بررسی اثرات کاتیون باریم بر ویژگی‌های مکانیکی رس کهریزک

محمدصادق ملکی[1*]، حبیب‌الله بیات[2] و تقی عبادی[2]

(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 داشته‌باشند. 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 شده‌است. مشاهدات نشان دادند که پس از افزودن محلول کلرید باریم در غلظت‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۲۵ مولار تورم خاک مطالعه‌شده که در گروه CH–MH قرارداشته و نشانه خمیری آن ۲۸/۴۴ می‌باشد، به‌ترتیب حدود ۱۷، ۳۷، ۴۸ و ۵۴ درصد و فشار تورم به‌ترتیب حدود ۴۱، ۵۵، ۶۵ و ۶۷ درصد کاهش یافت. همچنین مشخص‌شد 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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-23]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.71.24.2]

[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.71.277]

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 به‌تبع آن ویژگی‌های مکانیکی خاک‌ها دستخوش تغییر می‌گردند (۱).

دامادیوات 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 بنتونیت 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 بنتونیت افزایش یافته و صرف‌نظر از کاتیون موجود در محلول، تورم بنتونیت 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}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 دراین زمینه داده شده است). با توجه به این‌که پسماندهای ورودی به این مدفن معمولا تفکیک نشده می‌باشند، احتمال ورود انواع آلودگی‌ها (در فازهای مختلف) به‌آن وجود دارد. بنابراین لازم‌است که از امنیت آن جهت نگهداری پسماند و عدم انتقال آلودگی‌ها به محیط مجاور اطمینان حاصل شود.

یکی از مواردی که دراین زمینه باید کنترل شود پوشش زیرین مدفن می‌باشد که وظیفه نگهداری از پسماند را به‌مدت طولانی بر عهده دارد و باید بتواند مانع از خروج آلودگی‌ها از کف مدفن شود (درصورتی 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 به‌همراه 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 افزایش‌یابد (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 برروی آنها واقع شده‌اند، برسانند. رس‌های با نشانه خمیری بالا در برابر تغییرات رطوبتی یا تغییرات محیطی امن‌تر هستند (۵). از اینرو مقررگردید 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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-23]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.71.24.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.71.277]

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 بیش‌از ۱۰۰ متر گزارش شده است. اگرچه از سال‌های ۱۳۴۰ به بعد مقداری از زباله‌های شهر تهران در این منطقه دفن شده است، لیکن به‌دلیل 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 به‌منظور بهداشتی‌تر نمودن سیستم دفن زباله، ترانشه‌هایی به‌طول 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 این‌منطقه 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 حل‌کردن مقادیر لازم نمک‌های کلرید باریم در آب مقطر آماده‌شده‌اند.

دستگاه ادئومتر مورد استفاده

دستگاه ادئومتر مورد استفاده دارای حلقه‌ای به‌قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲ سانتی‌متر و سنجشگری با دقت ۰٫۰۰۲ میلی‌متر بود.

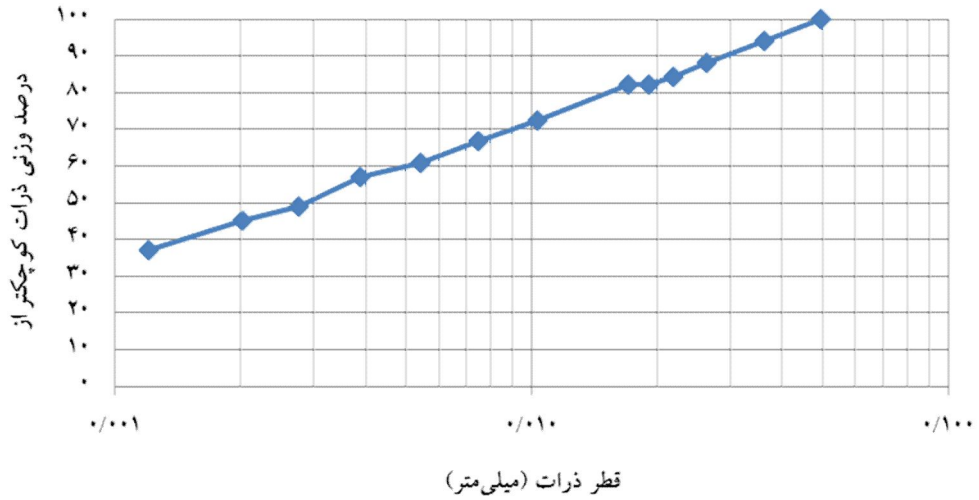
روش انجام آزمایش

به‌منظور اندازه‌گیری اثرات محلول‌های مختلف بر تورم و تراکم‌پذیری خاک رس کهریزک از روش A استاندارد ASTM-D4546 (2003) 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 به‌نظر 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 ادئومتر متراکم شد. پس از قالب‌گیری و قراردادن نمونه در ظرف دستگاه ادئومتر، نشست نمونه تحت بار اعمالی (توسط ملحقات دستگاه شامل سنگ متخلخل و صفحه‌ی بارگذاری) را یادداشت کرده و پس از اشباع کردن نمونه با محلول مورد نظر، تغییر ارتفاع نمونه پس‌از 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 عمودیی 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) ادامه‌یافت، 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، به‌مدت ۵ دقیقه تحت تأثیر سربار اولیه قرار می‌گیرد و تغییر ارتفاع آن در این زمان اندازه‌گیری می‌شود. سپس نمونه اشباع شده و درحالی که می‌خواهد تورم کند سربار

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-23]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.71.24.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.71.277]



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک رس کهریزک

افزایش می‌یابد 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 می‌یابد و سپس بار برداری انجام می‌شود. سپس نمودارتخلخل- سربار رسم شده و محاسبات لازم برای تعیین C_C و C_S براساس موارد ذکر شده در استاندارد انجام می‌شود (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

براساس یافته‌های مطالعات دافالا (۲۰۱۲) افزایش چگالی خشک خاک میزان تورم و فشار تورم آن را افزایش می‌دهد (۵)، بنابراین به‌منظور 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 استاندارد ASTM-D1557 رسم گردید. تنش اعمالی به نمونه در این حالت نسبت به آزمایش تراکم استاندارد، حدود ۴٫۵ برابر افزایش می‌یابد. 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 سانتی‌مترمکعب به‌دست آمد.

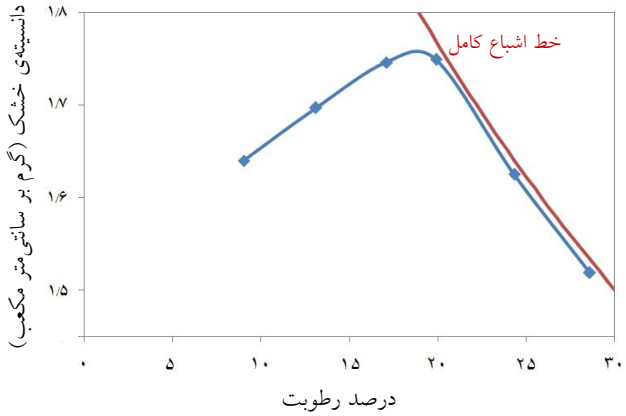
ویژگی‌های مکانیکی خاک

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

آزمایش‌های تجزیه‌ی شیمیایی و کانی‌شناسی

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-23]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.71.24.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.71.277]



شکل ۲. نمودار تراکم اصلاح‌شده‌ی خاک رس کهریزک

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی نمونه‌ها

خصوصیت فیزیکی	واحد	میزان
PL		۳۰/۲
LL		۵۸/۶
PI		۲۸/۴
چگالی خشک درجا	(gr/cm^3)	۲/۰۷
نوع خاک		CH - MH
G_S	(gr/cm^3)	۲/۷۳
فعالیت	–	۰/۶۳
C_S	–	۰/۰۳۷
C_C	–	۰/۳۵
مقدار رس	٪	۴۵/۱
رطوبت بهینه‌ی تراکم	٪	۱۹
چگالی بیشینه تراکم	(gr/cm^3)	۱/۷۵
pH	–	۷/۴۴
درصد تورم	٪	۵
فشار تورم	(kPa)	۱۷۳
تخلخل اولیه	–	۰/۵۲
میزان تورم	(mm)	۱

الف) آزمایش تجزیه‌ی شیمیایی (XRF)

خصوصیات شیمیایی رس مستقیماً برروی خواص مهندسی خاک از جمله رفتار تورمی آن تأثیرگذار است (۱۰ و ۱۱). یافته‌های آزمایش تجزیه شیمیایی نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-23]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.71.24.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.71.277]

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-23]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.71.24.2]

[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.71.277]

جدول ۲. نتایج تجزیه‌ی شیمیایی رس کهریزک

ماده‌ی تشکیل دهنده	درصد وزنی	ماده‌ی تشکیل دهنده	درصد وزنی
سیلیس (SiO_2)	۵۰/۵	سولفات بر حسب SO_3	۰/۴۱
اکسید آهن (Fe_2O_3)	۷/۸	کلر بر حسب Cl	۰/۰۴
اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)	۱۴/۲	P_2O_5	۰/۱۹
اکسید منیزیم (MgO)	۳/۴	اکسید سدیم (Na_2O)	۰/۶۵
اکسید کلسیم (CaO)	۷/۸	اکسید پتاسیم (K_2O)	۲/۳۲
اکسید منگنز (MnO)	۰/۱۹	اکسید تیتانیوم (TiO_2)	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 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 مشاهده‌است. در شکل ۴ نیز حداکثر تورم مشاهده‌شده در غلظت‌های مختلف رسم شده‌است. همان‌طورکه در شکل ۳ مشاهده می‌شود، مرحله‌ی اول تورم (تغییر علامت مشتق دوم نمودار) پس از گذشت ۱۶ ساعت تقریباً به پایان می‌رسد.

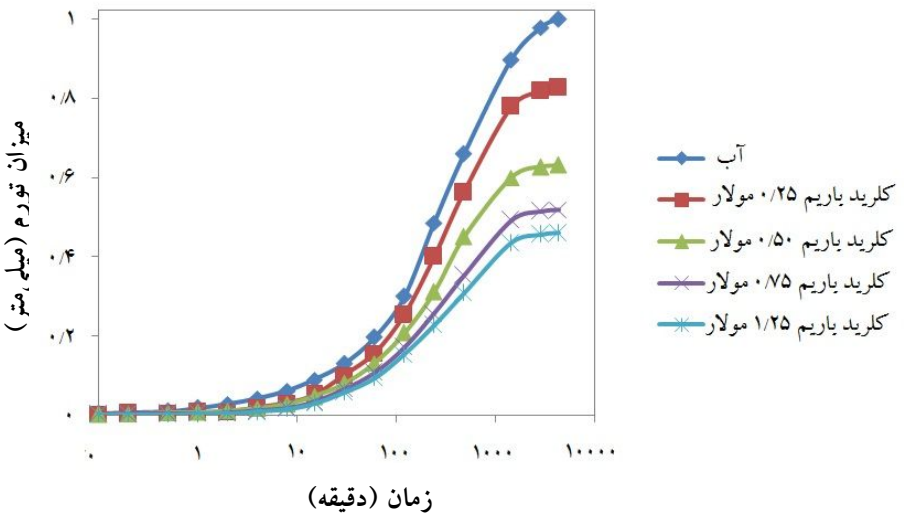
نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری فشار تورم

نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری فشار تورم در شکل ۵ ارئه شده‌است.

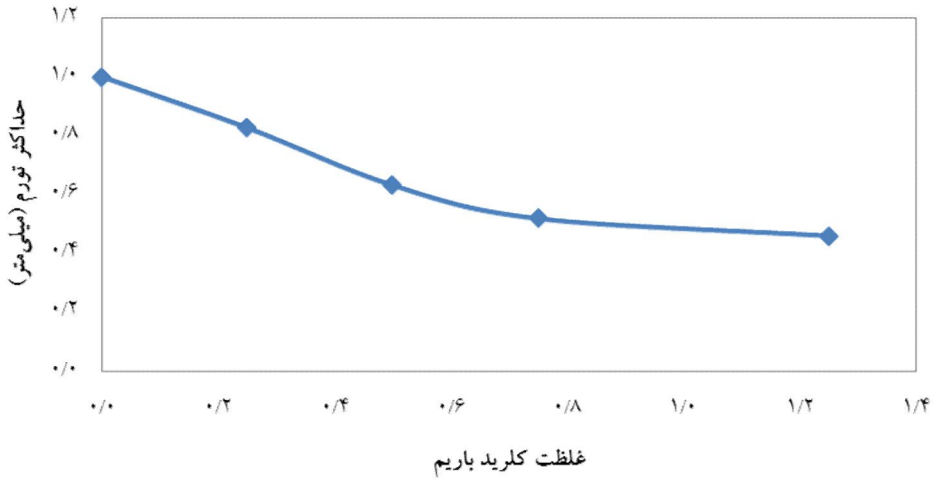
بحث

منحنی دانه‌بندی خاک که تقریباً خطی مایل است، نشان‌دهنده‌ی پیوستگی توزیع اندازه دانه‌ها در خاک مورد مطالعه‌بوده که ۴۵/۱ درصد آن را رس تشکیل می‌دهد. این‌میزان 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 به‌دلیل جذب ملکول‌های آب به‌سطوح 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 به‌ترتیب حدود ۱۷، ۳۷، ۴۸ و ۵۴ درصد کاهش می‌دهد.



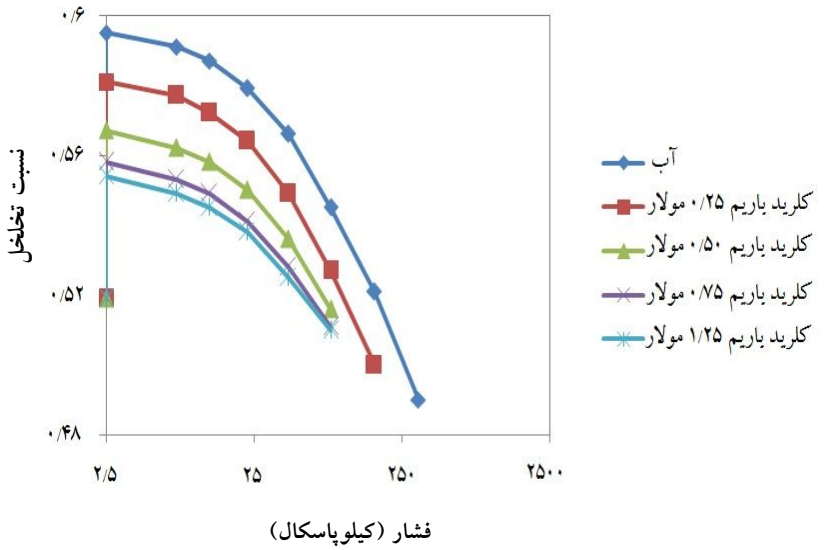
شکل ۳. مقایسه‌ی مقدار تورم رس متراکم شده‌ی کهریزک در تماس با آب مقطر، کلرید باریم ۰/۲۵ مولار، کلرید باریم ۰/۵۰ مولار، کلرید باریم ۰/۷۵ مولار و کلرید باریم ۱/۲۵ مولار



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

این‌نتیجه بانتایج 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، باافزایش غلظت کاتیون‌ها در فاز محلول، آب از فضای داخل لایه‌ای خارج‌شده و سبب کاهش تورم می‌گردد (۱۲ و ۱۳). باتوجه به شکل ۴ قابل مشاهده‌است که بیشترین تغییرات ناشی از محلول ساخته شده با کلرید باریم در محدوده‌ی صفر تا ۰/۵ مولار رخ داده‌است و همان‌طور که از روند نمودار مشاهده‌می‌شود، در نهایت به‌میزان مشابهی می‌رسد که براساس تحقیقات ژانگ و همکارانش علت این‌موضوع 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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-23]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.71.24.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.71.277]



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

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

شکل ۵ ارتباط میان میزان تورم نمونه‌ها با فشار تورم آنها را نشان‌می‌دهد. همان‌گونه‌که در این‌شکل مشاهده‌می‌شود، 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 کاهش‌می‌دهد. مقایسهٔ شکل‌های ۳ و ۵ نشان می‌دهد که باافزایش میزان تورم، میزان فشار تورم نیز افزایش می‌یابد و فشار تورم مستقل از نوع محلول به‌کار برده‌شده می‌باشد و تنها به‌میزان تورم نمونه‌ها مربوط می‌شود. بررسی نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش نشان‌می‌دهد که نمونه خاک ابتدا در داخل حلقه دستگاه تحکیم به‌صورت عادی تحکیم‌یافته متراکم می‌شود و فشار پیش‌تحکیمی واردشده به‌آن برابر تنش اعمال‌شده در آزمایش تراکم اصلاح‌شده خواهدبود. سپس نمونه تحت فشار سربار دستگاه قرار می‌گیرد و به‌مدت ۵ دقیقه به‌صورت پیش‌تحکیم‌یافته نشست می‌کند. پس از افزودن آب به ظرف دستگاه تحکیم، نمونه متورم می‌شود. عامل اصلی تورم، جذب ملکول‌های آب به‌وسیله 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 اضافه‌تحکیم‌یافته 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 به‌دست‌آمده وابسته به‌میزان تورم نمونه است و مستقل از نوع خاک می‌باشد. درصورتی‌که بارگذاری ادامه یابد تا از فشار پیش‌تحکیمی نیز عبور کند، خاک وارد مرحله عادی تحکیم یافته خواهد شد که نشانه فشردگی باتوجه 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 نشان‌می‌دهد که برای رسیدن به بهترین برازش، همبستگی درجه دوم مناسب‌تر می‌باشد ($R^2 > ۰/۹۹$) که به معنی و مفهوم آن‌است که علاوه‌بر معنی‌داربودن وابستگی مقدار تورم خاک مورد آزمایش به‌حضور کاتیون باریم، تغییرات قابل پیش‌بینی از یک روند کاهش غیرخطی پیروی می‌کند. برای

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-23]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.71.24.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.71.277]

توجیه این روند غیرخطی لازم‌است به‌طبیعت 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، ممکن‌است نتایج حاصل از این پژوهش را نشانه‌ای از اثرگذاری آلاینده‌ی باریم بر بسیاری از ویژگی‌های مهندسی رس کهریزک (همچون پارامترهای مقاومت برشی، تراوائی، تغییرشکل‌های سه بُعدی، ...) دانست. لیکن مؤلفین بر این باور هستند که آزمایش‌هایی تکمیلی (به‌ویژه سه محوری‌ها) در آینده بر روی این خاک انجام شود تا مستندات علمی کافی برای چنان جمع‌بندی در اختیار باشد.

سپاسگزاری

مؤلفین بر خود فرض می دانند 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 این‌پژوهش بهره‌گیری به‌عمل‌آید و همچنین آقای جوادی تکنسین محترم این آزمایشگاه سپاسگزاری گردد.

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^3 (2,700 kN-m/m^3)).
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.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-23]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.71.24.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.71.277]