

## بررسی اثرات کاتیون باریم بر ویژگی‌های مکانیکی رس کهریزک

محمدصادق ملکی<sup>۱\*</sup>، حبیب‌الله بیات<sup>۲</sup> و تقی عبادی<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۶/۲)

### چکیده

شماری از نتایج پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که آلاینده‌های مشخصی با منشأ قلیایی، می‌توانند بر ویژگی‌های مکانیکی خاک‌های رسی اثرات کاهنده‌ای داشته باشند. برای بررسی پتانسیل اثرگذاری باریم قلیایی دو ظرفیتی بر مشخصات تورمی رس کهریزک - که مدفن اصلی پسماندهای جامد در جنوب تهران می‌باشد - مجموعه منظمی از آزمایش‌ها انجام شده است. مشاهدات نشان دادند که پس از افزودن محلول کلرید باریم در غلظت‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۲۵ مولار تورم خاک مطالعه شده که در گروه CH-MH قرار داشته و نشانه خمیری آن ۲۸/۴۴ می‌باشد، به ترتیب حدود ۱۷، ۳۷، ۴۸ و ۵۴ درصد و فشار تورم به ترتیب حدود ۴۱، ۵۵، ۶۵ و ۶۷ درصد کاهش یافت. همچنین مشخص شد که افزودن محلول‌های کلرید باریم با غلظت‌های بیش از ۱ مولار تأثیر کمی بر کاهش تورم و فشار تورم دارد.

کلمات کلیدی: رس، کلرید باریم، تورم، درصد تورم، فشار تورمی

۱. گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲. گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: msmaleki@civileng.iust.ac.ir

## مقدمه

پژوهش‌ها نشان داده‌اند که آلودگی‌های قلیایی یکی از مهم‌ترین منابع آلودگی خاک‌ها می‌باشند. زیرا در تماس قلیایی‌ها با کانی‌های رس، انحلال و رسوب کانی رخ داده که به تبع آن ویژگی‌های مکانیکی خاک‌ها دستخوش تغییر می‌گردند (۱).

دامادیات و چیم-اوی (۲۰۱۰) در پژوهشی برای نشان دادن اثرات افزایش ظرفیت کاتیونی بر رفتار مکانیکی خاک‌های چسبنده، مشاهده کردند که با افزایش ظرفیت کاتیونی، تورم آزاد حجمی بتونیت کاهش می‌یابد. در یک گروه نیز با افزایش عدد اتمی میزان اثرگذاری بر کاهش تورم در غلظت‌های مشابه افزایش می‌یابد. این محققین دریافتند افزایش ظرفیت کاتیون از ۱+ به ۲+ نسبت به افزایش ظرفیت از ۲+ به ۳+ تأثیر بیشتری بر تورم می‌گذارد. همچنین در ظرفیت‌های مشابه با کاهش غلظت مایع نفوذی، تورم حجمی بتونیت افزایش یافته و صرف‌نظر از کاتیون موجود در محلول، تورم بتونیت با افزایش غلظت محلول کاهش می‌یابد (۲).

از آنجاییکه باریم یکی از مهم‌ترین تولیدات شکافت هسته‌ای بوده (در نتیجه‌ی شکافت پلوتونیوم و اورانیوم ایجاد می‌شود) و با آزمایش سلاح‌های هسته‌ای، حوادث نیروگاه‌های هسته‌ای و استفاده از رادیو ایزوتوپ‌ها وارد زیست‌بوم می‌گردد، بررسی اثرات آن بر خاک‌های چسبنده می‌تواند از اهمیت زیادی برخوردار باشد. اگرچه بیشتر ایزوتوپ‌های باریم طول عمر بسیار کوتاهی دارند، اما حضور  $^{140}\text{Ba}$  در فاضلاب‌های رادیو اکتیو در مقادیر قابل توجه بعد از گذشت سه ماه از واپاشی، نشان دهنده‌ی غلظت‌های زیاد اولیه می‌باشد (۳).

منطقه کهریزک در جنوب شهر تهران واقع شده است و محل دفن پسماندهای شهر تهران می‌باشد (در بخش بعد توضیحاتی در این زمینه داده شده است). با توجه به این‌که پسماندهای ورودی به این مدفن معمولاً تفکیک نشده می‌باشند، احتمال ورود انواع آلودگی‌ها (در فازهای مختلف) به آن وجود دارد. بنابراین لازم است که از امنیت آن جهت نگهداری پسماند و عدم انتقال آلودگی‌ها به محیط مجاور اطمینان حاصل شود.

یکی از مواردی که در این زمینه باید کنترل شود پوشش زیرین مدفن می‌باشد که وظیفه نگهداری از پسماند را به مدت طولانی بر عهده دارد و باید بتواند مانع از خروج آلودگی‌ها از کف مدفن شود (در صورتی که این پوشش در عملکرد خود دچار نقصی شود، ممکن است مشکلات زیست محیطی فراوانی را ایجاد کند و برای کنترل آلودگی خارج شده از مدفن و جلوگیری از افزایش وسعت منطقه آلوده شده، نیاز به صرف هزینه‌های بسیاری باشد). از آنجاییکه پوشش زیرین مدفن نیز از جنس رس متراکم می‌باشد (به‌منظور کاهش نفوذپذیری پوشش رسی کف مدفن، این پوشش متراکم می‌شود) لازم است تأثیر آلودگی‌های مختلف بر خواص مکانیکی پوشش مدفن و خاک مجاور آن بررسی شود. پسماند ورودی به مدفن مرطوب می‌باشد که سبب جمع شدن شیرابه فراوانی در کف مدفن شود و از طریق زهکش‌های تعبیه شده در طول زمان جمع‌آوری می‌شود. آلودگی‌های کاتیونی، قابل انحلال در فاز مایع می‌باشند و به همراه شیرابه در مجاورت پوشش رسی قرار می‌گیرند. تراکم بالایی که پوشش رسی و خاک‌های مجاور آن دارد سبب می‌شود که میزان تورم آنها به مقدار زیادی افزایش یابد (۴).

خاک رس کهریزک در گروه خاک‌های با قابلیت تورم بالا قرار نمی‌گیرد. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که رس‌هایی که خاصیت تورمی کمی دارند نسبت به رس‌هایی که نشانه خمیری بالایی دارند، ممکن است آسیب بیشتری به سازه‌هایی که بر روی آنها واقع شده‌اند، برسانند. رس‌های با نشانه خمیری بالا در برابر تغییرات رطوبتی یا تغییرات محیطی امن‌تر هستند (۵). از اینرو مقرر گردید که پیامدهای بالقوه آلودگی رس کهریزک در جنوب تهران با آلاینده‌ی باریم (با توجه به محل قرارگیری در جدول تناوبی و مواردی که ذکر شد) مورد بررسی آزمایشگاهی قرارگیرد.

## مواد و روش‌ها

## خاک مورد استفاده

خاک رس مورد استفاده از منطقه‌ی دفن پسماندهای جامد شهر

**دستگاه ادنومتر مورد استفاده**  
دستگاه ادنومتر مورد استفاده دارای حلقه‌ای به قطر ۵ سانتی متر و ارتفاع ۲ سانتی متر و سنجشگری با دقت ۰/۰۰۲ میلی متر بود.

### روش انجام آزمایش

به منظور اندازه‌گیری اثرات محلول‌های مختلف بر تورم و تراکم‌پذیری خاک رس کهریزک از روش A استاندارد ASTM- (2003) D4546 استفاده شده است. برای بررسی اثرات مواد شیمیایی بر رفتار تغییر حجمی خاک رس کهریزک، ارزیابی تأثیر آب به‌عنوان یک سیال منفذی در آزمایش اندازه‌گیری تورم ضروری به نظر می‌رسد. همچنین این آزمایش با استفاده از محلول‌های باریم در غلظت‌های مختلف نیز انجام شده است.

قسمتی از خاک در رطوبت بهینه‌ی پراکتور اصلاح شده در داخل حلقه‌ی دستگاه ادنومتر متراکم شد. پس از قالب‌گیری و قراردادن نمونه در ظرف دستگاه ادنومتر، نشست نمونه تحت بار اعمالی (توسط ملحقات دستگاه شامل سنگ متخلخل و صفحه‌ی بارگذاری) را یادداشت کرده و پس از اشیاع کردن نمونه با محلول مورد نظر، تغییر ارتفاع نمونه پس از ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۵ و ۳۰ دقیقه و ۱، ۲، ۴، ۸، ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت یادداشت گردید و نمودار تورم- زمان رسم شد. پس از تکمیل تورم نمونه، فشار عمودی تقریباً معادل با ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۸۰ و به‌همین ترتیب کیلوپاسکال به‌صورت مرحله‌ای بر نمونه اعمال شده و کاهش ارتفاع نمونه، ۲۴ ساعت پس از هر مرحله افزایش بار یادداشت گردید. سپس افزایش بار تا رسیدن ارتفاع نمونه به ارتفاع اولیه (نسبت تخلخل اولیه) ادامه یافت، نمودار نسبت تخلخل- فشار رسم شد و فشار تورم متناظر با نسبت تخلخل اولیه به‌دست آمد (۶).

همچنین برای محاسبه‌ی  $C_c$  و  $C_s$  از روش C همان استاندارد استفاده شد. در این روش نمونه پس از قرار گرفتن در دستگاه تحکیم، به مدت ۵ دقیقه تحت تأثیر سربار اولیه قرار می‌گیرد و تغییر ارتفاع آن در این زمان اندازه‌گیری می‌شود. سپس نمونه اشیاع شده و درحالی که می‌خواهد تورم کند سربار

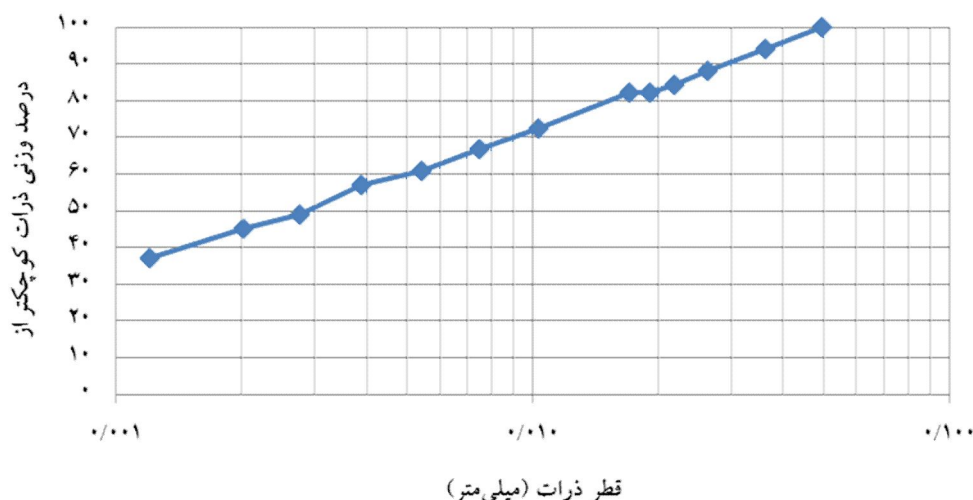
تهران در کهریزک گرفته شده که از نظر ساختار زمین‌شناسی دارای لایه‌بندی‌هایی می‌باشد که از نظر دانه‌بندی بین رس تا شن متغیر می‌باشند. عمق آب‌های زیرزمینی در این منطقه بیش از ۱۰۰ متر گزارش شده است. اگرچه از سال‌های ۱۳۴۰ به بعد مقداری از زباله‌های شهر تهران در این منطقه دفن شده است، لیکن به دلیل غیرفنی بودن روش استفاده شده، از دیرباز با مشکلاتی چون آتش‌سوزی ناشی از فرآیند تخمیر زباله و همچنین تولید بوهای نامطبوع مواجه بوده است.

از سال ۱۳۵۹ به بعد با افزایش میزان زباله، کمبود زمین و نیز به منظور بهداشتی‌تر نمودن سیستم دفن زباله، ترانشه‌هایی به طول ۴۰۰ الی ۵۰۰ متر، عرض ۲۰ الی ۲۵ متر و عمق ۴ الی ۵ متر حفر گردیده و روزانه بالغ بر ۷۰۰۰ تن زباله در این ترانشه‌ها دفن شده است. در حال حاضر در جنوب این منطقه، محل دفن جدیدی به‌صورت پیشرفته برای جایگزینی سیستم دفع غیراصولی زباله احداث شده است. خاک این منطقه به "رس کهریزک" معروف می‌باشد.

رس مورد استفاده در آزمایش‌ها از میان رس حفاری شده توسط ماشین‌آلات از قسمت‌های مختلف منطقه کهریزک نمونه‌برداری گردید. پس از انتقال این نمونه‌ها به آزمایشگاه، ابتدا کاملاً خشک شده و سپس برحسب نیاز خرد و مخلوط شده و از الک شماره‌ی ۲۰۰ عبور داده شده است. ظاهر کلوخه‌های رس کهریزک تقریباً یک دست بوده و فقط اندکی توده‌های متراکم شده‌ی آهک به اندازه‌ی ماسه و به رنگ سفید در آن دیده می‌شود.

### مایع مورد استفاده

مایعات مورد استفاده شامل آب مقطر و محلول کلرید باریم در غلظت‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۲۵ مولار بودند. این غلظت‌ها با حل کردن مقادیر لازم نمک‌های کلرید باریم در آب مقطر آماده شده‌اند.



شکل ۱. منحنی دانه بندی خاک رس کهریزک

استاندارد ASTM-D1557 رسم گردید. تنش اعمالی به نمونه در این حالت نسبت به آزمایش تراکم استاندارد، حدود ۴/۵ برابر افزایش می یابد. خط اشباع کامل نیز در سمت راست منحنی تراکم رسم شده است (شکل ۲) (۸). با استفاده از این نمودار درصد رطوبت بهینه‌ی تراکم ۱۹٪ و دانسیته‌ی حداکثر خشک خاک ۱٫۷۵ گرم بر سانتی متر مکعب به دست آمد.

#### ویژگی های مکانیکی خاک

برای نشان دادن پارامترهای مکانیکی خاک مورد مطالعه، آزمایش های دانسیته‌ی طبیعی به روش ترازوی ارشمیدس، چگالی ویژه، حدود اتربرگ و تعیین pH با رعایت استانداردهای ASTM-D1188، ASTM-D854، ASTM-ASTM-D4318 و US EPA-SW846- Method 9045 انجام شد. یافته‌های این آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

#### آزمایش‌های تجزیه‌ی شیمیایی و کانی‌شناسی

به منظور شناسایی کانی‌های تشکیل دهنده‌ی خاک، مطالعات تجزیه‌ی شیمیایی (XRF) و کانی‌شناسی (XRD) به ترتیب به وسیله‌ی دستگاه‌های Micro analyzer uni santis XRF و پراش اشعه X مدل Equinox 3000 (ساخت Inel فرانسه) بر روی نمونه‌ها انجام شده است (۹).

افزایش می یابد تا از تورم نمونه جلوگیری شود و سنجش‌گر مقدار پیش از اشباع شدن را نشان دهد. پس از این‌که تورم نمونه تقریباً به پایان رسید (حدود سه روز)، سربار مجدداً افزایش یافته و بارگذاری تا میزان مورد نیاز برای انجام محاسبات (مطابق با استاندارد) ادامه می یابد و سپس بار برداری انجام می شود. سپس نمودار تخلخل- سربار رسم شده و محاسبات لازم برای تعیین  $C_c$  و  $C_s$  براساس موارد ذکر شده در استاندارد انجام می شود (۶).

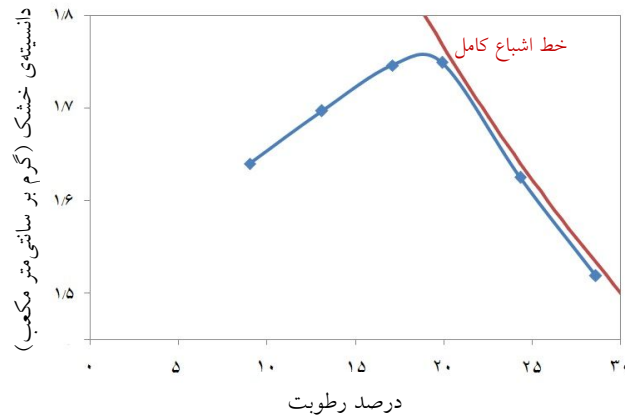
#### نتایج

##### نمودار هیدرومتری

آزمایش هیدرومتری بر اساس استاندارد ASTM-422 انجام شد که نتایج آن در شکل ۱ قابل مشاهده است (۷).

##### نمودار تراکم

بر اساس یافته‌های مطالعات دافالا (۲۰۱۲) افزایش چگالی خشک خاک میزان تورم و فشار تورم آن را افزایش می دهد (۵)، بنابراین به منظور مشاهده‌ی بیشترین میزان تورم خاک رس کهریزک آزمایش تراکم اصلاح شده روی این خاک انجام شد و نمودار دانسیته‌ی خشک بر حسب درصد رطوبت براساس



شکل ۲. نمودار تراکم اصلاح شده ی خاک رس کهریزک

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی نمونه ها

میزان	واحد	خصوصیت فیزیکی
۳۰٫۲		PL
۵۸٫۶		LL
۲۸٫۴		PI
۲٫۰۷	(gr/cm <sup>3</sup> )	چگالی خشک درجا
CH - MH		نوع خاک
۲٫۷۳	(gr/cm <sup>3</sup> )	G <sub>s</sub>
۰٫۶۳	-	فعالیت
۰٫۰۳۷	-	C <sub>s</sub>
۰٫۳۵	-	C <sub>c</sub>
۴۵٫۱	%	مقدار رس
۱۹	%	رطوبت بهینه ی تراکم
۱٫۷۵	(gr/cm <sup>3</sup> )	چگالی بیشینه تراکم
۷٫۴۴	-	pH
۵	%	درصد تورم
۱۷۳	(kPa)	فشار تورم
۰٫۵۲	-	تخلخل اولیه
۱	(mm)	میزان تورم

یافته های آزمایش تجزیه شیمیایی نمونه ها در جدول ۲ آورده شده است.

الف) آزمایش تجزیه ی شیمیایی (XRF) خصوصیات شیمیایی رس مستقیماً بر روی خواص مهندسی خاک از جمله رفتار تورمی آن تأثیرگذار است (۱۰ و ۱۱).

جدول ۲. نتایج تجزیه‌ی شیمیایی رس کهریزک

ماده‌ی تشکیل دهنده	درصد وزنی	ماده‌ی تشکیل دهنده	درصد وزنی
سیلیس (SiO <sub>2</sub> )	۵۰٫۵	سولفات بر حسب SO <sub>3</sub>	۰٫۴۱
اکسید آهن (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	۷٫۸	کلر بر حسب Cl	۰٫۰۴
اکسید آلومینیوم (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	۱۴٫۲	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰٫۱۹
اکسید منیزیم (MgO)	۳٫۴	اکسید سدیم (Na <sub>2</sub> O)	۰٫۶۵
اکسید کلسیم (CaO)	۷٫۸	اکسید پتاسیم (K <sub>2</sub> O)	۲٫۳۲
اکسید منگنز (MnO)	۰٫۱۹	اکسید تیتانیوم (TiO <sub>2</sub> )	۰٫۹۸

جدول ۳. نوع و درصد کانی‌های رس کهریزک

نوع خاک	کانی		
	مونتموریلونیت	ایلیت	کائولینیت
خاک	۲۳٫۴	۲۵٫۶	۹٫۴
خاک + آب مقطر	۱۹٫۶	۲۱٫۵	۲۴٫۴
خاک + کلرید باریم ۱٫۲۵ مولار	۴٫۹	۱۱٫۸	۳۰٫۲

#### ب) آزمایش کانی‌شناسی (XRD)

درصد تغییرات کانی‌های مونتموریلونیت، ایلیت و کائولینیت موجود در خاک بکر، خاک اشباع شده با آب مقطر و خاک اشباع شده با کلرید باریم دارای غلظت ۱٫۲۵ مولار در جدول ۳ آورده شده است.

#### نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری فشار تورم

نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری فشار تورم در شکل ۵ ارائه شده است.

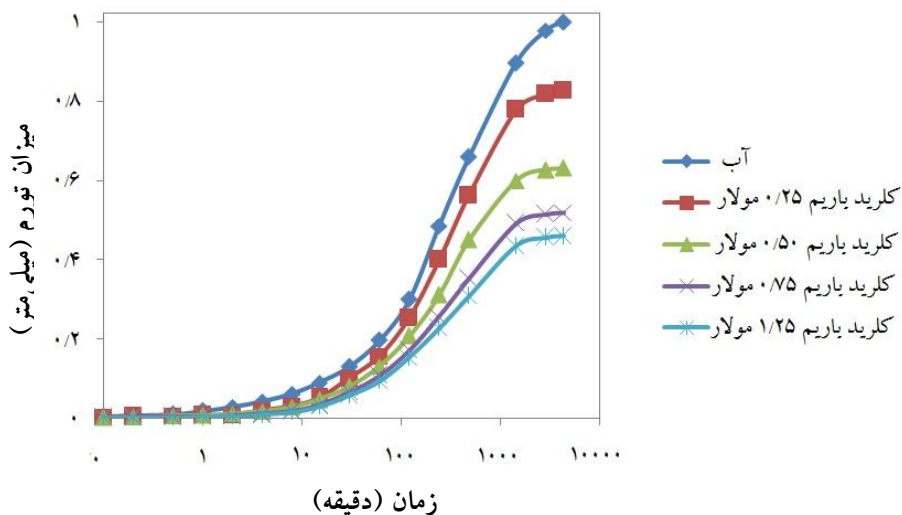
#### بحث

منحنی دانه‌بندی خاک که تقریباً خطی مایل است، نشان‌دهنده‌ی پیوستگی توزیع اندازه دانه‌ها در خاک مورد مطالعه بوده که ۴۵/۱ درصد آن را رس تشکیل می‌دهد. این میزان رس مناسب برای انجام مطالعه در زمینه‌ی تورم خاک رس می‌باشد.

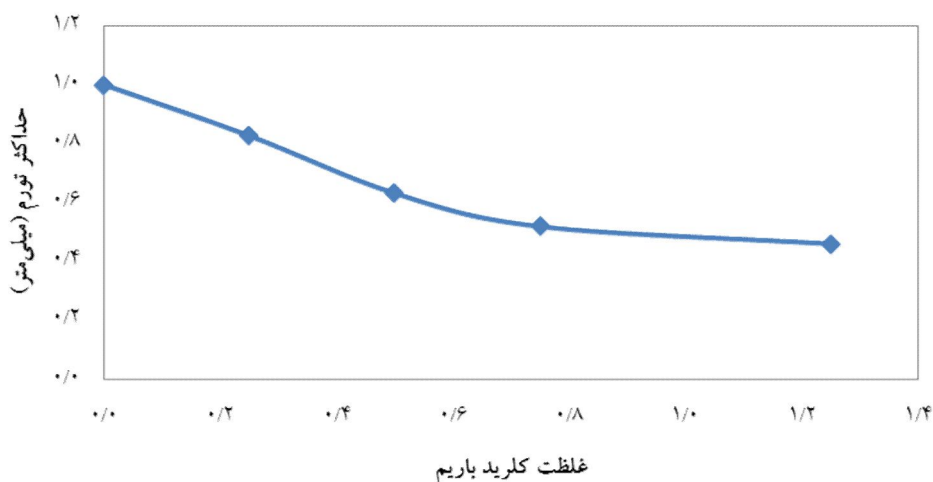
همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، تورم خاک رس کهریزک در مجاورت آب مقطر حدود ۵ درصد بوده است که این تورم به دلیل جذب ملکول‌های آب به سطوح با بار منفی رس و تشکیل آب لایه مضاعف می‌باشد. افزودن محلول کلرید باریم در غلظت‌های ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۰٫۷۵ و ۱٫۲۵ مولار تورم خاک را به ترتیب حدود ۱۷، ۳۷، ۴۸ و ۵۴ درصد کاهش می‌دهد.

#### نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری سرعت تورم

نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری سرعت تورم پس از افزودن محلول کلرید باریم در مقایسه با نمونه‌ی شاهد (اشباع از آب مقطر) در شکل ۳ قابل مشاهده است. در شکل ۴ نیز حداکثر تورم مشاهده شده در غلظت‌های مختلف رسم شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، مرحله‌ی اول تورم (تغییر علامت مشتق دوم نمودار) پس از گذشت ۱۶ ساعت تقریباً به پایان می‌رسد.



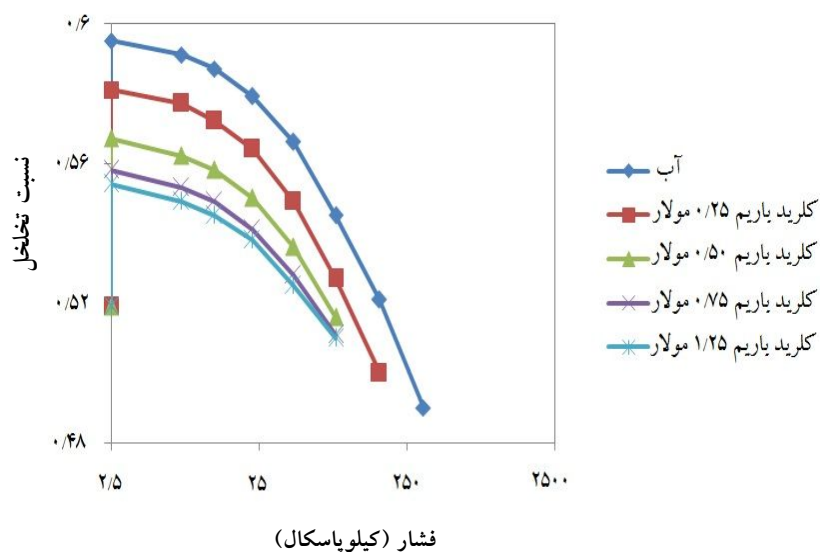
شکل ۳. مقایسه‌ی مقدار تورم رس متراکم شده‌ی کهریزک در تماس با آب مقطر، کلرید باریم ۰٫۲۵ مولار، کلرید باریم ۰٫۵۰ مولار، کلرید باریم ۰٫۷۵ مولار و کلرید باریم ۱٫۲۵ مولار



شکل ۴ تأثیر غلظت‌های مختلف کلرید باریم بر تورم خاک رس کهریزک

داده‌است و همان‌طور که از روند نمودار مشاهده می‌شود، در نهایت به میزان مشابهی می‌رسد که براساس تحقیقات ژانگ و همکارانش علت این موضوع آن‌است که فاصله‌ی بین لایه‌ای تقریباً در کمترین مقدار ممکن و حدود چهار لایه‌ی واحد آب است (۱۴). کاهش کانی مونت‌موریلونیت (از ۲۳/۴ تا ۱۹/۶ در مجاورت آب مقطر و ۴/۹ در مجاورت محلول کلرید باریم با غلظت ۱/۲۵ مولار) و افزایش کانی کائولینیت (از ۹/۴ تا ۲۴/۴

این نتیجه با نتایج مطالعات اسپوزیتو و مک‌براید همخوانی دارد و دلیل آن کاهش دافعه‌ی بین ذرات رس و کاهش ضخامت لایه‌ی مضاعف، با رهاسازی بیشتر باریم در فاز محلول است، با افزایش غلظت کاتیون‌ها در فاز محلول، آب از فضای داخل لایه‌ای خارج شده و سبب کاهش تورم می‌گردد (۱۲ و ۱۳). با توجه به شکل ۴ قابل مشاهده‌است که بیشترین تغییرات ناشی از محلول ساخته شده با کلرید باریم در محدوده‌ی صفر تا ۰٫۵ مولار رخ



شکل ۵. مقایسه‌ی مقدار فشار تورم رس متراکم‌شده‌ی کهریزک در تماس با آب مقطر، کلرید باریم ۰/۲۵ مولار، کلرید باریم ۰/۵۰ مولار، کلرید باریم ۰/۷۵ مولار و کلرید باریم ۱/۲۵ مولار

ملکول‌های آب به وسیله ذرات با بار منفی رس می‌باشد. به مرور که نمونه اشباع می‌شود، فشار آب منفذی در آن افزایش و تنش بین دانه‌ای کاهش می‌یابد. سپس نمونه بارگذاری شده و در وضعیت اضافه‌تحکیم یافته قرار می‌گیرد تا به تخلخل اولیه پیش از افزودن آب برسد. در این وضعیت نشست خاک ناشی از خروج تدریجی آب و کاهش فشار آب حفره‌ای می‌باشد. بنابراین فشار تورم به دست آمده وابسته به میزان تورم نمونه است و مستقل از نوع خاک می‌باشد. در صورتی که بارگذاری ادامه یابد تا از فشار پیش‌تحکیمی نیز عبور کند، خاک وارد مرحله عادی تحکیم یافته خواهد شد که نشانه فشردگی با توجه به این مرحله محاسبه می‌شود.

تحلیل یافته‌های آزمایشگاهی (که در شکل ۴ رسم شده است) با اتکاء به نرم‌افزار SPSS در دو حالت همبستگی خطی و درجه دوم نشان می‌دهد که برای رسیدن به بهترین برازش، همبستگی درجه دوم مناسب‌تر می‌باشد ( $R^2 > 0.99$ ) که به معنی و مفهوم آن است که علاوه بر معنی‌دار بودن وابستگی مقدار تورم خاک مورد آزمایش به حضور کاتیون باریم، تغییرات قابل پیش‌بینی از یک روند کاهش غیرخطی پیروی می‌کند. برای

در مجاورت آب مقطر و ۳۰/۲ در مجاورت محلول کلرید باریم با غلظت ۱/۲۵ مولار) که در جدول ۳ قابل مشاهده است، نشان از کاهش بیشتر تورم نمونه‌ها با افزایش غلظت محلول دارد.

شکل ۵ ارتباط میان میزان تورم نمونه‌ها با فشار تورم آنها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، افزودن محلول کلرید باریم با غلظت‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۲۵ مولار فشار تورم خاک را به ترتیب حدود ۴۱، ۵۵، ۶۵ و ۶۷ درصد کاهش می‌دهد. مقایسه شکل‌های ۳ و ۵ نشان می‌دهد که با افزایش میزان تورم، میزان فشار تورم نیز افزایش می‌یابد و فشار تورم مستقل از نوع محلول به کار برده شده می‌باشد و تنها به میزان تورم نمونه‌ها مربوط می‌شود. بررسی نتایج به دست آمده از آزمایش نشان می‌دهد که نمونه خاک ابتدا در داخل حلقه دستگاه تحکیم به صورت عادی تحکیم یافته متراکم می‌شود و فشار پیش‌تحکیمی وارد شده به آن برابر تنش اعمال شده در آزمایش تراکم اصلاح شده خواهد بود. سپس نمونه تحت فشار سربار دستگاه قرار می‌گیرد و به مدت ۵ دقیقه به صورت پیش‌تحکیم یافته نشست می‌کند. پس از افزودن آب به ظرف دستگاه تحکیم، نمونه متورم می‌شود. عامل اصلی تورم، جذب



این خاک انجام شود تا مستندات علمی کافی برای چنان جمع‌بندی در اختیار باشد.

### سپاسگزاری

مؤلفین بر خود فرض می‌دانند که از آقای مهندس بهرامی کارشناس محترم آزمایشگاه خاک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر که در نهایت شکیبائی و حسن نیت اجازه فرمودند تا از گستره بی‌کران دانش فنی ایشان در این پژوهش بهره‌گیری به‌عمل‌آید و همچنین آقای جوادی تکنسین محترم این آزمایشگاه سپاسگزاری گردد.

توجیه این روند غیرخطی لازم است به طبیعت کانی‌شناسی رس و تبادل کاتیون با کاتیون‌های موجود بر روی لایه‌های رس توجه شود. رسیدن به نوعی حالت اشباع از یون باریم در خاک مورد آزمایش احتمالاً سبب می‌گردد تا افزایش هرچه بیشتر غلظت آلاینده نتواند زمینه‌ساز افزایش بیشتر تورم خاک گردد.

اگرچه در یک نتیجه‌گیری شتاب‌زده، ممکن است نتایج حاصل از این پژوهش را نشانه‌ای از اثرگذاری آلاینده‌ی باریم بر بسیاری از ویژگی‌های مهندسی رس کهریزک (همچون پارامترهای مقاومت برشی، تراوانی، تغییرشکل‌های سه بُعدی، ...) دانست. لیکن مؤلفین بر این باور هستند که آزمایش‌هایی تکمیلی (به‌ویژه سه محوری‌ها) در آینده بر روی

### منابع مورد استفاده

1. Sivapullaiah P. V., P. Hari Prasad Reddy. 2010. Experimental investigation of the effect of high-pH solutions on the Opalinus shale and the Hammerschmiede smectite. *J. Clay Miner.* 35: 515-524.
2. Thammathiwat A., W. Chim-oye. 2010. Effect of Permeant Liquid on the Swell Volume and Permeability of Geosynthetic Clay Liners. *J. EJGE.* 15: 1183-1197.
3. Atun G., E. Bascetin, 2003. Adsorption of barium on kaolinite, illite and montmorillonite at various ionic strengths. *J. Radiochim. Acta.* 91: 223-228.
4. Day, R. W. 1994. Swell-Shrink behavior of compacted clay. *J. Geotech. Eng.* 120(3): 618-623.
5. Dafalla, M. A. 2012. The Influence of Placement Conditions on the Swelling of Variable Clays. *J. Geotech. Geol. Eng.* 30: 1311-1321.
6. ASTM D4546-03. 2003. one-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils.
7. ASTM D422-63. 1998. Test method for particle-size analysis of soil.
8. ASTM D1557. 2003. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)).
9. ASTM D4452. 2006. Standard Practice for X-Ray Radiography of Soil Samples.
10. Seed H. B., R.J. Woodward and R. Lundgren, 1962. Prediction of swelling potential for compacted clays. *J. the Soil mechanics and foundations division.* ASCE 88(3): 53-88.
11. Sherad J., L. Deckar and R. S. Deckar. 1977. Some Engineering Problem With Dispersive Clay. *J. ASTM* 623: 3-12.
12. Sposito, G. 1981. *The thermodynamics of soil solutions.* Oxford University Press. New York.
13. McBride, M. 1994. *Environmental chemistry of soils.* Oxford University Press. New York.
14. Zhang F., P. Low and C. Roth. 1995. Effects of monovalent exchangeable cations and electrolytes on the relation between swelling pressure and interlayer distance in montmorillonite. *J. Colloid and Interface Science* 173: 34-41.