مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی/جلد ١٤/ شماره ٣/سال ١٣٩٢/ص ٨٢-٦٧

# بررسی تأثیر شوری آب منفذی بر رفتار تحکیمی و تراکمی خاک‌های رسی

نادر عباسی*، مهدی اویسی‌ها و محمد موحدان**

* نگارنده مسئول، نشانی: کرج، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، ص. پ. ٨٤٥- ٣١٥٨٥، تلفن: ٣٢٧٠٥٣٢٠(٠٢٦)، پیام‌نگار: nader_iaeri@yahoo.com

** به‌ترتیب: عضو هیأت علمی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی؛ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد رشته خاک و پی؛ و پژوهشگر موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

تاریخ دریافت: ٩١/١٢/٥ ؛ تاریخ پذیرش: ٩٢/٦/٢

## چکیده

**تعیین مشخصات تراکمی و نشست تحکیمی خاک، یکی از گام‌های مهم در طراحی پی پروژه‌های عمرانی و به ویژه سازه‌های آبی است. به طور کلی خواص مهندسی خاک‌های ریزدانه، به ویژه خاک‌های رسی، متأثر از ویژگی‌های مربوط به نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده، ساختمان و کیفیت شیمیایی آب منفذی آن‌ها است. املاح موجود در آب منفذی خاک به لحاظ نقش‌شان در ماهیت و مقدار نیروهای الکتروشیمیایی بین ذرات رسی، تأثیر قابل توجهی بر خواص مهندسی خاک نظیر چسبندگی، مقاومت، قابلیت نشست و تراکم‌پذیری آن‌ها دارند. در این پژوهش، چگونگی تأثیر سه نوع نمک سدیمی شامل: کلرید سدیم، سولفات سدیم و کربنات سدیم بر برخی ویژگی‌های مکانیکی خاک‌های رسی شامل مشخصات تراکمی (رطوبت بهینه و دانسیتهٔ خشک ماکزیمم) و شاخص‌های نشست تحکیمی (نمایهٔ فشردگی و ضریب تحکیم) بررسی شد. بدین منظور با در نظر گرفتن ٣ نوع نمک و ٥ مقدار مختلف برای هر نوع نمک، ١٥ تیمار آزمایشی در نظر گرفته شد که با ٣ تکرار، به اضافهٔ یک تیمار شاهد (صفر درصد نمک) در مجموع، ٤٦ نمونه خاک برای اندازه‌گیری مشخصات تراکمی و تحکیمی تهیه و آزمایش شد. مقادیر حاصل از اندازه‌گیری نمایه فشردگی و ضریب تحکیم به‌صورت یک آزمایش فاکتوریل ٦×٣ با فاکتور اصلی نوع نمک در سه سطح (کلرید سدیم، سولفات سدیم و کربنات سدیم) و فاکتور فرعی میزان نمک در پنج سطح (٠/٥، ١، ٢، ٥ و ١٠ درصد) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار، توسط نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. مقایسهٔ میانگین‌ها در سطح آماری ١ درصد با آزمون دانکن انجام پذیرفت. بر اساس نتایج حاصل از بررسی‌ها مشخص شد که میزان و نوع شوری خاک تأثیر چشمگیری بر مشخصات تراکمی خاک یعنی رطوبت بهینه و دانسیته خشک ماکزیمم ندارد. ولی مقدار و نوع شوری حاصل از کاربرد نمک‌های یاد شده تأثیر معنی‌داری بر نمایهٔ فشردگی و ضریب تحکیم خاک دارند. همچنین، دامنهٔ تغییرات ضریب تحکیم در اثر افزایش میزان شوری نسبت به نمایه فشردگی بیشتر است.**

## واژه‌های کلیدی

**دانسیته خشک ماکزیمم، رطوبت بهینه، شوری خاک، ضریب تحکیم، نمایه فشردگی**

## مقدمه

خواص مهندسی خاک‌های ریزدانه به ویژه خاک‌های رسی تابع عوامل متعددی است؛ از جمله: دانسیته، تخلخل، ساختمان، تاریخچهٔ تنشی، میزان رطوبت، دانه‌بندی، میزان و نوع کانی‌های رسی، خاصیت خمیری و میزان و نوع املاح موجود در آب منفذی. تغییر در هریک از این ویژگی‌ها، خواص فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها را تغییر می‌دهد و به تبع آن، سازه‌های بنا شده روی خاک نیز دچار تغییر و یا تهدیداتی می‌شود. تحکیم‌پذیری و قابلیت تراکم از جمله ویژگی‌های مهندسی خاک هستند

© 2015,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0 ).

که در طراحی مربوط به پی و بستر اغلب سازه‌های عمرانی به ویژه سازه‌های آبی نقش اساسی دارد. تعیین مشخصات تراکمی و ضرایب تحکیم خاک‌ها از نیازهای طراحی محسوب می‌شوند. اصولاً تئوری تحکیم خاک بر مفهوم تنش‌های مؤثر بنا شده است که در آن آب منفذی و ذرات جامد از لحاظ شیمیایی بی‌اثر فرض می‌شوند و واکنش شیمیایی بین فازهای مختلف در نظر گرفته نمی‌شود. در حالی‌که به دلیل بار منفی موجود بر سطح ذرات کانی‌های رسی، نیروهای الکتروشیمیایی بین فازهای جامد، مایع و محلول خاک به وجود می‌آید که می‌توانند اساساً رفتار مکانیکی خاک رسی را تغییر دهند. کمیت و ماهیت نیروهای الکتروشیمیایی و به تبع آن تغییر در خواص خاک به مقدار و نوع آنیون و کاتیون‌های موجود در فاز تبادلی و میزان تأثیر آن‌ها در ظرفیت تبادل کاتیونی بستگی دارد (Abbasi *et al.*, 2010). علاوه بر این، ممکن است کیفیت شیمیایی خاک بستر سازه‌ها در طول دوران بهره‌برداری دستخوش تغییراتی شود و در نتیجه رفتار و مشخصات مهندسی آن‌ها تغییر یابد، تا آن‌جا که در اثر این تغییرات، پایداری سازه‌های بنا شده روی این گونه خاک‌ها مورد تهدید قرار گیرد و حتی خسارات زیادی به آن‌ها وارد شود.

تغییر در کیفیت شیمیایی آب منفذی، یا به عبارت دیگر، تغییر در میزان و نوع نمک‌های موجود در خاک (کاهش یا افزایش) پدیده‌ای است که وقوع آن، در اثر فعالیت‌های مختلف انسان یا به طور طبیعی، اجتناب‌ناپذیر است. ورود فاضلاب‌های شهری و پساب‌های کشاورزی به طبیعت از مهم‌ترین عوامل ایجاد تغییر در کیفیت شیمیایی آب منفذی خاک‌های مناطق مختلف به ویژه حاشیهٔ شهرهای بزرگ به شمار می‌رود. فراوانی آب‌های شور در سطح زمین و پیشروی آن‌ها به سمت منابع آب شیرین و خشکی‌ها و ورود مواد شیمیایی ناشی از شیرابهٔ محل‌های دفن زباله یا مواد زائد ناشی از کارخانه‌های صنعتی به خاک‌ها، از جمله عوامل دیگری هستند که می‌توانند باعث تغییر در میزان و نوع شوری خاک‌ها و در نتیجه خواص ژئوتکنیکی آن‌ها شوند (Sadaghiani & Ghadak, 2004). تغییر در خواص مهندسی خاک می‌تواند باعث ایجاد تغییراتی در پارامترهای مورد استفاده در طراحی سازه‌های خاکی و پی‌های سایر سازه‌ها و بناهای آبی و عمرانی شود. بنابراین شناخت رفتار و عکس‌العمل خاک تحت تأثیر محلول‌ها و مواد مختلف می‌تواند در طراحی‌ها و تصمیم‌گیری صحیح، مؤثر واقع شود. نوع مواد شیمیایی که با خاک رس ترکیب می‌شوند و همچنین ترکیبات تشکیل‌دهندهٔ خاک رس یکی از مسائل مهم در درک نحوهٔ تغییر خصوصیات مهندسی خاک است.

در خصوص بررسی و تعیین اثر محلول‌ها و نمک‌های مختلف بر خواص مهندسی خاک‌های رسی تحقیقات پراکنده و متنوعی توسط محققان مختلف انجام گرفته است. لمب (Lambe, 1958) می‌گوید در یک نسبت تخلخل معین، هر تغییری در سیستم آب- خاک که لایه دوگانه را متورم کند، در جهت کاهش مقاومت عمل می‌کند. وقوع چنین پدیده‌ای به علت افزایش دافعهٔ بین ذره‌ای است؛ به این معنا که تغییر در عوامل مختلف مانند کاهش غلظت الکترولیت، تعویض کاتیونی از ظرفیت زیاد به کم یا از شعاع کوچک به شعاع بزرگ، جذب آنیون‌ها، افزایش در ثابت دی‌الکتریک سیال حفره‌ای، افزایش اسیدیتهٔ آب منفذی، کاهش دما و افزایش درصد رطوبت می‌تواند موجب تغییر رفتار مهندسی خاک شود.

میشل (Mitchell, 1993) معتقد است که علاوه بر نوع و میزان رس موجود در خاک، مشخصات شیمیایی آن نظیر میزان و نوع آنیون و کاتیون‌های موجود نیز تأثیر بسزایی در رفتار فیزیکی و مکانیکی خاک نظیر ساختمان، پایداری خاکدانه، مقاومت برشی، تحکیم‌پذیری و به ویژه خاصیت تورم‌پذیری دارد. عبدالله و همکاران

(Abdullah *et al*., 1997) اثر سه نوع کاتیون شامل سدیم به عنوان نمونه‌ای از کاتیون‌های تک ظرفیتی، کلسیم به عنوان نمونه‌ای از کاتیون‌های دو ظرفیتی و پتاسیم به دلیل تأثیر خاصش بر رس‌های ایلیت را بر خصوصیات تحکیمی خاک‌های رسی مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان‌دهندهٔ این واقعیت است که پتاسیم باعث تغییرات بنیادی در رفتار خاک تحت آزمایش می‌شود و تأثیر آن بر شاخص فشردگی نمونه‌های دست نخورده، شدیداً به دانسیته خشک خاک وابسته است. ون پاسن و گاریو (Van Paassen & Gareau, 2004) اثر شوری آب منفذی بر قابلیت فشردگی خاک‌های رسی را بررسی کردند. ییلماز (Yilmaz, 2006) نشان داد که بین ظرفیت تبادل کاتیونی و مشخصات مکانیکی، از جمله تورم و حد روانی، رابطهٔ مناسبی وجود دارد. یوکسلن و همکاران (Yukselen *et al*., 2008) اظهار می‌کنند که رفتار مهندسی خاک‌ها بسته به نوع کانی‌های رسی متفاوت است به طوری‌که خواص رس‌های مونت‌موریلونیتی شدیداً در برابر آب دریا تغییر می‌کند.

راوو و تیاگاراج (Rao & Thyagaraj, 2007) با آزمایش تحکیم، اثر محلول کلرید سدیم را بر رفتار تورم خاک رسی متراکم شده بررسی کردند. نتایج تحقیقات این محققان نشان می‌دهد که ورود محلول کلرید سدیم باعث تقلیل مقدار تورم و فشار تورمی می‌شود و حتی موجب ایجاد کرنش فشاری در نمونه نیز خواهد شد. بامگارتنر و همکاران (Baumgartner *et al*., 2008) نشان دادند که کلرید کلسیم باعث کاهش پتانسیل تورم می‌شود و رفتار تحکیمی تحت تأثیر کیفیت آب منفذی تغییر می‌کند.

اولسون و میترانواس (Olson & Mitronovas, 1960) با بررسی مشخصات تحکیمی و مقاومت برشی ایلیت کلسیمی و منیزیمی مشخص کردند که غلظت الکترولیت اثر کمی بر حدود اتربرگ دارد و بیشترین حدود اتربرگ در غلظت الکترولیت بین ۰/۰۱ و ۰/۱ نرمال رخ می‌دهد. این محققان در مورد تحکیم می‌گویند که بیشترین تأثیر در غلظت الکترولیت بین ۰/۰۱ و ۰/۱ نرمال به دست می‌آید اما اثر آن زیاد نیست و غلظت الکترولیت تقریبا اثری بر موقعیت منحنی تورم ندارد.

به رغم تحقیقات گسترده در خصوص ویژگی‌ها و خواص مختلف خاک‌ها، در زمینهٔ تأثیر کیفیت شیمیایی آب منفذی خاک در رفتار مهندسی خاک‌ها، مطالعه یا تحقیقات جامع و قابل توجه صورت نگرفته است. با توجه به این‌که منابع تولید آلاینده‌های حاوی مواد شیمیایی و نیز واکنش انواع خاک‌ها، بسته به نوع کانی‌ها و ترکیبات فلزی تشکیل‌دهندهٔ آن‌ها با آلاینده‌های مختلف متفاوت است، تعیین چگونگی تغییر خصوصیات مختلف مهندسی خاک‌ها به واسطهٔ انواع مواد شیمیایی و انواع رس‌ها امری ضروری و غیر قابل اجتناب است. با توجه به وسعت و پراکندگی خاک شور و سدیمی در مناطق مختلف ایران و همچنین پیشروی آب‌های شور حاوی نمک‌های سدیمی در مناطق ساحلی، این پژوهش با هدف بررسی و تعیین اثر سه نوع نمک سدیمی شامل کربنات سدیم، سولفات سدیم و کلرید سدیم بر مشخصات تحکیمی و تراکمی یک نوع خاک رسی اجرا شده است.

## مواد و روش‌ها

### تهیهٔ نمونه‌های آزمایشی

در این پژوهش به منظور بررسی اثر شوری آب منفذی بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها، از نمونه‌های مصنوعی با میزان و نوع شوری مختلف استفاده شد. بدین منظور ابتدا یک نمونهٔ خاک رسی با مشخصات فیزیکی مندرج در جدول ۱ از منطقهٔ کمال‌آباد کرج تهیه شد و با افزودن مقادیر مختلفی از نمک‌های سدیمی تیمارهای آزمایشی ساخته شدند.

**جدول ۱- مشخصات فیزیکی نمونه‌ها**

| وزن مخصوص Gs | طبقه بندی USCS | مشخصات تراکمی | | حدود اتربرگ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | دانسیته خشک ماکزیمم (گرم بر سانتی‌متر مکعب) | رطوبت بهینه (درصد) | حد انقباض | حد خمیری | حد روانی |
| ۲/۷ | CL | ۱/۶۶ | ۲۱/۸ | ۱۶/۵ | ۲۳/۵ | ۴۷/۵ |

پس از تهیهٔ نمونهٔ خاک طبیعی، برای به دست آوردن نمونه‌هایی با ویژگی‌های شیمیایی دلخواه، مقادیر مختلفی از نمک‌های کلرید سدیم، سولفات سدیم و کربنات سدیم به نسبت‌های صفر، ۰/۵، ۱، ۲، ۵ و ۱۰ درصد وزنی به نمونه‌ها اضافه شد. بدین ترتیب با در نظر گرفتن ۳ نوع نمک و پنج نسبت مختلف برای هر نوع نمک، ۱۵ تیمار آزمایشی در نظر گرفته شد که با ۳ تکرار و یک تیمار شاهد، در مجموع ۴۶ نمونه خاک برای اندازه‌گیری مشخصات تراکمی و تحکیمی مورد بررسی قرار گرفت. طرح آماری مورد استفاده، آزمایش فاکتوریل ۴×۳، با فاکتور اصلی نوع نمک در سه سطح (کلرید سدیم، سولفات سدیم و کربنات سدیم) و فاکتور فرعی میزان نمک در شش سطح (۰/۵، ۱، ۲، ۵ و ۱۰ درصد به اضافه یک نمونه، صفر درصد، به عنوان شاهد) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها، با نرم‌افزار SPSS تجزیه و تحلیل آماری شد و مقایسهٔ میانگین‌ها در سطح آماری ۱ درصد با آزمون دانکن انجام پذیرفت.

برای ساخت نمونه‌های مصنوعی، ابتدا مقدار نمک مورد نیاز با توجه به درصد وزنی مورد نظر تعیین و در آب حل گردید. سپس خاک خشک و الک شده (رد شده از الک ۲ میلی‌متر) با وزن مشخص به محلول اضافه شد. حجم محلول مورد استفاده برای تهیهٔ نمونه‌ها به اندازه‌ای انتخاب شد که مخلوط حاصل به صورت دوغاب کاملاً رقیق درآید و اختلاط به خوبی انجام گیرد. رطوبت نمونه‌ها در این شرایط حدود ۱/۵ برابر حد روانی نمونه‌ها بود. مخلوط‌ها در محیط آزمایشگاه به مدت حدود دو ماه نگهداری و به تدریج خشک شدند. نمونه‌ها بعد از خشک شدن کامل، با چکش پلاستیکی خرد و از الک شماره ۱۰ عبور داده شدند. مشخصات نمونه‌های مصنوعی تهیه شده در جدول ۲ ارائه شده است.

**جدول ۲- نوع و درصد نمک‌های مصرفی برای تهیهٔ نمونه‌های مصنوعی**

| شمارهٔ نمونه | نوع نمک | درصد نمک | شمارهٔ نمونه | نوع نمک | درصد نمک |
|---|---|---|---|---|---|
| S0 | - | ۰ | S2 3 | سولفات سدیم | ۲ |
| S1 1 | کلرید سدیم | ۰/۵ | S2 4 | سولفات سدیم | ۵ |
| S1 2 | کلرید سدیم | ۱ | S2 5 | سولفات سدیم | ۱۰ |
| S1 3 | کلرید سدیم | ۲ | S3 1 | کربنات سدیم | ۰/۵ |
| S1 4 | کلرید سدیم | ۵ | S3 2 | کربنات سدیم | ۱ |
| S1 5 | کلرید سدیم | ۱۰ | S3 3 | کربنات سدیم | ۲ |
| S2 1 | سولفات سدیم | ۰/۵ | S3 4 | کربنات سدیم | ۵ |
| S2 2 | سولفات سدیم | ۱ | S3 5 | کربنات سدیم | ۱۰ |

## آزمایش‌های شناسایی

به منظور شناسایی و تعیین خصوصیات فیزیکی خاک طبیعی مورد استفاده، ابتدا آزمایش‌های اولیه شامل دانه‌بندی، تعیین حدود اتربرگ، تراکم و طبقه‌بندی مطابق استاندارد ASTM انجام شد (Anon, 2000). همچنین با توجه به این‌که هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر کیفیت شیمیایی آب منفذی بر مشخصات تحکیمی و تراکمی خاک‌ها بود، و با این‌که نمونه‌های مصنوعی با ترکیب‌های مشخصی ساخته شده بودند، اما میزان دقیق و نوع نمک‌های انحلال‌پذیر در آب، ویژگی‌های شیمیایی نمونهٔ خاک طبیعی و مصنوعی نظیر مقادیر کاتیون‌ها، آنیون‌ها، میزان مقاومت الکتریکی و اسیدیته بر اساس روش‌های استاندارد نیز تعیین شد. جدول ۳ مشخصات شیمیایی نمونهٔ طبیعی و نمونه‌های مصنوعی مورد استفاده را نشان می‌دهد.

**جدول ۳- مشخصات شیمیایی نمونه‌های مورد بررسی**

| نمونه | pH | EC (دسی زیمنس بر متر) | آنیون‌ها (میلی‌اکی‌والان بر لیتر) | | | | جمع آنیون‌ها | کاتیون‌ها (میلی‌اکی‌والان بر لیتر) | | | | جمع کاتیون‌ها | SAR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $CO_3^{-2}$ | $HCO_3^-$ | $Cl^-$ | $SO_4^{-2}$ | | $Mg^{2+}$ | $Ca^{2+}$ | $Na^+$ | $K^+$ | | |
| $S_0$ | ۷/۸۸ | ۱/۴۷ | – | ۸/۶ | ۱۰ | ۲/۸۷ | ۲۱/۴۷ | ۳ | ۴ | ۱۴/۵ | – | ۲۱/۵ | ۵/۴۸ |
| $S_1$ | ۷/۴۸ | ۱۳/۵۹ | ۰/۶ | ۸/۴ | ۱۲۸ | ۴/۳۳ | ۱۴۱/۳۳ | ۲۰ | ۲۹ | ۸۹/۳۶ | – | ۱۳۸/۳۶ | ۱۲/۷۷ |
| $S_2$ | ۷/۴۸ | ۲۵/۷۰ | ۰/۶ | ۸/۲ | ۲۵۰ | ۴/۳۸ | ۲۶۳/۱۸ | ۲۷ | ۳۷ | ۱۸۶/۳۶ | – | ۲۵۰/۳۶ | ۲۳/۳۰ |
| $S_3$ | ۷/۴۹ | ۳۰/۹۰ | ۳/۴ | ۴/۶ | ۳۱۰ | ۲/۱۶ | ۳۲۰/۱۶ | ۱۸ | ۵۵ | ۲۳۹/۷۳ | – | ۳۱۲/۷۳ | ۲۸/۰۶ |
| $S_4$ | ۷/۴۹ | ۷۳/۱۰ | ۲/۸ | ۱۰/۴ | ۶۲۰ | ۱۰۴/۳۱ | ۷۳۷/۵۱ | ۲۳ | ۵۱ | ۶۶۳/۸۵ | – | ۷۳۷/۸۵ | ۷۱/۱۷ |
| $S_5$ | ۷/۴۹ | ۹۷/۳۰ | ۱/۸ | ۵/۸ | ۱۰۰۰ | ۴/۶۱ | ۱۰۱۲/۲۱ | ۵۸ | ۵۲ | ۸۴۰/۰۹ | – | ۹۵۰/۰۹ | ۸۰/۱۰ |
| $S_6$ | ۷/۸۶ | ۹/۴۰ | – | ۱۲ | ۳۰ | ۴۷/۹۹ | ۸۹/۹۹ | ۱۵ | ۲۷ | ۶۸/۲۷ | – | ۱۱۰/۲۷ | ۱۰/۵۳ |
| $S_7$ | ۷/۸۸ | ۱۲/۶۹ | – | ۱۰ | ۶۰ | ۴۰/۶۶ | ۱۱۰/۶۶ | ۱۰ | ۲۷ | ۱۰۰/۸۲ | – | ۱۳۷/۸۲ | ۱۶/۵۷ |
| $S_8$ | ۷/۸۸ | ۱۷/۱۵ | – | ۸ | ۸۰ | ۵۸/۹۹ | ۱۴۶/۹۹ | ۸ | ۲۶ | ۱۴۲/۳۱ | – | ۱۷۶/۳۱ | ۲۴/۴۱ |
| $S_9$ | ۷/۸۹ | ۳۴/۷۰ | – | ۷/۶ | ۲۵۰ | ۸۷/۶ | ۳۴۵/۲ | ۱۲ | ۲۳ | ۳۲۵/۳۸ | – | ۳۶۰/۳۸ | ۵۵/۰۰ |
| $S_{10}$ | ۷/۸۹ | ۴۷/۳۰ | – | ۶ | ۲۳۰ | ۲۰۷/۸۵ | ۴۴۳/۸۵ | ۵۱ | ۳۹ | ۳۷۵/۳۸ | – | ۴۶۵/۳۸ | ۳۹/۵۷ |
| $S_{11}$ | ۷/۹۰ | ۴/۷۴ | – | ۱۹/۴ | ۱۴ | ۱۷/۵۹ | ۵۰/۹۹ | ۳ | ۸ | ۳۸/۷۵ | – | ۴۹/۷۵ | ۱۱/۶۸ |
| $S_{12}$ | ۷/۸۹ | ۱۱/۶۳ | ۸۸/۱ | ۲۵/۲ | ۶ | ۱۲/۴۹ | ۱۳۱/۷۹ | ۱ | ۹ | ۱۲۹ | – | ۱۳۹ | ۴۰/۷۹ |
| $S_{13}$ | ۷/۹۱ | ۲۴/۷۰ | – | ۲۳۰ | ۲۵ | ۱۰/۵۷ | ۲۶۵/۵۷ | ۷ | ۵ | ۲۵۰/۷۷ | – | ۲۶۲/۷۷ | ۷۲/۳۹ |
| $S_{14}$ | ۷/۹۲ | ۵۱/۲۰ | – | ۳۰ | ۴۳۸ | ۲۸/۲۷ | ۴۹۶/۲۷ | ۲۷ | ۱۳ | ۴۹۰/۵۷ | – | ۵۳۰/۵۷ | ۷۷/۵۷ |
| $S_{15}$ | ۷/۹۰ | ۶۸/۹۰ | – | ۳۶۴ | ۳۲۰ | ۶/۹۶ | ۶۹۰/۹۶ | ۲۱ | ۵ | ۶۶۸/۹۲ | – | ۶۹۴/۹۲ | ۱۳۱/۱۹ |

## آزمایش تراکم

مشخصات تراکمی خاک‌ها شامل وزن واحد حجم خشک ($\gamma_{d\max}$) و رطوبت بهینه ($\omega_{opt}$) از ویژگی‌های مهم خاک در مسائل مهندسی نظیر ساخت خاکریزهای مربوط به مسیر کانال‌ها، جاده‌ها، بدنهٔ سدها و سایر موارد مشابه از ویژگی‌های مهم خاک است. این ویژگی‌ها با آزمایش تراکم روی نمونهٔ مورد نظر تعیین می‌شود. در این پژوهش برای تعیین این ویژگی‌ها از روش استاندارد پراکتور (Anon, 2000) روی تمام تیمارها در سه تکرار استفاده شد.

## آزمایش تحکیم

در این آزمایش میزان تغییر شکل نمونه که معمولاً با نسبت پوکی ارزیابی می‌شود، نسبت به تنش‌های اعمال شده و همچنین نسبت به زمان، به ازای هر افزایش تنش، قرائت و یادداشت خواهد شد. با ترسیم منحنی تغییرات نسبت پوکی در مقابل لگاریتم تنش مؤثر، مقدار نمایهٔ فشردگی ($C_c$)، که شیب این منحنی است، تعیین می‌شود. همچنین، به ازای هر یک از تنش‌های اعمال شده، تغییرات کمیتی از نشست نمونه (معمولاً نسبت پوکی) نسبت به زمان ترسیم و با استفاده از دستورالعمل‌های ترسیمی کاساگرانده و تیلور مقدار ضریب تحکیم تعیین می‌شود.

در روش کاساگرانده، ابتدا منحنی تغییرات نسبت پوکی به ازای زمان در مقیاس لگاریتمی ترسیم و سپس نقاط مربوط به صفر و صد درصد تحکیم از روی منحنی مشخص می‌شود. نقطهٔ میانی فاصلهٔ بین آن‌ها- که مربوط به ۵۰ درصد تحکیم است- و زمان متناظر با آن تعیین و سرانجام ضریب تحکیم با استفاده از رابطهٔ ۱ محاسبه می‌شود.

$$C_v = \frac{0.196 H_d^{\,2}}{4t_{50}} \qquad (۱)$$

در روش تیلور از منحنی تغییرات نسبت پوکی بر حسب جذر زمان استفاده می‌شود. بدین ترتیب که قسمت ابتدایی و خطی منحنی تا قطع منحنی ادامه می‌یابد و زمان متناظر با نقطهٔ تلاقی خط با منحنی، به عنوان زمان مربوط به ۹۰ درصد تحکیم در نظر گرفته می‌شود. پس از آن، ضریب تحکیم بر اساس رابطهٔ شمارهٔ ۲ محاسبه می‌شود.

$$C_v = \frac{0.848 H_d^{\,2}}{4t_{90}} \qquad (۲)$$

در روابط مذکور، $H_d$ = طول مسیر زهکشی و به عبارتی نصف ضخامت نمونهٔ آزمایشی؛ $C_v$ = ضریب تحکیم؛ $t_{50}$ = زمان متناظر با ۵۰ درصد تحکیم؛ و $t_{90}$ زمان متناظر با ۹۰ درصد تحکیم است.

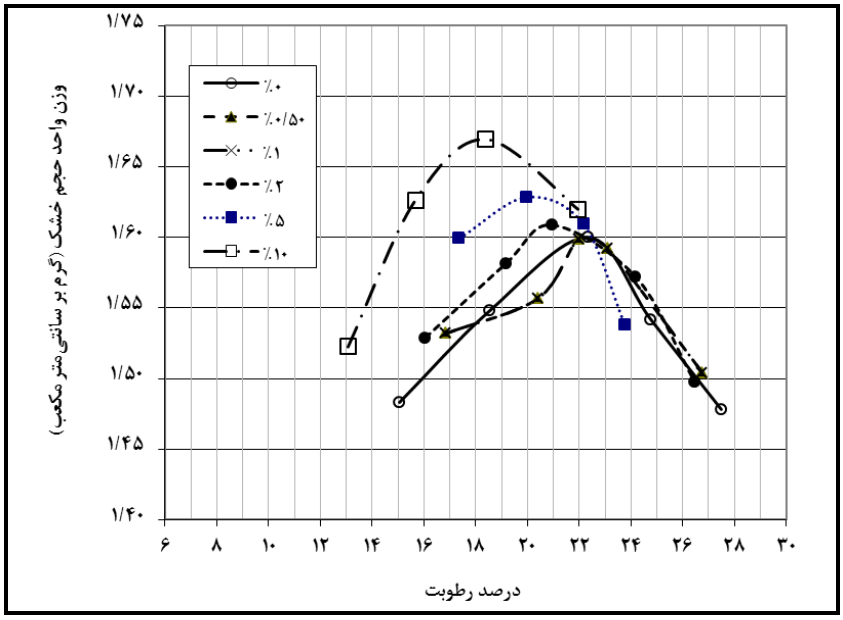
## نتایج و بحث

پس از اجرای آزمایش‌های تراکم و تحکیم روی نمونه‌های مورد نظر، ویژگی‌های تراکمی و تحکیمی هر یک از تیمارها تعیین و نقش کیفیت شیمیایی نمونه‌ها روی خواص یاد شده بررسی و تحلیل شد.

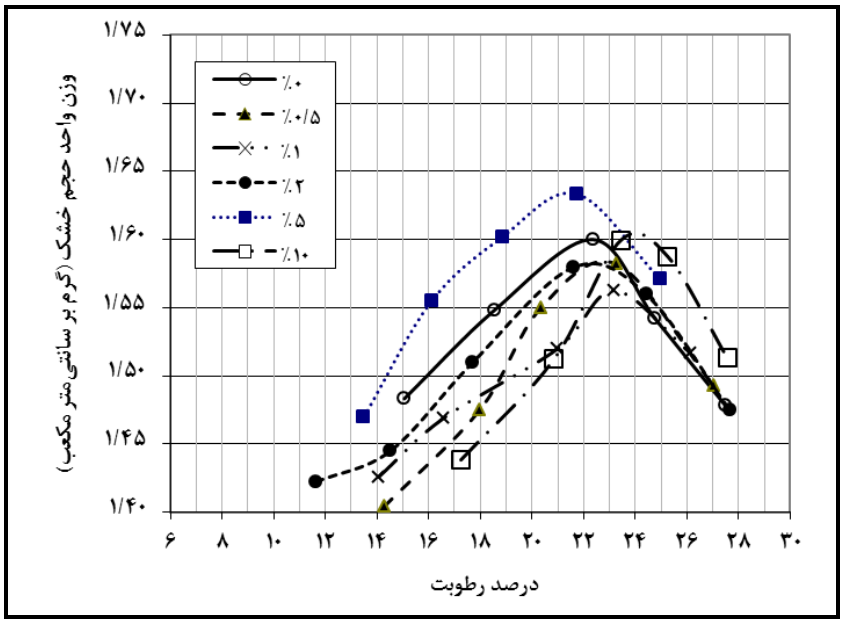
### مشخصات تراکمی

با اجرای آزمایش تراکم پراکتور استاندارد روی تیمارهای مختلف، منحنی تراکم به ازای هر نمونهٔ آزمایشی رسم و با استفاده از این منحنی‌ها، مشخصات تراکمی یعنی مقادیر وزن واحد حجم خشک ماکزیمم و رطوبت بهینه همهٔ نمونه‌های آزمایشی (مختصات نقطهٔ اوج منحنی‌ها) تعیین شد. شکل‌های ۱ تا ۳، منحنی‌های تراکم نمونه‌های مورد بررسی را به تفکیک نمک‌های مختلف نشان می‌دهد. شکل‌های ۱ تا ۳ نشان می‌دهند که به ازای تمام مقادیر غلظت‌های مورد استفاده در هر سه نمک، رطوبت بهینه نمونه‌ها در محدودهٔ ۲۰ تا ۲۳ درصد متغیر است. در حالی‌که در پروژه‌های اجرایی برای میزان رطوبت بهینه مقدار رواداری ۲ درصد، مجاز شناخته می‌شود. به عبارت دیگر، برای نمونهٔ خاک طبیعی مورد مطالعه که رطوبت بهینهٔ آن ۲۲ درصد است، محدودهٔ ۲۰ تا ۲۴ درصد محدوده رواداری مجاز محسوب می‌شود. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر انواع و مقادیر مختلف نمک‌های مورد استفاده در مقدار رطوبت بهینه ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. همچنین، محدودهٔ تغییرات وزن واحد حجم خشک ماکزیمم به دست آمده برای انواع نمونه‌ها، بین ۱/۵۶ و ۱/۶۳ گرم بر سانتی‌متر

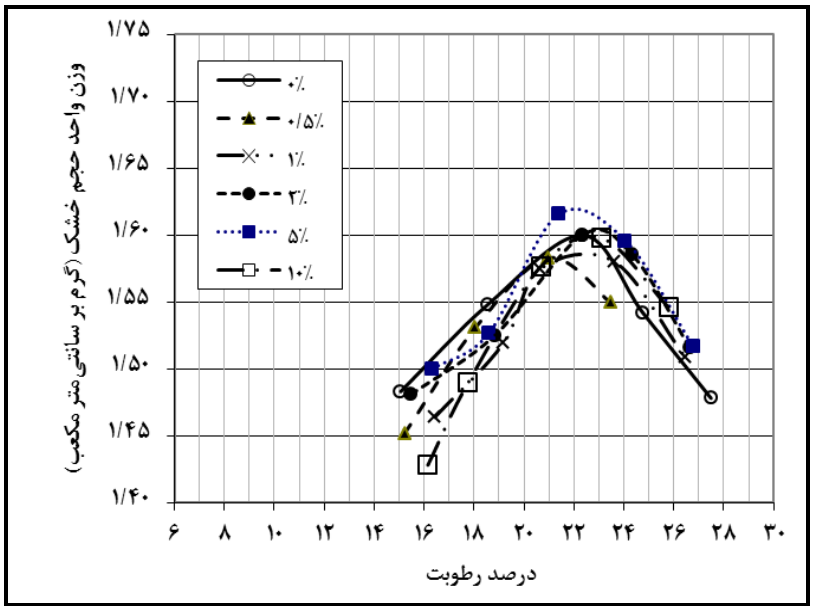
مکعب بوده یعنی تفاوت بیشترین و کمترین مقدار آن کمتر از ۵ درصد است. این مقدار نیز کمتر از مقدار رواداری مجاز برای وزن واحد حجم خشک ماکزیمم است و لذا می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر نمک‌های مذکور بر وزن واحد حجم خشک ماکزیمم خاک نیز قابل توجه نیست. در مجموع می‌توان گفت که میزان و نوع شوری خاک تأثیر چشمگیری بر مشخصات تراکمی خاک ندارد.




**شکل ۱- منحنی‌های تراکم برای نمونه‌های حاوی نمک کلرید سدیم**



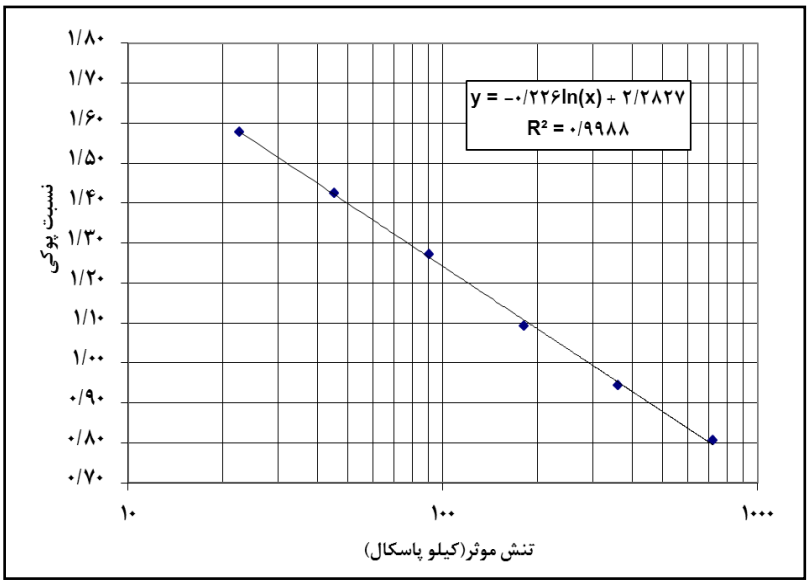

**شکل ۲- منحنی‌های تراکم برای نمونه‌های حاوی نمک کربنات سدیم**




**شکل ٣- منحنی‌های تراکم برای نمونه‌های حاوی نمک سولفات سدیم**

## پارامترهای تحکیمی خاک

نمایه فشردگی و ضریب تحکیم از مهم‌ترین ویژگی‌های تحکیمی خاک محسوب می‌شوند. به منظور تعیین نمایهٔ فشردگی نمونه‌های مختلف، پس از اجرای آزمایش تحکیم، مقدار نسبت پوکی (نسبت حجم منافذ به حجم ذرات جامد خاک) به ازای هر یک از تنش‌های اعمال شده تعیین شد، و منحنی تنش مؤثر- نسبت پوکی برای تمام نمونه‌ها رسم و سپس شیب قسمت خطی آن، که همان نمایهٔ فشردگی است - تعیین گردید. شکل ۴ نمونه‌ای از این منحنی‌ها را برای نمونهٔ خاک حاوی یک درصد کربنات سدیم نشان می‌دهد. همچنین مقادیر نمایه فشردگی به ازای سایر تیمارها و تکرارهای مورد بررسی در جدول ۴ ارائه شده است.

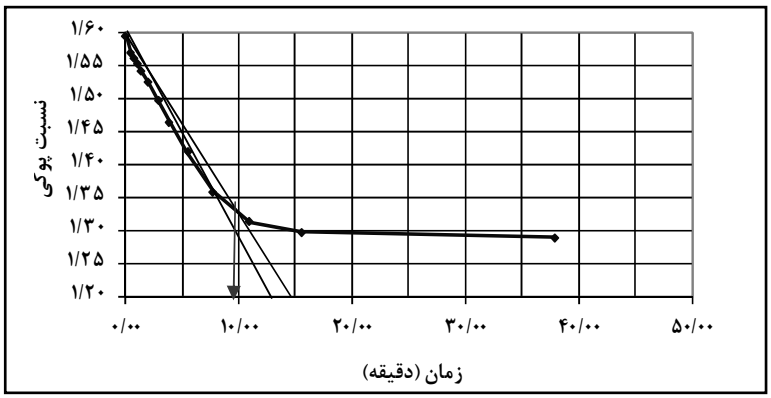



**شکل ٤- منحنی تنش مؤثر – نسبت پوکی برای نمونهٔ حاوی ۱ درصد کربنات سدیم**

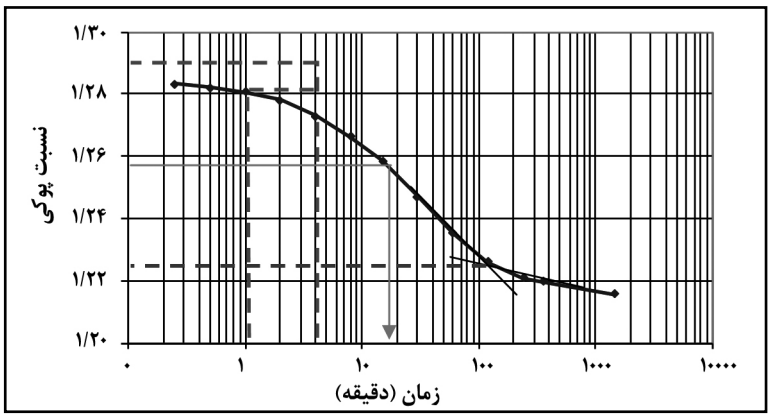
جدول ٤ - مقادیر نمایه فشردگی به ازای نمونه‌های مختلف

| میزان نمک (درصد) | نوع نمک | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | کلرید سدیم | | | سولفات سدیم | | | کربنات سدیم | | |
| | تکرار اول | تکرار دوم | تکرار سوم | تکرار اول | تکرار دوم | تکرار سوم | تکرار اول | تکرار دوم | تکرار سوم |
| ۰ | ۰/۳۶۸ | ۰/۴۳۵ | ۰/۳۷۷ | ۰/۳۶۸ | ۰/۴۳۵ | ۰/۳۷۷ | ۰/۳۶۸ | ۰/۴۳۵ | ۰/۳۷۷ |
| ۰/۵ | ۰/۲۹۶ | ۰/۳۶۲ | ۰/۳۴۲ | ۰/۳۷۹ | ۰/۴۱۲ | ۰/۳۹۱ | ۰/۵۷۲ | ۰/۴۶۴ | ۰/۵۱۲ |
| ۱ | ۰/۳۹۳ | ۰/۳۸۳ | ۰/۳۹۶ | ۰/۳۸۰ | ۰/۴۵۹ | ۰/۴۱۸ | ۰/۴۷۶ | ۰/۵۲۰ | ۰/۴۶۵ |
| ۲ | ۰/۳۴۳ | ۰/۳۶۲ | ۰/۳۵۲ | ۰/۳۷۸ | ۰/۴۳۷ | ۰/۳۷۷ | ۰/۴۹۹ | ۰/۵۴۵ | ۰/۵۲۷ |
| ۵ | ۰/۳۰۲ | ۰/۳۲۰ | ۰/۳۷۰ | ۰/۳۸۴ | ۰/۵۲۷ | ۰/۴۴۰ | ۰/۴۰۶ | ۰/۴۳۰ | ۰/۴۲۲ |
| ۱۰ | ۰/۳۲۵ | ۰/۲۰۷ | ۰/۲۶۷ | ۰/۳۵۵ | ۰/۳۸۰ | ۰/۳۴۶ | ۰/۳۵۲ | ۰/۳۷۵ | ۰/۳۶۴ |

همچنین ضریب تحکیم نمونه‌های مختلف با رسم منحنی تغییرات نسبت پوکی نمونه نسبت به زمان و با استفاده از دو روش لگاریتم زمان (کاساگرانده) و جذر زمان (روش تیلور) تعیین شد. شکل‌های ۵ و ۶ روش ترسیمی محاسبه ضریب تحکیم را به ترتیب با استفاده از روش‌های کاساگرانده و تیلور نشان می‌دهد. در این پژوهش برای کلیهٔ نمونه‌ها، ابتدا ضریب تحکیم به طور مجزا با استفاده از دو روش یاد شده تعیین و پس از آن متوسط آن‌ها ملاک عمل قرار گرفت. متوسط مقادیر ضریب تحکیم برای تیمارها و تکرارهای مختلف به ازای تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال در جدول ۵ ارائه شده است.




شکل ۵- روش تعیین زمان مربوط به ۹۰ درصد تحکیم به روش جذر زمان تیلور




شکل ٦- روش تعیین زمان مربوط به ۵۰ درصد تحکیم به روش لگاریتم زمان کاساگرانده

**جدول ٥- مقادیر ضریب تحکیم به ازای نمونه‌های مختلف و برای فشار ٢٠٠ کیلوپاسکال ($\times 10^{-6}$)**

| میزان نمک (درصد) | نوع نمک | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | کلرید سدیم | | | سولفات سدیم | | | کربنات سدیم | | |
| | تکرار اول | تکرار دوم | تکرار سوم | تکرار اول | تکرار دوم | تکرار سوم | تکرار اول | تکرار دوم | تکرار سوم |
| ٠ | ١/٦٨ | ١/٤٨ | ١/٥٣ | ١/٦٨ | ١/٤٨ | ١/٥٣ | ١/٦٨ | ١/٤٨ | ١/٥٣ |
| ٠/٥ | ١/٥٧ | ١/٥٢ | ١/٥٥ | ١/٧٦ | ١/٣٦ | ١/٥٤ | ٠/٤١١ | ٠/٣١٣ | ٠/٣٧٢ |
| ١ | ٠/٨٣ | ١/٧٦ | ١/٨٥ | ١/٠١ | ٠/٩١ | ٠/٩٦ | ٠/٢٩٦ | ٠/٢٤٦ | ٠/٢٦٩ |
| ٢ | ٠/٩١ | ١/١٠ | ١/٠١ | ٠/٥٣ | ٠/٧٠ | ٠/٥٣ | ٠/٣٢٧ | ٠/٣٤٥ | ٠/٣٢٧ |
| ٥ | ١/٠١ | ١/٣٢ | ١/١٤ | ٠/٥٣ | ٠/٥٣ | ٠/٥٣ | ٠/٩١٤ | ١/٢٢ | ١/١٤ |
| ١٠ | ٢/٢٧ | ٢/٤٠ | ٢/٣٠ | ٠/٧٢٧ | ٠/٧٩٧ | ٠/٥٩٨ | ٠/٧٢١ | ٠/٨٣٢ | ٠/٦٨٦ |

نتایج حاصل از اندازه‌گیری نمایهٔ فشردگی و ضریب تحکیم توسط نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت و مقایسه میانگین‌های آنها نیز در سطح آماری ١ درصد با آزمون دانکن انجام پذیرفت. نتایج تجزیه واریانس برای مقادیر نمایه فشردگی و ضریب تحکیم ارائه شده در جداول ۴ و ۵، در جدول ۶ ارائه شده است. در این جدول مشاهده می‌شود که، بین بلوک‌ها (تکرارها) در سطح ١ درصد تفاوت معنی‌داری وجود ندارد اما بین نمک‌ها و درصدهای مربوط به نمک از نظر تأثیر بر نمایه فشردگی و ضریب تحکیم تفاوت معنی‌داری وجود دارد. بنابراین اثر نمک و درصد نمک بر نمایه فشردگی و ضریب تحکیم معنی‌دار است.

**جدول ٦- جدول تجزیهٔ واریانس اثر نوع نمک و میزان نمک بر ضریب فشردگی ($C_c$) و ضریب تحکیم ($C_v$)**

| منابع تغییرات | درجه آزادی | میانگین مربعات | |
|---|---|---|---|
| | | Cc | Cv |
| بلوک | ٢ | ٠/٠٠٤$^{ns}$ | ٠/٠٠٨$^{ns}$ |
| نوع نمک | ٢ | ٠/٠٥١$^{**}$ | ٢/٩۴۶$^{**}$ |
| درصد نمک | ۵ | ٠/٠١٢$^{**}$ | ٠/٩٢٧$^{**}$ |
| نوع نمک × درصد نمک | ١٠ | ٠/٠٠۵$^{**}$ | ٠/۵٩٣$^{**}$ |
| خطای کل | ٣۴ | ٠/٠٠١ | ٠/٠٢٩ |
| میانگین کل | ۵٣ | ٠/٣٩٩ | ١/٠٧١ |
| ضریب تغییرات (درصد) | | ٧/٩٢ | ١۵/٩٠ |

** معنی‌دار در سطح احتمال ١ درصد، * معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، ns نبود اختلاف معنی‌دار

مقایسه میانگین مقادیر نمایهٔ فشردگی و ضریب تحکیم هر نمک در غلظت‌های مختلف، در سطح آماری ۵ درصد در جداول ٧ و ٨ ارائه شده است. جدول ٧ نشان می‌دهد که نمایهٔ فشردگی در غلظت ١٠ درصد نمک کلرید سدیم تفاوت معنی‌داری با سایر غلظت‌های این نمک دارد. در سایر مقادیر کلرید سدیم، مقادیر نمایهٔ فشردگی تفاوت معنی‌داری با هم ندارند. در نمک سولفات سدیم نیز نمایهٔ فشردگی با مقدار ۵ و ١٠ درصد تفاوت معنی‌داری با سایر مقادیر این نمک دارد و مقادیر ٠ تا ٢ درصد سولفات سدیم تفاوت معنی‌داری از نظر نمایهٔ فشردگی ندارند. مقادیر کم نمک کربنات سدیم (٠/۵ تا ٢ درصد)، تفاوت معنی‌داری در ضریب فشردگی دارند و

مقـادیر بـالا، تـأثیر معنـی‌داری در ضـریب فشـردگی ندارنـد. بنـابراین در نمـک‌هـای کلریـد سـدیم و سولفات سـدیم، مقـادیر کـم نمـک (۰/۵ تـا ۲ درصـد)، از نظـر ضـریب فشـردگی، تفـاوت معنـی‌داری بـا تیمـار شاهد (صفر درصد نمک) ندارنـد در حـالی‌کـه در کربنـات سـدیم، ایـن گونـه نیسـت و مقـادیر کـم نمـک تفـاوت معنی‌داری با تیمار شاهد و با مقـادیر زیـاد نمـک (۵ و ۱۰ درصد) دارند.

**جدول ۷- مقایسه میانگین ضرایب فشردگی در تیمارهای مختلف**

| غلظت (درصد) | ضریب فشردگی | | |
|---|---|---|---|
| | کلرید سدیم | سولفات سدیم | کربنات سدیم |
| ۰ | ۰/۳۹۳$^{a}$ | ۰/۳۹۳$^{ab}$ | ۰/۳۹۳$^{a}$ |
| ۰/۵ | ۰/۳۳۳$^{a}$ | ۰/۳۹۴$^{ab}$ | ۰/۵۱۶$^{b}$ |
| ۱ | ۰/۳۹۱$^{a}$ | ۰/۴۱۹$^{ab}$ | ۰/۴۸۷$^{b}$ |
| ۲ | ۰/۳۵۲$^{a}$ | ۰/۳۹۷$^{ab}$ | ۰/۵۲۴$^{b}$ |
| ۵ | ۰/۳۳۱$^{a}$ | ۰/۴۵۰$^{a}$ | ۰/۴۱۹$^{a}$ |
| ۱۰ | ۰/۲۶۶$^{b}$ | ۰/۳۶۰$^{b}$ | ۰/۳۶۴$^{a}$ |

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

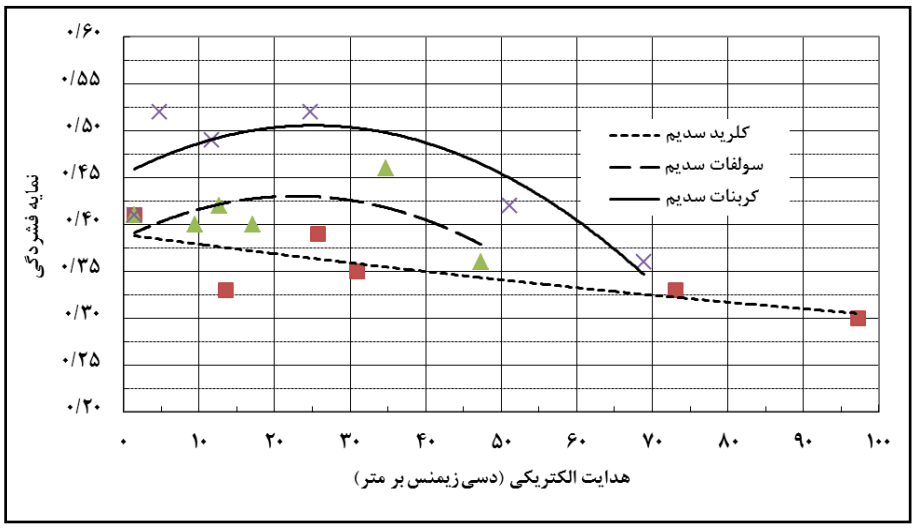
**جدول ۸- مقایسه میانگین ضرایب تحکیم در تیمارهای مختلف**

| غلظت (درصد) | ضریب تحکیم | | |
|---|---|---|---|
| | کلرید سدیم | سولفات سدیم | کربنات سدیم |
| ۰ | ۱/۵۶۳$^{a}$ | ۱/۵۶۳$^{a}$ | ۱/۵۶۳$^{a}$ |
| ۰/۵ | ۱/۵۴۷$^{a}$ | ۱/۵۵۳$^{a}$ | ۰/۳۰۴$^{d}$ |
| ۱ | ۱/۴۸۰$^{a}$ | ۰/۹۶۰$^{b}$ | ۰/۲۷۰$^{d}$ |
| ۲ | ۱/۰۰۷$^{b}$ | ۰/۵۸۷$^{c}$ | ۰/۳۳۳$^{d}$ |
| ۵ | ۱/۱۵۷$^{ab}$ | ۰/۵۳۰$^{c}$ | ۱/۰۹۱$^{b}$ |
| ۱۰ | ۲/۳۲۳$^{c}$ | ۰/۷۰۷$^{c}$ | ۰/۷۴۶$^{c}$ |

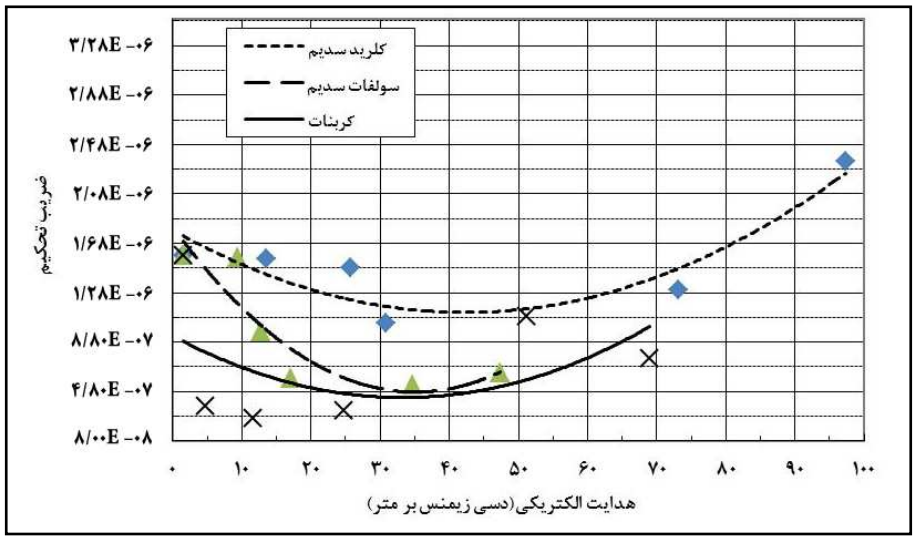
در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

جدول ۸ نشان مـی‌دهـد کـه، مقـادیر ۰ تـا ۱ درصـد کلرید سدیم باعث تغییر معنی‌دار ضـریب تحکـیم نشـده و افزایش ۲ و ۵ درصد از این نمک، باعـث کـاهش معنـی‌دار این ضریب شده است. ضریب تحکیم در مقدار ۱۰ درصـد کلرید سدیم افزایش چشمگیری را نسبت به سـایر مقـادیر نشان می‌دهد. اثر افزایش سولفات سـدیم نیـز بـر ضـریب تحکیم، به جز برای ۱۰ درصد این نمک، در جهت کـاهش این ضریب است. در خصوص این نمک افزایش ۱ درصد و بیشتر، باعث کاهش معنی‌دار ضـریب تحکـیم شـده اسـت. افـزودن ۰/۵ تـا ۲ درصـد کربنـات سـدیم باعـث کـاهش معنی‌دار ضریب تحکیم نسبت به تیمار شاهد شـده اسـت. مقادیر بیشـتر کربنـات سـدیم نیـز اگرچـه باعـث افـزایش معنی‌دار ضریب تحکمی نسبت به درصـدهای قبلـی شـده، اما روند تغییرات خطی نیست و ضـریب تحکـیم همچنـان کمتر از مقدار شاهد است و تفاوت معنـی‌داری بـا شـاهد و نیز با درصدهای کم نمک دارند.

همچنین به منظور ارزیابی چگونگی تغییرات نمایهٔ فشردگی و ضریب تحکیم نمونه‌ها نسبت به میزان و نوع شوری آن‌ها، روند تغییرات کمیت‌های ذکر شده نسبت به مقدار هدایت الکتریکی به تفکیک نمک‌های مختلف مطابق شکل‌های ۷ و ۸ رسم شد. این شکل‌ها نشان می‌دهند که نمایهٔ فشردگی و ضریب تحکیم نمونه‌ها متأثر از شاخص شوری نمونه‌ها (EC) است و چگونگی این تأثیر نیز بسته به نوع نمک متفاوت است. به عبارت دیگر، علاوه بر میزان شوری، نوع نمک مولد شوری نیز بر مقدار نمایه فشردگی و ضریب تحکیم مؤثر است.




**شکل ۷- تغییرات نمایهٔ فشردگی نسبت به میزان شوری (EC) به ازای نمک‌های مختلف**




**شکل ۸- تغییرات ضریب تحکیم به ازای میزان شوری به ازای نمک‌های مختلف و برای تنش ۱۰۰ کیلوپاسکال**

در خصوص چگونگی تأثیر نمک‌ها (شکل‌های ۷ و ۸) مشاهده می‌شود که روند کلی تأثیر آن‌ها بر ضریب فشردگی و ضریب تحکیم، الگویی یکسان اما معکوس دارد. یعنی اثر کلرید سدیم بر نمایه فشردگی روند کاهشی، اما بر ضریب تحکیم روند افزایشی دارد؛ ولی دو نمک دیگر تأثیر دو سویه‌ای بر شاخص‌های مورد بررسی دارند.

بدین معنا که میزان شوری در حدود ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر موجب افزایش نمایهٔ فشردگی و کاهش ضریب تحکیم می‌شود اما از این میزان شوری به بعد، کاهش نمایهٔ فشردگی و افزایش ضریب تحکیم را نشان می‌دهد.

نتیجهٔ فوق با مفاهیم تئوری لایهٔ دوگانهٔ پخشیده[1] قابل تفسیر است. بسیاری از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک‌های رسی متأثر از ضخامت این لایه است، به عنوان مثال، هرچه ضخامت لایه دوگانه بیشتر شود، ذرات رس از هم دورتر و خاک واگراتر می‌شود؛ ولی با کاهش ضخامت لایهٔ مذکور، ساختمان خاک مجتمع (فلوکوله) خواهد شد (Anon, 2003). دو عامل غلظت و نسبت جذب سدیم محلول خاک از مهم‌ترین عوامل مؤثر در ضخامت لایهٔ دوگانهٔ پخشیده هستند. به طوری‌که ضخامت لایهٔ دوگانه با افزایش غلظت محلول کمتر ولی با افزایش نسبت جذب سدیم بیشتر می‌شود (Mojallali, 2007; Sparks, 2000). بدین ترتیب وقتی یک نمک سدیمی با آنیون متفاوت به خاک اضافه شود، کاتیون سدیم با کاتیون کلسیم موجود در خاک تبادل و نمک‌های جدیدی حاصل می‌شود. در شرایط جدید، بسته به میزان انحلال‌پذیری مواد حاصل از واکنش، مقادیر متفاوتی از غلظت محلول و نسبت جذب سدیم در فاز محلول خاک ایجاد می‌شود و بنابراین ضخامت لایهٔ دوگانه نیز متفاوت خواهد بود.

کلرید سدیم نمکی بسیار انحلال‌پذیر است و در خاک به سرعت هیدرولیز (آبکافت) می‌شود و یون‌های $Na^+$ و $Cl^-$ را ایجاد می‌کند. یون کلر پس از ترکیب شدن با کلسیم موجود در محلول خاک، نمک بسیار حل‌پذیر کلرید کلسیم ($CaCl_2$) را به وجود می‌آورد. بدین ترتیب در اثر افزایش کلرید سدیم به خاک، نمک حاصل از واکنش، کلرید کلسیم خواهد بود که انحلال‌پذیری بالایی دارد و سریعاً هیدرولیز (آبکافت) می‌شود و به فاز محلول باز می‌گردد. به علت باقی ماندن محصولات واکنش در فاز محلول، غلظت محلول خاک افزایش و در نهایت باعث کاهش ضخامت لایهٔ دو گانهٔ پخشیده و ایجاد ساختمان فلوکوله در خاک می‌شود (Mojallali, 1994). به تبع این امر، ضریب نفوذپذیری و در نتیجه ضریب تحکیم خاک افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، در اثر کاهش ضخامت لایهٔ دوگانه، فاصلهٔ ذرات رس و نسبت پوکی خاک کاهش می‌یابد که این موضوع نیز موجب کاهش نمایهٔ فشردگی خاک می‌شود.

در خصوص نمک‌های کربنات سدیم و سولفات سدیم، به علت این‌که کربنات کلسیم و سولفات کلسیم حاصل از واکنش این دو نمک انحلال‌پذیری کمی دارند، مطابق روابط ۳ و ۴ به صورت رسوب از فاز محلول خارج می‌شوند.

$$Na_2CO_3 \rightarrow 2Na^+ + CO_3^{--} \qquad (۳)$$

(انحلال‌پذیری کم) $Ca^{++} + CO_3^{--} \rightarrow CaCo_3 \downarrow$ رسوب

$$Na_2SO_4 \rightarrow 2Na^+ + SO_4^{--} \qquad (۴)$$

(انحلال‌پذیری کم) $Ca^{++} + SO_4^{--} \rightarrow CaSo_4 \downarrow$ رسوب

بنابراین، به علت خروج محصولات واکنش به صورت رسوب از فاز محلول، غلظت محلول خاک کاهش می‌یابد. با کاهش یون‌های دو ظرفیتی نظیر کلیسم، نسبت جذب سدیم در محلول نیز افزایش می‌یابد. از این رو با توجه به این‌که هر دو عمل مذکور، یعنی افزایش نسبت جذب سدیم و کاهش غلظت محلول، باعث افزایش ضخامت لایهٔ دوگانهٔ پخشیده و ایجاد ساختمان پراکنده (نفوذپذیری کمتر و فاصلهٔ بیشتر رس‌ها) در خاک می‌شود، نمایهٔ فشردگی افزایش و ضریب تحکیم کاهش می‌یابد. با افزودن مقادیر بیشتر کربنات سدیم و سولفات سدیم (افزایش شوری از حدود ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر در شکل‌های ۷ و ۸) و محدود بودن یون‌های دو ظرفیتی

1- Diffussed Double Layer

نظیر کلیسم در محلول خاک، عمل ترسیب و خروج یون‌ها متوقف و یا کمتر می‌شود و در نتیجه غلظت محلول افزایش و ضخامت لایهٔ دوگانه کاهش می‌یابد. از این رو از این حد به بعد، الگوی تأثیر نمک‌های مذکور بر شاخص‌های نمایهٔ فشردگی و ضریب تحکیم تغییر یافته و معکوس می‌شود. این نتیجه‌گیری با یافته‌های تحقیقات قبلی در خصوص تأثیر نمک‌های سدیمی بر پتانسیل واگرایی خاک‌های رسی مطابقت کامل دارد (Abbasi & Nazifi, 2013).

## نتیجه‌گیری

بر اساس مجموعه بررسی‌ها و آزمایش‌های آزمایشگاهی اجرا شده در این پژوهش، نتیجه‌گیری‌های زیر قابل استنتاج و بیان است:

- تأثیر غلظت‌های مختلف نمک‌های (کلرید سدیم، سولفات سدیم و کربنات سدیم) بر میزان رطوبت بهینه و دانسیتهٔ خشک ماکزیمم، بسیار جزئی و در حد رواداری مجاز آن‌هاست. یعنی میزان و نوع شوری خاک تأثیر چشمگیری بر مشخصات تراکمی خاک‌ها ندارد.
- نمایهٔ فشردگی و ضریب تحکیم نمونه‌ها متأثر از شاخص شوری نمونه‌ها (EC) است و چگونگی این تأثیر نیز بسته به نوع نمک متفاوت است.
- روند کلی تأثیر نمک کلرید سدیم بر نمایهٔ فشردگی، کاهشی و بر ضریب تحکیم، افزایشی است.
- نمک‌های کربنات سدیم و سولفات سدیم تا حدی از شوری، باعث افزایش نمایهٔ فشردگی و کاهش ضریب تحکیم و از این حد به بعد موجب کاهش نمایهٔ فشردگی و افزایش ضریب تحکیم می‌شوند.
- در غلظت ١٠ درصد نمک کلرید سدیم نمایهٔ فشردگی تفاوت معنی‌داری با نمایهٔ فشردگی سایر غلظت‌های این نمک دارد. در سایر مقادیر کلرید سدیم مورد آزمایش، نمایه‌های فشردگی تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.
- در نمک سولفات سدیم، نمایهٔ فشردگی با مقدار ۵ و ١٠ درصد، تفاوت معنی‌داری با سایر مقادیر این نمک دارد و مقادیر ٠ تا ٢ درصد این نمک تفاوت معنی‌داری از نظر نمایه فشردگی ندارند.
- ضریب فشردگی در غلظت‌های کم نمک‌های کلرید سدیم و سولفات سدیم (۵/. تا ٢ درصد)، تفاوت معنی‌داری با ضریب فشردگی تیمار شاهد (صفر درصد نمک) ندارد، در حالی‌که در کربنات سدیم، این گونه نیست و این ضریب در مقادیر کم نمک تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد و نیز با ضریب فشردگی مقادیر زیاد نمک (۵ و ١٠ درصد) دارد.
- افزودن صفر تا ١ درصد کلرید سدیم تأثیر معنی‌داری در ضریب تحکیم ندارد ولی ٢ و ۵ درصد آن، باعث کاهش معنی‌دار این ضریب می‌شود.
- اثر افزایش سولفات سدیم بر ضریب تحکیم، به جز برای ١٠ درصد این نمک، در جهت کاهش این ضریب است.
- افزودن ٠/۵ تا ٢ درصد (مقادیر کم) کربنات سدیم باعث کاهش معنی‌دار ضریب تحکیم خواهد شد. مقادیر بیشتر کربنات سدیم نیز باعث افزایش معنی‌دار ضریب تحکیم می‌گردد، اما روند تغییرات خطی نیست.

## مراجع

Abbasi, N. and Nazifi, M. H. 2013. Assessment and modification of sherard chemical method for evaluation of dispersion potential of soils. Geotech. Geol. Eng. 31(1): 337-349.

Abbasi, N., Nazifi, H. and Movahedan, M. 2010. The effects of type and quantity of pore water salinity on clay dispersion. Proceeding of the 4th International Conference on Soil Mechanic and Foundation. Nov. 1-2. Tehran. Iran. (in Farsi)

Abdullah. W. S., Al-Zoubi, M. S. and Alshibli. K. A. 1997. On the physicochemical aspects of compacted clay compressibility. Can. Geotech. J. 34(4): 551-559.

Anon. 2000. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04 .08. Soil and Rock. ASTM D421, D422, D4318, D5779, D4221, D4647.

Anon. 2003. The Characteristics of Clay. Groundwater and Environmental Engineering. CIV3248. Monash University.

Baumgartner, P., Priyanto, D., Baldwin, J. R., Blatz, J. A., Kjartanson, B. H. and Batenipour, H. 2008. Preliminary results of one-dimensional consolidation testing on bentonite clay-based sealing components subjected to two pore-fluid chemistry conditions. Report No. NWMO TR-2008-06. Nuclear Waste Management Organization. Toronto. Canada.

Lambe, T. W. 1958. The engineering behavior of compacted clay. ASCE J. Soil Mech. Found. Div. 84, 1-35.

Mitchell, J. K. 1993. Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley & Sons Inc.

Mojallali, H. 2007. Soil Chemitry. Tehran University Press. 4th Edition. (in Farsi)

Olson. R. E. and Mitronovas, F. 1960. Shear strength and consolidation characteristics of calcium and magnesium illite. Proceeding of the 9th National Conference on Clays and Clay Minerals. Oct. 5-8. Purdue University. India. 185-209.

Rao, S. M. and Thyagaraj, T. 2007. Swell-compression behaviour of compacted clays under chemical gradients. Can. Geotech. J. 44, 520-532.

Sadaghiani, M. and Ghadak, H. 2004. The effects of pH on strength properties of Clay. Proceeding of the 1st National Congress of Civil Engineering. May. 14-17. Sharif University. Tehran. Iran. (in Farsi)

Sparks, D. 2000. Soil Physical Chemistry. CRC Press. Florida.

Van Paassen, L. A. and Gareau. L. F. 2004. Effects of Pore Fluid Salinity on Compressibility and Shear Strength Development of Clayey Soils (Lecture Notes in Earth Sciences). In: Hack, R., Azzam, R. and Charlier, R. (Eds.) Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe. Springer Pub. 327-340.

Yilmaz, I. 2006. Indirect estimation of the swelling percent and a new classification of soils depending on liquid limit and cation exchange capacity. Eng. Geol. 85, 295-301.

Yukselen-Aksoy, Y., Kaya, A. and Oren, A. H. 2008. Seawater effect on consistency limits and compressibility characteristics of clays. Eng. Geol. 102, 54-61.

*Journal of Agricultural Engineering Research/Vol.14/No.3/2013/P:67-82*

# Effect of Pore Water Salinity on Compaction and Compressibility of Clayey Soils

**N. Abbasi*, M. Oveisiha and M. Movahedan**

* Corresponding Author: Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Institute, P. O. Box: 31585-845, karaj, Iran. Email: nader_iaeri@yahoo.com
Received: 23 February 2013, Accepted: 24 August 2013

The engineering properties of soils are generally affected by parameters such as mineral type, structure, and pore water salinity. The existing solutes of soil play a role in the electrochemical forces between particles and can change the index and mechanical properties of soil, including cohesion, compressibility, and compactibility. This study investigated the effect of sodium chloride, sodium sulfate, and sodium carbonate on compressibility and compactibility characteristics of clayey soil. For this purpose, 18 treatments were prepared using three types of salt at six concentrations (0%, 0.5%, 1%, 2%, 5%, 10% by weight of soil). Consolidation and compaction tests were conducted with three replications on the samples to determine the compression index (Cc), coefficient of consolidation (Cv), optimum moisture content (ωopt) and maximum dry density (γdmax) of soil samples. Statistical analysis using SPSS software showed that the salinity of the soil had no significant effect on the optimum moisture content and maximum dry density of the soil. The compression index and coefficient of consolidation were significantly affected by both the type and concentration of the solutes in the saturated extract of the soil.

**Keywords:** Coefficient of consolidation, Compression index, Maximum dry density, Optimum moisture content, Soil salinity