال نمک در آب و به وجود آمدن مکش اسمزی افزایش یافته است. با کاهش میزان رطوبت از ۴٪ به پایین، به دلیل رسوب نمک و کریستال شدن آن، جزء اسمزی مکش،کاهش یافته و مکش بافتی و مکش کل همپوشانی دارند. سهم مکش بافتی در بازه رطوبتی ۵ الی ۱۲ ٪ در خاک حاوی سدیم کلرید به طور تقریبی کمتر از ۰/۰۰۰۵ ٪ است؛ برای نمونه، در رطوبت ۵ ٪، مکش کل برابر با ۲۴۵۶۵ kPa و مکش بافتی تنها ۰/۱۳ kPa اندازه‌گیری شده است. بنابراین مکش خاک حاوی سدیم کلرید در بازه رطوبتی بالا تحت کنترل مکش اسمزی قرار دارد. مطابق شکل ۳-ج در خاک سولفاته، میزان مکش کل و بافتی نسبت به خاک نمک زدایی شده به ازای درصدهای رطوبت مختلف بالاتر است. علت این امر را می‌توان خاصیت جذب آب نمک سدیم سولفات دانست (شکل ۴). در این خاک، مکش ماتریک در رطوبت‌های پایین سهم غالبی از مکش کل را تشکیل می‌دهد؛ به‌طوری‌که در رطوبت ۲ درصد، مکش بافتی برابر با ۱۱۰۱۶۶ kPa بوده که حدود ۹۹/۴٪ مکش کل را شامل می‌شود. با افزایش رطوبت، سهم مکش بافتی کاهش یافته و از ۶۵/۳٪ در رطوبت ۵٪ به ۴۸/۹٪ در رطوبت ۸٪ و نهایتاً به ۶/۶٪ در رطوبت ۱۲٪ رسیده است، که این روند نشان‌دهنده افزایش تدریجی سهم مکش اسمزی در خاک سولفاته با افزایش رطوبت است. جذب آب کریستال‌های سدیم سولفات موجب کاهش رطوبت و به تبع آن کاهش مکش اسمزی در رطوبت‌های کمتر از ۲٪ می‌شود؛ بنابراین اختلاف قابل توجهی بین مقادیر مکش کل و بافتی مشاهده نمی‌گردد. به‌طور کلی، نتایج کمی نشان می‌دهد که خاک حاوی سدیم کلرید تقریباً به طور کامل تحت کنترل مکش اسمزی است، در حالی که خاک حاوی سدیم سولفات رفتاری دوگانه از خود نشان می‌دهد؛ مکش ماتریک در رطوبت‌های پایین نقش غالب دارد و با افزایش رطوبت، مکش اسمزی به مؤلفه غالب تبدیل می‌شود.

ACCEPTED MANUSCRIPT



(c)- (ج)　　(b)-(ب)　　(a)-(الف)

شکل۳- تغییرات مکش خاک ماسه‌ای الف) خاک نمک زدایی شده، ب) افزایش ۱۲ ٪ سدیم کلرید، ج) افزایش ۱۲ ٪ نمک سدیم سولفات

Fig. 3. Changes in soil suction: (a) desalinated base soil, (b) soil amended with 12% sodium chloride, and c) soil amended with 12% sodium sulfate.



(c)-(ج)　　(b)-(ب)　　(a)-(الف)

شکل۴- فرآیند کریستالیزاسیون نمک سدیم سولفات الف) تناردیت(Thenardite) یا سدیم سولفات فاقد آب(Na_2SO_4)، ب) میرابیلیت(Mirabilite) یا سدیم سولفات متبلور شده با آب($Na_2SO_4.10H_2O$)، ج)افزایش چندین برابری حجم ذره نمک با جذب آب

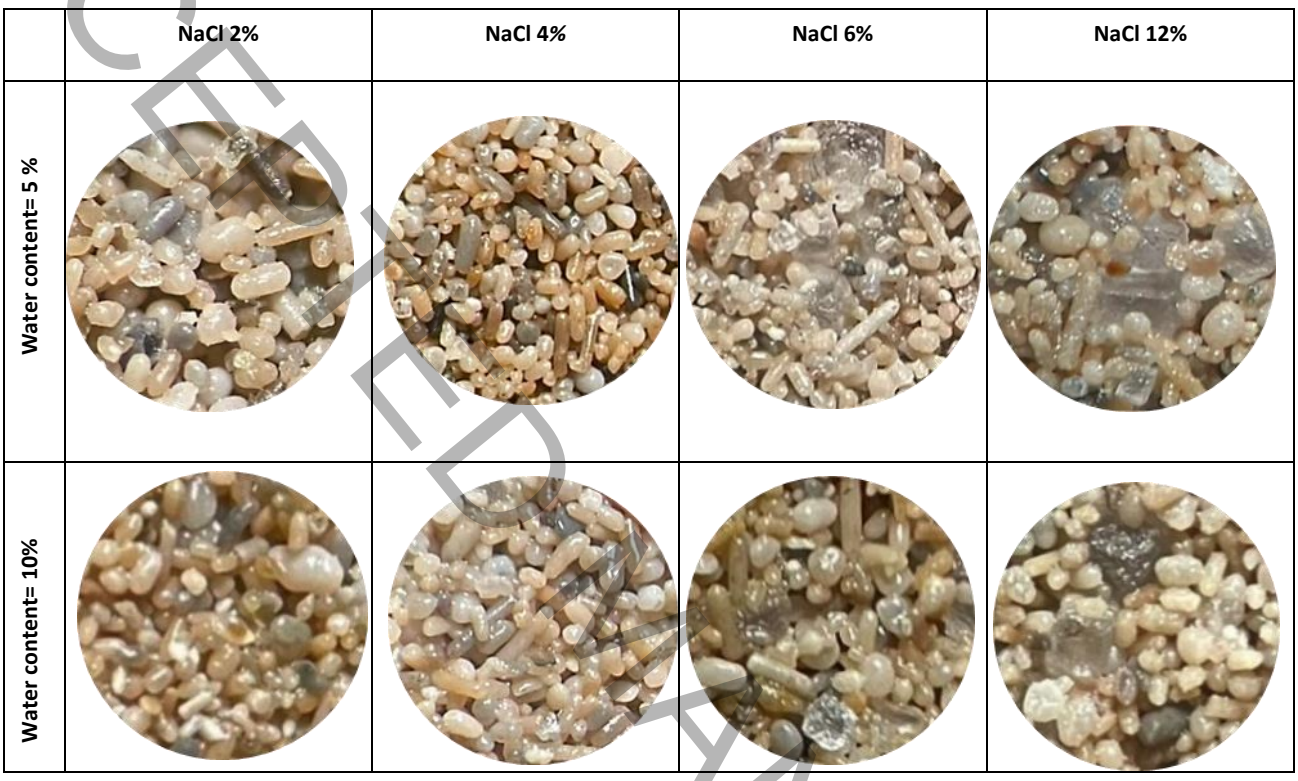
Fig. 4. Sodium sulfate crystallization process: (a) Thenardite (anhydrous sodium sulfate, Na_2SO_4), (b)Mirabilite (hydrated sodium sulfate, $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$), and (c) significant volumetric expansion of salt particles due to water absorption.

۲-۳-تغییرات ریزساختار خاک بر اثر رسوب نمک‌های سدیم کلرید و سدیم سولفات

ریزساختار نمونه‌های نمکی در درصد رطوبت‌های ۵٪ و ۱۰٪ با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. خاک غیر اشباع با میزان رطوبت ۵٪ در فاز رطوبتی funicular قرار دارد که در آن، منافذ خاک به طور کامل از آب پر نشده و شکاف‌های ناشی از وجود هوا در منافذ بین ذرات خاک وجود دارد [۱۳]. با توجه به بررسی عکس‌های میکروسکوپی شکل ۵ که خاک نمکی NaCl در میزان رطوبت ۵٪ را نشان می‌دهد، در مقادیر نمک بالای ۲٪، فرآیند کریستالیزاسیون در درمای محیط، آغاز شده و کریستال های نمک، باعث ایجاد اتصال نقطه‌ای در بین ذرات خاک گردیده‌اند. با افزایش میزان نمک تا ۴٪، علاوه بر محل تماس و سطح ذرات،

ACCEPTED MANUSCRIPT

پر شدگی منافذ توسط کریستال‌های نمک به میزان جزئی نیز مشاهده گردید. افزودن نمک با مقادیر ۶ و ۱۲٪ موجب تشکیل کریستال‌های بزرگ نمک، پر شدن فضای بین دانه‌ها و نیز اتصالات بیشتر بین ذرات خاک گردیده است[۲۸]. با افزایش رطوبت به ۱۰٪، منافذ پر شده از هوا کاهش یافته و توزیع آب به صورت یکنواخت‌تر بین ذرات خاک صورت می‌گیرد [۳۱]. بنابراین نحوه رسوب نمک بین ذرات خاک نیز دستخوش تغییر می‌گردد. با توجه به کاهش غلظت نمک با افزایش رطوبت، میزان کریستال‌های نمک در خاک و به خصوص پر شدگی منافذ در مقادیر نمک ۶ و ۱۲٪ در مقایسه با رطوبت ۵٪ کاهش چشمگیری داشته است.

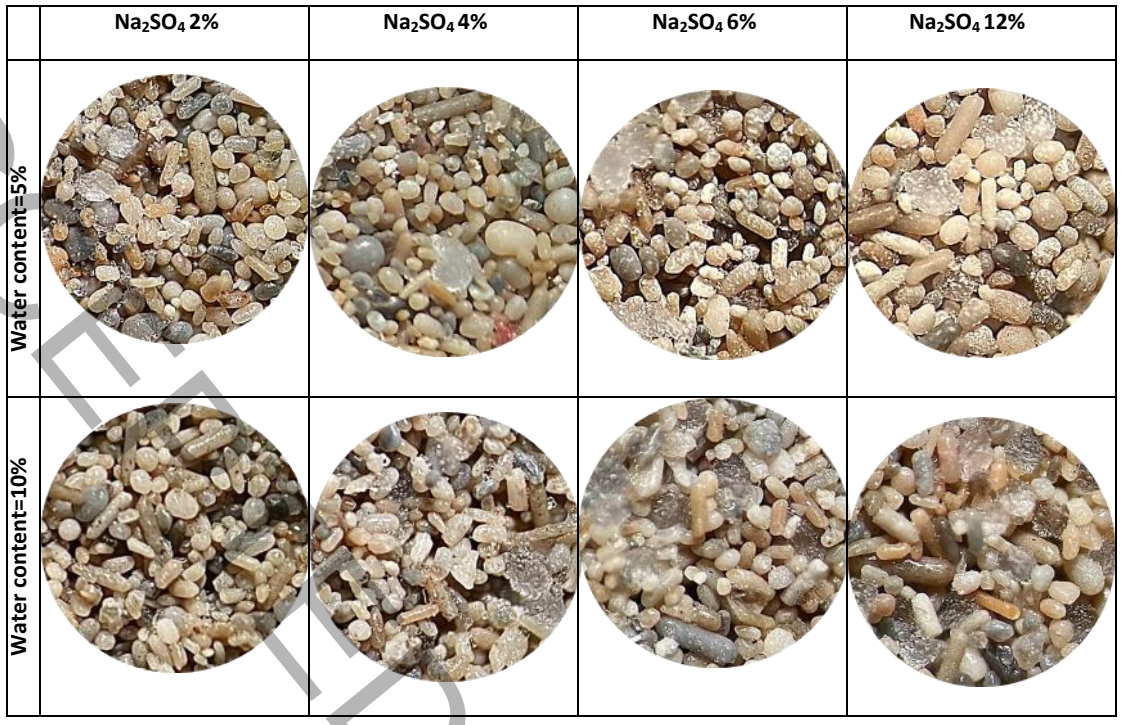


شکل۵- تغییرات ریزساختار خاک با افزایش نمک سدیم کلرید از ۲ تا ۱۲ ٪ در رطوبت‌های ۵ و ۱۰٪

Fig. 5. Changes in soil microstructure with increasing sodium chloride content from 2% to 12% at water contents of 5% and 10%.

تصاویر میکروسکوپی خاک نمکی سدیم سولفات در شکل ۶، در رطوبت ۵٪ نشان می‌دهد که در مقدار نمک ۲٪، با توجه به آغاز رسوب نمک در نقاط اتصال، اتصالات نقطه‌ای بین دانه‌های ماسه شکل گرفته‌اند که مقدار آن نسبت به میزان رسوب نمک در منافذ، بیشتر است. در حالیکه در مقادیر نمک ۴، ۶ و ۱۲٪ با افزایش غلظت نمک، و نیز افزایش حجم رسوب بین ذرات و داخل منافذ، رسوب نمک بر روی سطح دانه‌ها نیز افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه نمک‌های سولفاتی قابلیت جذب آب بالاتری در دمای محیط دارند، بر خلاف نمونه‌های سدیمی، با افزایش مقدار رطوبت از ۵ به ۱۰٪، کاهش چشمگیری در فرآیند کریستالی شدن و رسوب نمک مشاهده نمی‌گردد. حتی با افزایش رطوبت، اتصالات در سطوح بزرگتر شکل گرفته‌اند. با افزایش غلظت نمک، ضخامت رسوب نمک روی سطح ذرات نیز افزایش می‌یابد و در درصد نمک‌های ۶ و ۱۲٪ ذرات نمک در مسیر کریستال شدن، به یکدیگر چسبیده و منافذ خاک پر شده‌اند. مقایسه نمک رسوب کرده در میزان نمک ۶ و ۱۲٪ در رطوبت‌های ۵ و ۱۰٪ نشان می‌دهد که در رطوبت ۱۰٪ به دلیل رطوبت بیشتر، نمک سولفاتی، بیشتر متبلور شده و سدیم سولفات بی آب (Na_2SO_4) نسبت به خاک با میزان رطوبت ۵ ٪ مقدار کمتری دارد.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۶- تغییرات ریزساختار خاک با افزودن نمک سدیم سولفات از ۲ تا ۱۲ ٪ در رطوبت‌های ۵ و ۱۰٪

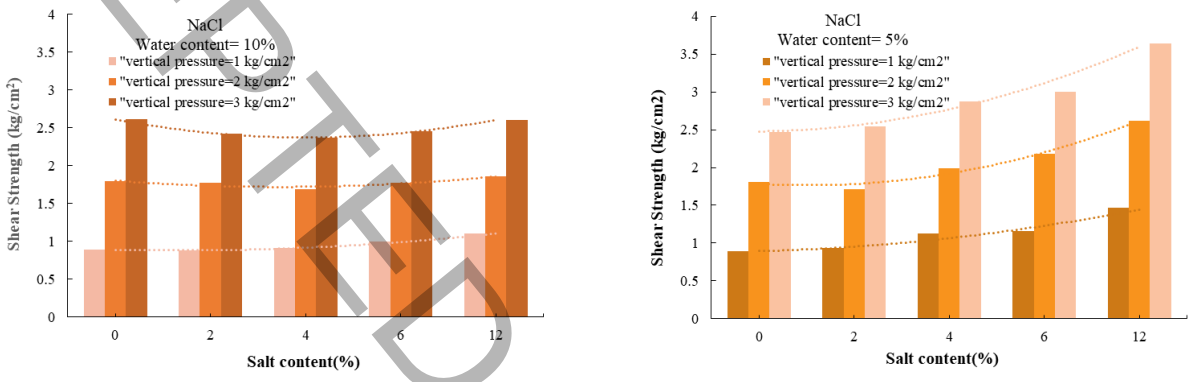
Fig. 6. Changes in soil microstructure with increasing sodium sulfate content from 2% to 12% at water contents of 5% and 10%.

۳-۳- تأثیر نمک سدیم کلرید بر مقاومت برشی خاک

شکل ۷ تغییرات مقاومت برشی ماسه بادی در دو مقدار رطوبت با افزودن نمک سدیم کلرید و جدول ۲ مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های مورد آزمون را نشان می‌دهند. بر اساس شکل ۷، با افزودن نمک سدیم کلرید، مقاومت برشی خاک نمکی نسبت به خاک نمک زدایی شده، به تدریج روند افزایشی دارد. در هر سه مقدار فشار قائم در رطوبت ۵٪، با افزایش تدریجی درصد نمک و فوق اشباع شدن آب حفره‌ای، مقاومت برشی خاک افزایش یافته است. پس از فوق اشباع شدن آب حفره‌ای، نمک‌های رسوبی مطابق با عکس‌های میکروسکوپی شکل ۵ ابتدا به صورت اتصالات نقطه‌ای و سپس با افزایش میزان نمک به مقادیر ۶ و۱۲٪ به صورت کریستالی در منافذ خاک مشاهده قرار گرفته و سبب ایجاد ساختار متراکم‌تری می‌گردند. در نتیجه، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک افزایش می‌یابد. به طوری که با افزایش مقدار نمک به ۴٪، مقدار چسبندگی به ۰/۲۶ kg/cm^2 افزایش یافته که معادل حدود ۷۳٪ افزایش نسبت به نمونه مبنا است، در حالی که زاویه اصطکاک داخلی نیز از ۳۸/۵° به ۴۱° افزایش یافته و رشد حدود ۶/۵ ٪ را نشان می‌دهد. این افزایش همزمان بیانگر آغاز نقش مؤثر رسوب کریستال‌های نمک در نقاط تماس ذرات و ایجاد اتصالات بین‌دانه‌ای است. در درصد نمک ۶٪، چسبندگی به ۰/۳ kg/cm^2 می‌رسد که نسبت به نمونه بدون نمک افزایش حدود ۱۰۰٪ را نشان می‌دهد و زاویه اصطکاک داخلی نسبت به رطوبت ۴٪ تغییری ندارد. در این مرحله، رشد کریستال‌های نمک و پرشدگی بخشی از منافذ خاک منجر به کاهش تحرک نسبی ذرات و افزایش مقاومت برشی می‌گردد. بیشترین تأثیر افزودن نمک در مقدار۱۲٪ مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که چسبندگی به ۰/۴۱ kg/cm^2 افزایش یافته و حدود ۱۷۳٪ افزایش نسبت به نمونه مبنا را نشان می‌دهد. همچنین زاویه اصطکاک داخلی با رسیدن به ۴۷° حدود ۲۲٪ افزایش می‌یابد. این افزایش چشمگیر ناشی از تبلور گسترده سدیم کلرید، تشکیل کریستال‌های بزرگ، پرشدگی قابل توجه منافذ و ایجاد یک شبکه پیوسته از پیوندهای نمکی بین ذرات خاک است. در رطوبت ۱۰٪

ACCEPTED MANUSCRIPT

نیز، روند تغییرات مقاومت برشی همانند رطوبت ۵٪ می‌باشد با این تفاوت که روند افزایشی آن در رطوبت ۱۰٪، نسبت به رطوبت ۵٪ شیب کمتری دارد و میزان افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در اثر رسوب نمک، نسبت به رطوبت ۵ ٪ کمتر است زیرا با افزایش درصد رطوبت، انحلال نمک نیز افزایش یافته و اثر منفی بر مقاومت برشی می‌گذارد. با توجه به عکس‌های میکروسکوپی شکل ۳، در میزان رطوبت ۵٪ کریستال های سدیم کلرید بیشتری نسبت به رطوبت ۱۰٪ با افزایش نمک مشاهده می‌گردند. در نتیجه به دلیل کاهش کریستال‌های نمک در رطوبت ۱۰٪، مطابق جدول ۲، مولفه‌های مقاومت برشی نیز کمترند. علاوه بر رسوب کریستال‌های نمک و پر شدن منافذ خاک، مطابق توضیحات بخش ۳-۱، افزایش مکش اسمزی خاک با افزودن نمک سدیم کلرید نیز در افزایش مقاومت برشی خاک نمکی نسبت به خاک نمک‌زدایی شده می‌تواند موثر باشد. این نتیجه، با مطالعه ژانگ در سال ۲۰۲۳، که به منظور بررسی اثر نمک سدیم کلرید ۵ درصدی بر مکش کل و تأثیر آن بر مقاومت خاک لسی انجام گردیده بود مطابقت دارد [۳۲].



(b)-(ب) (a)-(الف)

شکل ۷- تغییرات مقاومت برشی خاک با افزودن نمک سدیم کلرید تحت تنش‌های قائم متفاوت الف) رطوبت ۵٪ ، ب)رطوبت ۱۰٪

Fig. 7. Variation in soil shear strength with sodium chloride addition under different normal stresses: (a) 5% water content, (b) 10% water content.

جدول۲-تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک با افزودن نمک سدیم کلرید

Table 2. Variations in soil cohesion and internal friction angle with the addition of sodium chloride.

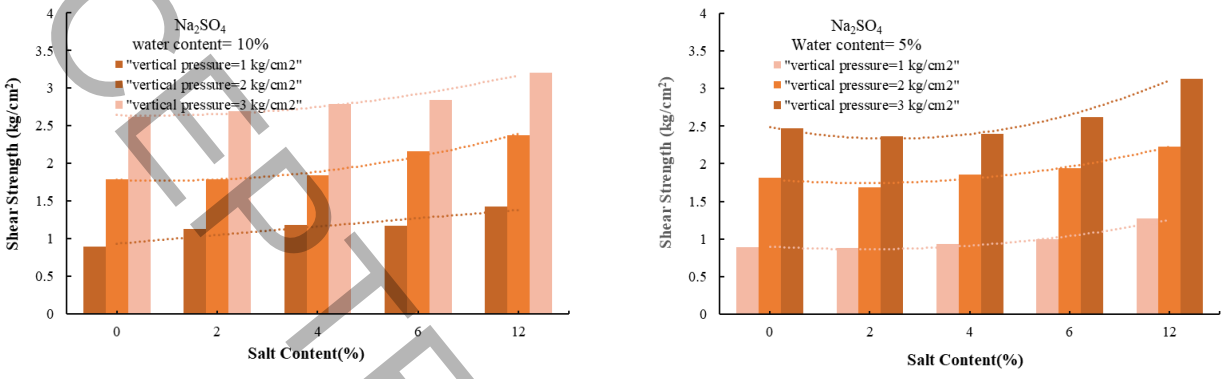
		رطوبت ۵٪		رطوبت ۱۰٪	
نوع نمک	میزان نمک (٪)	C (kg/cm^2)	Ø (°)	C (kg/cm^2)	Ø (°)
NaCl	۰	۰/۱۵	۳۸/۵	۰/۰۴	۴۰/۲۵
	۲	۰/۱۵	۳۸/۵	۰/۱۶	۳۷/۵
	۴	۰/۲۶	۴۱	۰/۲۴	۳۵/۷
	۶	۰/۳	۴۱	۰/۲۹	۳۶
	۱۲	۰/۴۱	۴۷	۰/۳۱	۳۸

۳-۴-تأثیر نمک سدیم سولفات بر مقاومت برشی خاک

مقاومت برشی در خاک‌های سولفاته مطابق شکل ۸ و جدول ۳، در هر دو مقدار رطوبت ۵ و ۱۰٪ تا میزان نمک ۲٪ تقریباً ثابت بوده و سپس با افزایش مقدار نمک، به تدریج افزایش می‌یابد. برای مثال، با افزایش درصد سدیم سولفات به ۴٪ و ۶٪ در رطوبت ۵٪، چسبندگی به ترتیب ۶۷ و ۱۰۰٪ افزایش نسبت به نمونه مبنا نشان داده است در حالیکه تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در حدود ۲/۵ ٪ کاهش برای ۴٪ نمک و ۵٪ افزایش برای ۶٪ نمک بوده است. بیشترین اثر در ۱۲٪ نمک و رطوبت ۱۰٪ مشاهده می‌شود که

ACCEPTED MANUSCRIPT

چسبندگی حدود ۱۱ برابر افزایش نسبت به نمونه مبنا افزایش نشان می‌دهد.به طور کلی افزایش سدیم سولفات تغییرات قابل توجهی بر زاویه اصطکاک داخلی خاک ندارد و تغییرات مقاومت برشی بیشتر، تحت تأثیر مقدار چسبندگی است. افزایش مقاومت برشی می-تواند ناشی از افزایش مکش بافتی به دلیل جذب آب سدیم سولفات، افزایش تبلور نمک و تشکیل پیوندهای قوی‌تر بین دانه‌های خاک، ایجاد کریستال‌های بزرگ و نیز پرشدن منافذ خاک باشد. افزایش مکش بافتی بر اثر افزودن سدیم سولفات در مطالعه Ji و همکاران در سال ۲۰۲۲ در خاک لسی نیز گزارش گردیده است [۱۳]. تأثیر بیشتر نمک سدیم سولفات بر چسبندگی خاک نسبت به نمک سدیم سولفات حتی در درصد رطوبت بالاتر، می‌تواند ناشی از خاصیت جذب آب این نمک و افزایش مکش بافتی باشد.



(b)-(ب) (a)-(الف)

شکل ۸- تغییرات مقاومت برشی خاک با افزودن نمک سدیم سولفات تحت تنش‌های قائم متفاوت الف) رطوبت ۵٪، ب)رطوبت ۱۰٪

Fig. 8. Variations in soil shear strength with the addition of sodium sulfate under different normal stresses: (a) 5% water content and (b) 10% water content.

جدول۳-تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک با افزودن نمک سدیم سولفات

Table 3. Variations in soil cohesion and internal friction angle with the addition of sodium sulfate.

نوع نمک	میزان نمک (٪)	رطوبت ۵٪		رطوبت ۱۰٪	
		C (kg/cm^2)	Ø (°)	C (kg/cm^2)	Ø (°)
Na_2SO_4	۰	۰/۱۵	۳۸/۵	۰/۰۴	۴۰/۲۵
	۲	۰/۲۳	۳۶/۶	۰/۲۷	۳۸/۵
	۴	۰/۲۸	۳۷/۵	۰/۳۴	۳۹
	۶	۰/۳	۴۰/۵	۰/۴	۴۰
	۱۲	۰/۴	۴۱/۵	۰/۴۵	۴۱

۴-نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر دو نوع نمک سدیم کلرید و سدیم سولفات بر مقاومت برشی ماسه‌های بادی حوضه دریاچه ارومیه در درصدهای رطوبت مختلف ارزیابی گردید. همچنین تغییرات مکش در میزان نمک ۱۲٪ و تفاوت ریزساختار نمونه‌های نمکی به ازای درصدهای مختلف نمک و رطوبت بررسی شدند. دو نوع نمک مورد استفاده دارای خواص متفاوت در خواص فیزیکی، کریستالیزاسیون و انحلال‌پذیری می‌باشند. نمک سدیم سولفات دارای خاصیت جذب آب بالایی بوده و فرآیند انحلال‌پذیری و کریستالیزاسیون آن نسبت به تغییرات دما بسیار حساس است. اهم نتایج اخذ شده از این تحقیق، به شرح زیر می‌باشند:

-افزایش سدیم کلرید موجب تغییر جزیی مکش بافتی و افزایش قابل توجه مکش کل در درصد رطوبت های بالا به دلیل مکش اسمزی می‌شود. با کاهش میزان رطوبت، مکش اسمزی کاهش یافته و منحنی مکش کل و مکش بافتی همگرا می‌گردند. در حالی که افزودن سدیم سولفات، مکش بافتی و مکش کل را همزمان افزایش داده و این دو منحنی با یکدیگر همپوشانی دارند.

ACCEPTED MANUSCRIPT

-با افزودن نمک به ماسه بادی به ازای درصد رطوبت ثابت در دمای محیط، مقاومت برشی خاک ثابت بوده و یا افزایش می‌یابد. افزایش مقاومت برشی به دلیل تشکیل کریستال‌های نمک و ایجاد پیوند بین دانه‌های ماسه، همچنین پرشدگی منافذ خاک رخ می‌دهد. علاوه بر این، تغییر در مولفه‌های مکش خاک، در اثر افزودن نمک نیز در افزایش مقاومت برشی می‌تواند موثر واقع گردد.

-با افزایش رطوبت از ۵ به ۱۰٪ به ازای درصد نمک ثابت، مقاومت برشی خاک بر اساس نوع نمک، ممکن است افزایش و یا کاهش یابد. در خاک حاوی نمک سدیم کلرید، چنانچه میزان رطوبت خاک به حدی برسد که نمک در فاز انحلال قرار گیرد، اتصال بین ذرات خاک از بین رفته و مقاومت برشی روند کاهشی می‌یابد. در حالیکه نمک سدیم سولفات در هر دو میزان رطوبت ۵ و ۱۰٪ با جذب رطوبت خاک، متبلور شده و بین ذرات خاک چسبندگی ایجاد می‌کند. همچنین این نمک، مولفه مکش بافتی را با کاهش آب آزاد، افزایش داده و در نهایت سبب افزایش مقاومت برشی با افزایش رطوبت می‌گردد.

۴-منابع و مراجع

[1] S.A. Shahid, M. Zaman, L. Heng, Soil Salinity: Historical Perspectives and a World Overview of the Problem, in: Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques, 2018, pp. 43–53.

[2] Z. Duan, J. Wang, X. Yan, K. Song, L. Zheng, M. Zhang, Study on the structure and strength characteristics of loess under the action of sodium sulfate, Environ Sci Pollut Res Int, 30(60) (2023) 125609–125627.

[3] J.-t. Fu, X.-s. Hu, X.-l. Li, D.-m. Yu, Y.-b. Liu, Y.-Q. Yang, Z.-x. Qi, S.-x. Li, Influences of soil moisture and salt content on loess shear strength in the Xining Basin, northeastern Qinghai-Tibet Plateau, Journal of Mountain Science, 16(5) (2019) 1184–1197.

[4] H. Bayat, E. Ebrahimi, M. Fallah, Estimation of soil moisture using confined compression curve parameters, Geoderma, 318 (2018) 64–77.

[5] L. Ma, The Effect of Moisture Content on the Loess Physical Properties, Advanced Materials Research, 1065-1069 (2014) 81–84.

[6] Z.-F. Xue, W.-C. Cheng, L. Wang, G. Song, Improvement of the shearing behaviour of loess using recycled straw fiber reinforcement, KSCE Journal of Civil Engineering, 25(9) (2021) 3319–3335.

[7] B. Fatahi, U. Pathirage, B. Indraratna, M. Pallewattha, H. Khabbaz, The Role of Native Vegetation in Stabilizing Formation Soil for Transport Corridors, in: Ground Improvement Case Histories, 2015, pp. 591–628.

[8] H.S. Suh, Evolution of anisotropic capillarity in unsaturated granular media within the pendular regime, International Journal of Geo-Engineering, 15(1) (2024).

[9] Z. Ying, Y.-J. Cui, N. Benahmed, M. Duc, Salinity effect on the compaction behaviour, matric suction, stiffness and microstructure of a silty soil, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 13(4) (2021) 855–863.

[10] C. Rodriguez-Navarro, E. Doehne, E. Sebastian, How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials, Cement and concrete research, 30(10) (2000) 1527–1534.

[11] S. Peng, F. Wang, L. Fan, H. Moayedi, Experimental Study on Influence of Vaporous Water on Salt Expansion of Sulfate Saline Soil, Advances in Civil Engineering, 2019(1) (2019).

[12] J. Fang, X. Li, J. Liu, C. Liu, Z. Liu, Y. Ji, The crystallization and salt expansion characteristics of a silty clay, Cold Regions Science and Technology, 154 (2018) 63–73.

[13] Y. Ji, B. Bai, Q. Nie, X. Li, Experimental study on the water retention properties of sulfate saline soils during the cooling process, Cold Regions Science and Technology, 207 (2023).

[14] Z. Ying, N. Benahmed, Y.-J. Cui, M. Duc, Determining osmotic suction through electrical conductivity for unsaturated low-plasticity soils, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 14(6) (2022) 1946–1955.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[15] Y. Zhang, Knowledge of earthen heritage deterioration in dry areas of China: salinity effect on the formation of cracked surface crust, Heritage Science, 11(1) (2023).
[16] J. He, J. Chu, Cementation of sand due to salt precipitation in drying process, Marine Georesources & Geotechnology, 35(3) (2016) 441–445.
[17] Y. Ji, B. Bai, X. Li, H.-h. Cui, Influence of cooling-induced salt crystallization on the shear strength of sulfate saline soils, Cold Regions Science and Technology, 240 (2025).
[18] D. Ma, H. Feng, Y. Yuan, J. Chang, J. Chang, Dissolution load-settlement behaviour of saline soil and compression criterion for the natural foundation of high-speed railways, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 81(9) (2022).
[19] Z. Duan, K. Song, N. Zhang, L.-C. Zheng, X.-S. Yan, M.-M. Zhang, Characteristics and mechanisms of soil structure damage under salt weathering, Soil and Tillage Research, 238 (2024).
[20] B.-P. Wen, L. He, Influence of lixiviation by irrigation water on residual shear strength of weathered red mudstone in Northwest China: Implication for its role in landslides' reactivation, Engineering Geology, 151 (2012) 56–63.
[21] S. Zhang, S. Shao, S. Shao, H. Wu, Z. Wang, X. Zhu, Investigation of the Mechanical Behavior of Saline Loess Using Unsaturated True Triaxial Tests and a Constitutive Framework, KSCE Journal of Civil Engineering, (2025).
[22] Planning and Budget Organization, Guidelines for Laboratory Analysis of Soil and Water Samples, 467 Iran, 2008.
[23] ASTM D2487-11, Standard practice for classification of soils for engineering purposes, 2011.
[24] ASTM D4254-16, Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density, 2016.
[25] ASTM D4253, Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table, West Conshohocken, PA, 2006.
[26] British Standards Institution, Methods of tests for soils for civil engineering purposes—Part 2: Classification tests BS 1377-2, British Standards Institution, London, UK, 1996.
[27] ASTM D4972-01, Standard Test Method for pH of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.
[28] M. Li, S. Chai, H. Du, C. Wang, Effect of chlorine salt on the physical and mechanical properties of inshore saline soil treated with lime, Soils and Foundations, 56(3) (2016) 327–335.
[29] ASTM D5298-10, Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
[30] T.A. Pham, M. Sutman, G.M. Medero, Validation, Reliability, and Performance of Shear Strength Models for Unsaturated Soils, Geotechnical and Geological Engineering, 41(7) (2023) 4271–4309.
[31] R.M. Azoor, R.N. Deo, N. Birbilis, J. Kodikara, On the optimum soil moisture for underground corrosion in different soil types, Corrosion Science, 159 (2019).
[32] F. Zhang, G. Wang, T. Kamai, W. Chen, D. Zhang, J. Yang, Undrained shear behavior of loess saturated with different concentrations of sodium chloride solution, Engineering Geology, 155 (2013) 69–79.

ACCEPTED MANUSCRIPT