اثر محلول نمک بر مشخصات لایهٔ پوششی مراکز دفن مواد زائد

نادر شریعتمداری، مرضیه سلامی: دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

shariatmadari@iust.ac.ir

تاریخ: دریافت ۸۸/۲/۲۷ **پذیرش**۸۹/۳/۲۹

چکیده

مراکز دفن مواد زائد به منظور جداسازی زباله دفن شده از محیط اطراف و آب‌های زیرزمینی طراحی می‌شوند. پوششی که در کف مراکز دفن قرار می‌گیرد، از اهمیت زیادی برخوردار است چرا که از انتقال آلودگی به آب‌های زیرزمینی جلوگیری می‌کند. پوشش کف می‌تواند مخلوطی از خاک محل و بنتونیت باشد. در این پژوهش به بررسی اثر دو نمک NaCl و $MgCl_2$ در چندین غلظت بر روی مشخصات مخلوط خاک محل- بنتونیت در دو نسبت ۱۰:۱۰۰ و ۲۰:۱۰۰ (۱۰ و ۲۰ درصد وزنی بنتونیت و ۱۰۰ درصد وزنی کل مخلوط خاک) پرداخته شده است. آزمایش‌های انجام گرفته شامل آزمایش تحکیم یک بعدی به منظور تعیین نفوذپذیری و فشردگی مخلوط‌های خاک، آزمایش تعیین حدود آتربرگ و آزمایش تورم آزاد است. نتایج نشان می‌دهد که نوع نمک و غلظت آن بر مشخصات مخلوط خاک مؤثر است. مقایسه محلول‌های نمک نشان می‌دهد که کاتیون‌های دوظرفیتی نسبت به کاتیون‌های تک ظرفیتی بر روی هدایت هیدرولیکی مخلوط اثر بیش‌تری دارند. مقایسه اثر غلظت‌های مختلف نمک در یک نوع نمک بر روی مخلوط خاک مشخص، بیان‌گر این است که با کاهش غلظت نمک، هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد. این پدیده بر اساس تئوری لایه دوگانه پخشیده قابل توجیه است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.3.6]

مقدمه

با رشد روز افزون جمعیت و توسعه صنایع، تولید زباله رو به افزایش است. دفع بهداشتی این مواد تبدیل به یکی از مهم‌ترین مسائل محیط زیست شده است. مراکز دفن بهداشتی، مکان نهایی برای دفن مواد زائد ناخواسته و یا غیرقابل استفاده هستند[۱]. در طراحی مراکز دفن، ایجاد سیستم‌های مناسب پوششی کف که زباله‌های دفن شده را از محیط اطراف در زمان بهره‌برداری و بعد از آن جداسازی کند، پراهمیت است. قشر با نفوذپذیری اندک درکف این مدفن‌ها در جلوگیری از گسترش پساب‌های ناشی از مواد زائد و آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی نقش به‌سزایی دارد.

ترکیبی از خاک موجود در محل و بنتونیت به‌عنوان پوشش‌کف مناسب است. مونت‌موریلونیت کانی اصلی موجود در بنتونیت است که باعث کاهش نفوذپذیری پوشش کف می‌شود. تورم بین لایه‌ای و لایه آب هیگروسکوپی چسبیده به مونت‌موریلونیت باعث کاهش نفوذپذیری بنتونیت نسبت به آب می‌شود [۲].

ترکیب شیرابه زباله از تنوع بسیار زیادی برخوردار است و ترکیبات گوناگونی از جمله مواد معدنی، آنیون‌ها و کاتیون‌ها، مواد آلی و غیره در آن یافت می‌شود. بنا بر این پوشش کف مراکز دفن باید به‌گونه‌ای طراحی شود که از انتقال انواع مواد جلوگیری کند. در این راستا استفاده از آب به عنوان سیال نافذ برای تعیین خصوصیات لایه پوششی کافی نیست و نمی‌تواند نماینده ترکیب واقعی شیرابه در مرکز دفن باشد.

هدف از انجام این پژوهش، بررسی اثر محلول‌های نمک که در شیرابه مرکز دفن یافت می‌شود بر روی مشخصات مخلوط خاک محل- بنتونیت به‌عنوان پوشش کف مراکز دفن زباله است. نمک‌های استفاده شده شامل دو نمک $NaCl$ و $MgCl_2$ در دو غلظت ۰/۱ نرمال و ۱ نرمال است. مشخصات مورد بررسی حد روانی مخلوط، تورم آزاد بنتونیت و هدایت هیدرولیکی با استفاده از دستگاه تحکیم یک بعدی است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.3.6]

مروری بر پژوهش‌های گذشته

پژوهش‌های بسیاری بر روی بررسی اثر مواد مختلف بر روی مشخصات خاک به خصوص بنتونیت خالص انجام شده است. در سال ۱۹۷۱ مصری و السون[1] تأثیر کاتیون‌های کلسیم را بر روی خاک رس از نوع مونت‌موریلونیت آزمایش کردند. کاتیون‌های کلسیم با جای‌گزینی کاتیون‌های تبادلی سدیم در خاک مونت‌موریلونیت باعث کاهش ضخامت لایه آب دوگانه و افزایش نفوذپذیری به میزان ۲۸ برابر شد [۲]. در پژوهش دیگری محققین نشان دادند افزایش غلظت نمک کلریدسدیم باعث افزایش هدایت هیدرولیکی در نوعی خاک طبیعی شد. علت این بود که افزایش غلظت کاتیون‌های سدیم در لایهٔ دوگانه باعث کاهش نیروهای رانش بین ذرات گردیده که در نهایت نفوذپذیری افزایش یافت [۳].

در ادامه در سال ۱۹۹۷، گلیسون و همکاران[2] نشان دادند که جذب آب به‌وسیله دو نوع بنتونیت یعنی بنتونیت-کلسیم و بنتونیت-سدیم، هنگامی که با محلول کلرید کلسیم با غلظت بالا تحت آزمایش قرار گرفتند، تفاوت عمده‌ای با هم نداشت. این امر به علت تأثیر غلظت زیاد الکترولیت است[۴]. در سال ۱۹۹۸ اشترن و شکلفورد[3] مخلوط‌هایی از ماسه و بنتونیت تهیه کردند و تحت نفوذ محلول کلرید کلسیم قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که هدایت هیدرولیکی مخلوط‌های ماسه و بنتونیت، وقتی که تحت تأثیر محلول کلرید کلسیم با غلظت ۰/۵ مولار قرار گرفت، به میزان ۲۰ برابر افزایش یافت[۵]. در تحقیق دیگری، در سال ۱۹۹۹ الاواجی[4] به بررسی رفتار خاک‌های متورم شونده پرداخت. وی به بررسی اثر نمک‌های $Ca(NO_3)_2$ و $NaNO_3$ در غلظت‌های ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۴ نرمال بر روی رفتار مخلوط ماسه و ۲۰ درصد بنتونیت پرداخت. نتایج به‌دست آمده چنین بود: کلیه نمک‌ها در کلیه غلظت‌ها به طور محسوسی باعث کاهش حدود آتربرگ بنتونیت شدند. با افزایش غلظت نمک، حد روانی و اندیس پلاستیسته کاهش یافت به‌طوری که در غلظت حدود ۱ نرمال به کم‌ترین مقدار خود

[1] Mesri and Olson
[2] Gleason et al.
[3] Stern and Shackelfrod
[4] Alawaji

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.3.6]

رسید ولی با افزایش غلظت تقریبا ثابت ماند[۶].

شکلفورد و همکاران (۲۰۰۰)، جو و همکاران[5] (۲۰۰۱) و شان و لای[6] (۲۰۰۲) بیان کردند که با افزایش تورم آزاد بنتونیت، هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد [۷]، [۸]، [۹].

در سال ۲۰۰۳ اشمیتز و پاسان[7] با بررسی اثر محلول‌های نمک بر روی چند رس نشان دادند اثر محلول نمک بر روی مشخصات رس‌هایی که دارای مقادیر بیش‌تر اسمکتیت هستند، قابل ملاحظه‌تر است [۱۰]. در پژوهش دیگری در سال۲۰۰۶، اوهتسوبو و همکاران[8] به بررسی اثر محلول نمک بر روی مشخصات ترکیب خاک بازالتی و ۱۰ درصد بنتونیت و ترکیب خاک بازالتی و ۲۰ درصد بنتونیت پرداختند. آزمایش‌های هدایت هیدرولیکی با استفاده از دستگاه تحکیم انجام گرفت. نتایج نشان داد که حد روانی مخلوط‌ها تحت تاثیر یون‌های سدیم و کلسیم با غلظت‌های بین ۰ تا ۰/۰۱ نرمال تقریبا یک‌سان بود ولی با افزایش غلظت یون‌ها در محلول نمک، به طور محسوسی کاهش یافت[۱۱]. سینگ و پاراساد[9] در سال ۲۰۰۷، برای ملاحظه اثر مواد شیمیایی آلی و غیرآلی بر روی خاک بنتونیت، از دو ماده که عموماً در مراکز دفن زباله یافت می شود، یعنی هیدروکسید آلومینیوم و اسید استیک استفاده کردند. مقادیر اپتیمم این مواد ارزیابی شدند و اثر هر یک به طور جداگانه در شرایط کنترل شده‌ای در آزمایشگاه بر روی بنتونیت بررسی شد. نتایج نشان داد که هدایت هیدرولیکی تحت اثر اسید استیک ۱۷٪ ، و تحت اثر هیدروکسید آلومینیوم ۱۲٪ درصد کاهش یافت[۱۲]. در سال ۲۰۰۸، رابرتس و شیمائوکا[10] به بررسی امکان استفاده از شن پوشیده شده با بنتونیت به عنوان پوشش کف مرکز دفن پرداختند. آن‌ها نشان دادند هنگامی که از انرژی تراکم برای متراکم کردن نمونه‌ها به میزان مناسبی استفاده شود، هدایت هیدرولیکی به طور چشم‌گیری پایین خواهد بود (۶×۱۰^{-۱۰} سانتی‌متر بر ثانیه)[۱۳].

---

[5] Jo et al.
[6] Shan and Lai
[7] Schmitz and Paassen
[8] Ohtsubo et al.
[9] Sing and Parasad
[10] Roberts and Shimaoka

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.3.6]

در این پژوهش به بررسی اثر NaCl و $MgCl_2$ بر روی مشخصات مخلوط خاک-بنتونیت پرداخته شده است.

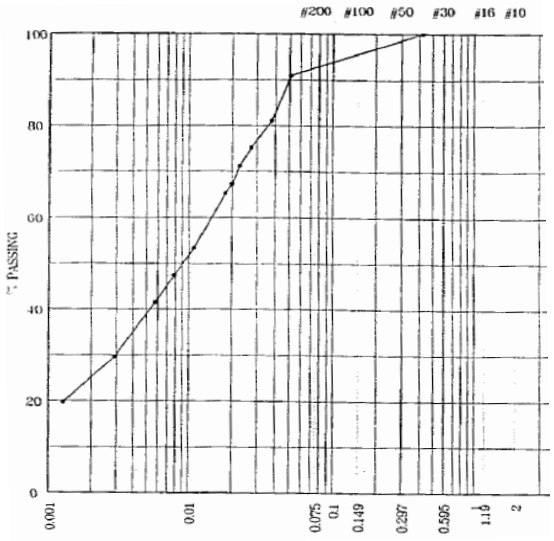
مواد و روش‌ها

خاک استفاده شده در این تحقیق، مخلوطی از خاک رس از منطقه خاتون‌آباد ورامین و خاک بنتونیت است. بنتونیت به کار رفته در آزمایش‌ها، بنتونیت حفاری ساخت شرکت باریت فلات ایران بوده است. برخی از مشخصات خاک‌ها در جدول۱ نشان داده شده است.

جدول۱. مشخصات خاک ورامین و بنتونیت

مشخصات	رس ورامین	بنتونیت
Gs	۲/۶۷	۲/۵۳
حد روانی (٪)	۳۴/۲۰	۱۹۹/۴
شاخص خمیری(٪)	۱۳/۶۶	۱۵۷/۹
OMC(٪)-MDD(gr/cm^3)	۱۴-۱/۸۶	تعیین نشده است

آزمایش دانه‌بندی برای تعیین دامنه اندازه ذرات موجود در خاک بر حسب درصدی از وزن کل خاک خشک انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که ۹۳٪ خاک مورد نظر سیلت و رس است و حدود ۷٪ آن ماسه است. منحنی دانه‌بندی در شکل ۱ آورده شده است.



شکل۱. منحنی دانه‌بندی خاک ورامین

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.3.6]

برای بررسی کانی‌های رس ورامین از دستگاه دیفرکتوگرام مدل D5000 ساخت کارخانه زیمنس آلمان (لامپ مسی با طول موج ۱/۵۴۰۹ آنگستروم استفاده شد. شکل ۲ نمودار XRD کانی‌های رسی خاک ورامین را نشان می‌دهد نتیجهٔ آزمایش نشان می‌دهد که کانی قالب اولیه تشکیل‌دهنده‌ی خاک رس ورامین ایلیت است، پس از آن اسمکتیت و کلریت است. برای بررسی عناصر تشکیل دهنده، خاک رس ورامین به روش XRF تجزیه شد. این دستگاه قابلیت تولید اشعهٔ ایکس با انرژی و طول موج معین را دارد. چنان‌چه ماده‌ای تحت تابش مداوم اشعهٔ ایکس قرار گیرد، اتم‌های تشکیل دهندهٔ ماده اشعهٔ ایکس ساطع می‌کنند که طول موج و انرژی متفاوتی با طول موج و انرژی تابیده شده دارد. از خطوط تولید شده توسط عناصر با کمک یک پردازش‌گر کامپیوتری تحلیل کمی و کیفی مواد صورت می‌گیرد. این خطوط برای هر عنصر در محدودهٔ مشخصی از طول موج قرار می‌گیرد. نتایج آنالیز XRF خاک ورامین در جدول ۲ آورده شده است.

جدول۲. تجزیه شیمیایی خاک رس ورامین

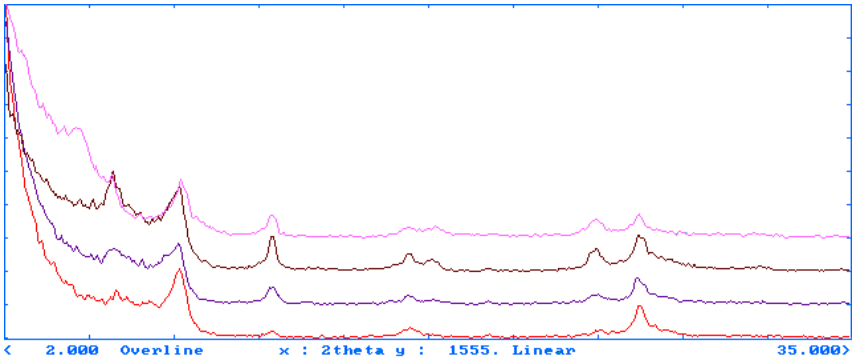
مواد تشکیل دهنده خاک	درصد
سیلیس SiO_2	۵۴/۱
اکسید آهن Fe_2O_3	۶/۹
اکسید آهنFe_3O_4	۱/۴
اکسید آلومینیومAl_2O_3	۱۵/۲
اکسید منیزیمMgO	۳/۲
اکسید کلسیمCaO	۱/۱۵
اکسید سدیمNa_2O	۱/۰۳
اکسید پتاسیمK_2O	۲/۸
سولفاتSO_3	۰/۱۷
کلرCl^-	۰/۰۳
سنگ آهک$CaCO_3$	۲/۸
افت حرارتی در ۱۰۰۰	۱۱/۱

محلول‌های استفاده شده به‌عنوان سیال منفذی شامل آب دیونیزه شده و محلول‌های نمک NaCl و $MgCl_2$ است. نمک‌ها از شرکت ایران‌مریک تهیه شده‌اند. مشخصات نمک در

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.3.6]

جدول ۳ ملاحظه می‌شود.



شکل۲. نمودار XRD خاک ورامین

جدول ۳. مشخصات محلول‌ها

نام نمک	فرمول شیمیایی	جرم مولکلولی g/mol	چگالی* g/cm^3
کلرید سدیم	NaCl	۵۸/۴۴	۱/۰۳۸۷
کلرید منیزیم	$MgCl_2.6H2O$	۲۰۳/۳۰	۱/۰۳۵۸

*** برای غلظت ۱ نرمال در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد**

آزمایش‌ها

آزمایش‌های تعیین حد روانی و خمیری، تورم آزاد بنتونیت و هدایت هیدرولیکی با استفاده از دستگاه تحکیم یک بعدی بر روی مخلوط‌های خاک- بنتونیت انجام شده است. در زیر شرح مختصری از این آزمایش‌ها بیان شده است.

آزمایش حد روانی

تعیین حد روانی نمونه‌های خاک ورامین و بنتونیت، همچنین مخلوط این دو خاک، در درصدهای وزنی ۹۰ درصد خاک ورامین و ۱۰ درصد بنتونیت (۱۰:۱۰۰) و ۸۰ درصد خاک ورامین و ۲۰ درصد بنتونیت (۲۰:۱۰۰) مطابق با استاندارد انگلیس BS1377:Part2:1990، طبق روش مخروط نفوذسنج انجام گرفت. آب مقطر دیونیزه شده و همچنین محلول‌های نمک کلرید سدیم و کلرید منیزیم در چهار غلظت ۰/۰۱N، ۰/۱N، ۱N و ۲N تهیه شد و حد روانی خاک با استفاده از آن‌ها تعیین شد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.3.6]

آزمایش تورم آزاد

آزمایش تورم آزاد مطابق استاندارد ASTM D5890 انجام گرفت. این آزمایش بر روی بنتونیت اجرا شد. محلول‌های استفاده شده شامل نمک‌های کلرید سدیم و کلرید منیزیم در دو غلظت N ۰/۱ و N ۱ بود. برای کاهش اثر اصطکاک بین بنتونیت و دیواره استوانه مدرج، تغییراتی در این آزمایش صورت گرفت [۱۳]. نحوهٔ انجام آزمایش چنین بود: ابتدا بنتونیت در گرمکن در دمای ۵ ± ۱۰۵درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و خشک شد. آن گاه حدود ۴۰ گرم از آن برداشته شد و در استوانه مدرج به حجم ۲۰۰۰ میلی‌لیتر ریخته شد. استوانه از قبل با محلول نمک مورد نظر به اندازه ۱۸۰۰ میلی‌لیتر پر گشته بود.۴۰ گرم بنتونیت، در مقادیر ۲ گرمی، هر بار در ۱۰ دقیقه در استوانه ریخته شد. پس از این که آخرین مقدار بنتونیت (۲ گرم آخر) ریخته شد، دیواره استوانه با دقت با محلول نمک مورد نظر شسته شد و به حجم ۲۰۰۰ میلی لیتر رسانیده شد. استوانه با درپوش پلاستیکی بسته شد. نمونه‌ها به مدت ۲ ماه به همان حالت گذاشته شدند. تغییرات در میزان تورم و pH یادداشت شد.

آزمایش تحکیم

هدف از انجام آزمایش تحکیم در این تحقیق، اندازه‌گیری نفوذپذیری و فشردگی مخلوط‌های خاک است. آزمایش‌های انجام گرفته شامل آزمایش بر روی مخلوط خاک رس ورامین و بنتونیت در دو درصد وزنی ۱۰:۱۰۰ و ۲۰:۱۰۰ است. محلول‌های استفاده شده به عنوان سیال منفذی، آب مقطر دیونیزه شده و نمک‌های کلرید سدیم و کلرید منیزیم در دو غلظت N۰/۱ و N۱ بود. آزمایش تحکیم طبق استاندارد ASTM D2435 انجام گرفت.

اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی با استفاده از دستگاه تحکیم دارای مزایایی است: از دید عملی و برای اهداف مهندسی، اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی با استفاده از دستگاه تحکیم سریع‌تر صورت می‌گیرد. همچنین باید گفت به علت این که سیال منفذی هنگام تحکیم جای‌گزین نمی‌شود، مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌دست آمده از طریق آزمایش تحکیم قابل مقایسه با مقادیر هدایت هیدرولیکی اولیه به‌دست آمده از آزمایش اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی از طریق مستقیم است [۱۴].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.3.6]

نمونه‌ها به صورت دست‌خورده، با رطوبت اولیه به میزان رطوبت حد روانی تهیه شدند. علت این امر بررسی اثر محلول‌های نمک در دراز مدت بر روی خاک بود. تهیهٔ نمونه به این صورت بود که مقدار مناسبی از محلول نمک مورد نظر با نمونه خاک مخلوط شد به طوری که درصد رطوبت نمونه به حد روانی رسید و مخلوطی همگن به‌دست آمد. رینگ تحکیم بر روی صفحه شیشه‌ای گذاشته شد. قطر رینگ ۵۰ میلی‌متر و ضخامت آن ۲۰ میلی‌متر بود. دیوارهای رینگ با گریس سیلیکون برای جلوگیری از اصطکاک بین جداره و نمونه چرب شد. نمونهٔ خاک با استفاده از کاردک در رینگ قرار داده شد. سعی شد در حین گذاشتن نمونه در رینگ هوایی محبوس نگردد. نمونه و رینگ با ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم وزن گشت. سپس رینگ در سلول تحکیم قرار داده شد. در سلول تحکیم به ترتیب سنگ متخلخل زیرین، ورقه صافی زیرین، نمونه درون رینگ، ورقه صافی رویی، و سنگ متخلخل رویی قرار گرفت. صفحه بارگذاری بر روی سنگ متخلخل بالایی قرار گرفت. اطراف نمونه با محلول نمک پر شد و سلول در دستگاه بارگذاری قرار گرفت. کل سلول تحکیم با پلاستیک پوشیده شد و نمونه به مدت حداقل ۲۴ ساعت عمل‌آوری شد.

پس از این مدت، بارگذاری بر روی نمونه صورت گرفت. بارگذاری از ۲۵kPa شروع شد و تا ۴۰۰kPa ادامه یافت. نسبت افزایش بار برابر واحد بود. افزایش بارگذاری هر ۲۴ ساعت یک بار صورت گرفت. تغییرات ضخامت نمونه با استفاده از گیج با دقت ۰/۰۰۲mm ثبت گردید. هدایت هیدرولیکی با استفاده از فورمول زیر محاسبه شد.

$$k = c_v m_v \gamma_w$$

که در آن C_v ضریب تحکیم، m_v ضریب تغییر حجم و γ_w وزن مخصوص سیال منفذی است.

نتایج و بحث

آزمایش حد روانی

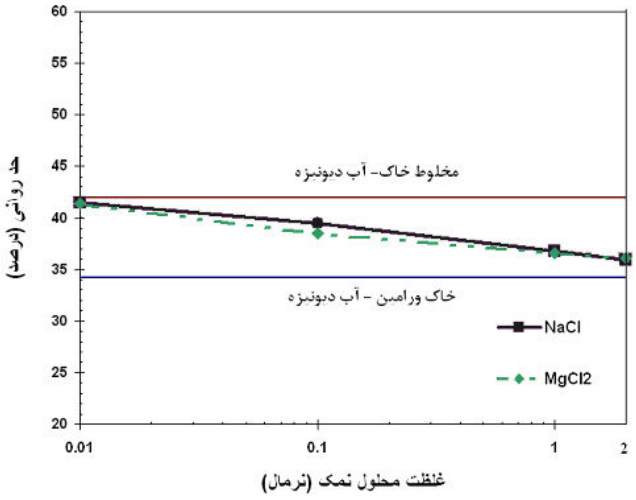
نتایج آزمایش حد روانی در شکل ۳ و ۴ آورده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.3.6]

افزودن بنتونیت باعث افزایش حد روانی مخلوط شده است. در قیاس مخلوط‌ها هنگامی که تحت تأثیر محلول نمک بوده‌اند، با هنگامی که تحت نفوذ آب دیونیزه قرار گرفتند، باید گفت که محلول‌های نمک باعث کاهش مقدار حد روانی مخلوط شده است. در مقایسه انواع محلول‌ها در چهار غلظت ۰/۰۱، ۰/۱ و۱ و۲ نرمال بر روی مخلوط خاک، ملاحظه می‌شود که نوع نمک، تأثیر زیادی بر روی حد روانی مخلوط خاک با ۱۰ درصد بنتونیت نداشته است ولی در مخلوط خاک ۲۰:۱۰۰، محلول نمک کلرید منیزیم موجب کاهش بیش‌تری در حد روانی شده است. دلیل آن وجود کاتیون‌های دوظرفیتی در محلول کلرید منیزیم است. بین حد روانی مخلوط خاک تحت تاثیر محلول با غلظت ۰/۰۱ نرمال و آب دیونیزه شده تفاوت عمده‌ای وجود ندارد. ولی با افزایش غلظت محلول به ۰/۱ نرمال، شیب خط حد روانی کاهش محسوسی دارد و حد روانی افت قابل توجهی پیدا می‌کند.

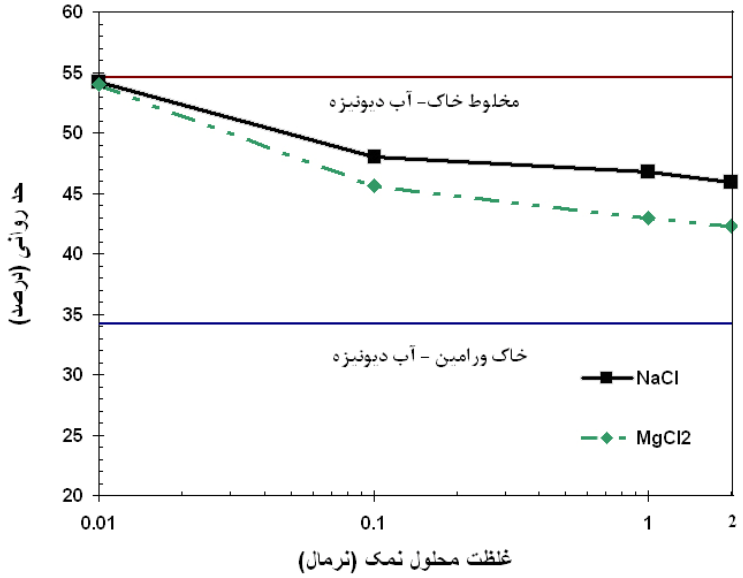
روندهای مشاهده شده با تئوری لایه آب دوگانه پخشیده مطابقت دارد. افزایش غلظت محلول نمک و همچنین ظرفیت کاتیونی باعث کاهش نیروی دافعه بین ذره‌ای می‌شود و در نتیجه ذرات در درصد رطوبت پایین‌تر، آزادانه‌تر حرکت می‌کنند و لذا حد روانی کاهش می‌یابد [۱۵].



شکل۳. تغییرات حد روانی مخلوط خاک۱۰:۱۰۰

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.3.6]



شکل۴. تغییرات حد روانی مخلوط خاک ۲۰:۱۰۰

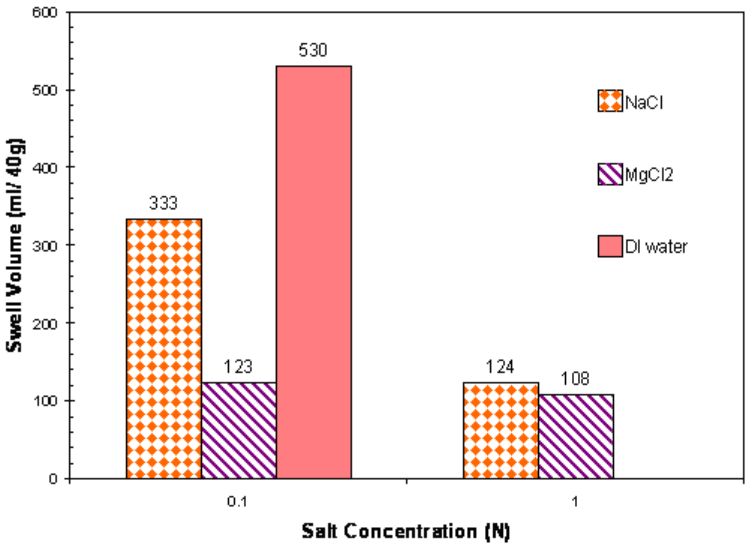
آزمایش تورم آزاد

شکل۵ نتایج آزمایش تورم آزاد را نشان می‌دهد. با قرارگرفتن بنتونیت در آب دیونیزه شده، بیش‌ترین تورم مشاهده شد (معادل ۵۳۰ میلی‌لیتر در۴۰ گرم بنتونیت). با قرارگرفتن بنتونیت در محلول‌های نمک از تورم آن کاسته شده است. این امر با افزایش غلظت محلول نمک به ۱ نرمال به وضوح دیده می‌شود. یعنی با افزایش غلظت محلول نمک، تورم بنتونیت کاهش یافته است. علت آن است که در این هنگام آب از ناحیه بین لایه‌ای به علت گرادیان انرژی آزادی که با افزایش غلظت در سیال منفذی ایجاد می‌شود، به بیرون رانده می‌شود [۱۶].

در محلول با غلظت ۰/۱ نرمال، تأثیر نوع نمک، یعنی نوع کاتیون به چشم می‌خورد به طوری‌که تورم بنتونیت در کلرید سدیم نسبت به کلرید منیزیم بیش‌تر بوده است. جدول۴ تغییرات pH نمونه‌های آزمایش را در ابتدا و انتهای آزمایش نشان می‌دهد. تفاوت چشم‌گیری بین pH نمونه‌ها در ابتدا و انتهای آزمایش وجود ندارد و با توجه به این‌که محلول‌ها خنثی و یا قلیایی بوده‌اند، تفاوت در میزان تورم به pH محیط بستگی نداشته است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.3.6]



شکل۵. حجم تورم یافته در آزمایش تورم آزاد

جدول ۴. تغییرات pH محلول‌های نمک در آزمایش تورم آزاد

نام نمک	غلظت (نرمال)	pH ابتدا	pH انتها
DI water	۰	۷/۴	۷/۰
NaCl	۰/۱	۷/۰	۶/۳
NaCl	۱	۷/۲	۶/۶
MgCl2	۰/۱	۷/۷	۷/۵
MgCl2	۱	۸/۶	۷/۷

آزمایش تحکیم

نتایج هدایت هیدرولیکی و قابلیت فشردگی مخلوط‌های خاک در ادامه آورده شده است.

هدایت هیدرولیکی

شکل‌های ۶ تا ۹ رابطه بین هدایت هیدرولیکی و نسبت تخلخل را برای دو محلول نمک کلرید سدیم و کلرید منیزیم در دو غلظت ۰/۱ و ۱ نرمال و آب دیونیزه شده نشان می‌دهد.

در تمامی نمودارها ملاحظه می‌شود که با کاهش نسبت تخلخل، هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد. این پدیده منطقی است چرا که با کاهش نسبت تخلخل، فضای حفره‌ای لازم برای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.3.6]

جریان سیال منفذی کم می‌شود همچنین ممکن است برای ذراتی که به صورت عمود بر جهت جریان قرار گرفته باشند، در ساختارشان جابه‌جایی رخ دهد و منجر به افزایش ضریب اعوجاج شود [۱۷].

تغییرات لگاریتم هدایت هیدرولیکی (log k) با نسبت تخلخل (e) تقریبا به صورت خطی است. مشاهدات مشابهی به‌وسیله پژوهش‌گران دیگر بیان شده است [۱۸] ، [۱۹] ، البته در این تحقیقات نمونه‌ها با آب تحت آزمایش قرار گرفته بودند.

به‌طور کلی، افزودن بنتونیت به خاک باعث کاهش نفوذپذیری آن می‌شود. مخلوط‌های با ۲۰ درصد بنتونیت، نسبت به مخلوط‌های با ۱۰ درصد بنتونیت، دارای نفوذپذیری کم‌تری هستند.

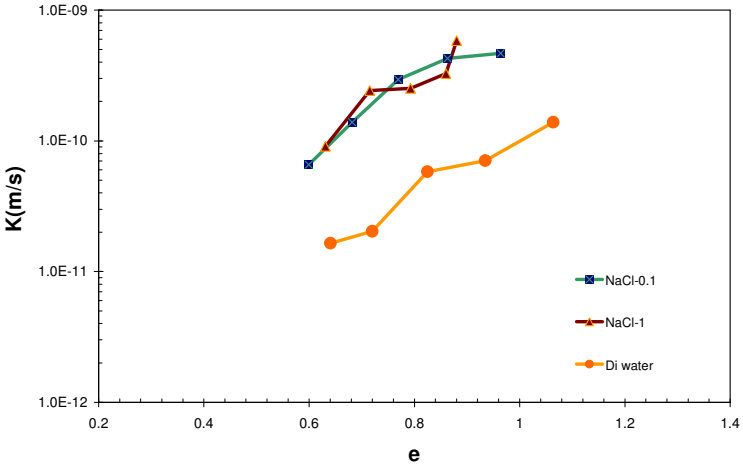
در تمامی آزمایش‌ها، وقتی‌که نمونه‌ها تحت نفوذ محلول نمک قرار می‌گیرند، نسبت به وقتی که تحت نفوذ آب دیونیزه هستند، نفوذپذیری‌شان افزایش می‌یابد. یعنی هدایت هیدرولیکی با افزایش غلظت الکترولیت در سیال منفذی، افزایش یافته است. این افزایش هدایت هیدرولیکی احتمالا به علت اثر غلظت محلول بر تخلخل مؤثر (فضای لازم برای جریان) است. دیکسون و همکاران (۱۹۸۵) پیشنهاد کردند که تخلخل مؤثر رس کم‌تر از کل فضای حفره‌ای در واحد حجم آن است چرا که قسمتی از فضای حفره‌ای با آب چسبیده یا جذب سطحی‌شده، که دارای لزجت بیش‌تری نسبت به آب آزاد است، اشغال شده است [۲۰]. تئوری لایه آب دوگانه پخشیده پیش‌بینی می‌کند که ضخامت لایه دوگانه با افزایش غلظت الکترولیت در محلول کاهش می‌یابد، در نتیجه در یک درصد تخلخل مشخص، تخلخل مؤثر رس با افزایش غلظت محلول افزایش می‌یابد.

در مقایسه بین نمک کلرید سدیم و کلرید منیزیم باید گفت هدایت هیدرولیکی با استفاده از کلرید منیزیم بیش‌تر افزایش پیدا کرده است که این پدیده در مخلوط ۱۰۰:۲۰ بیش‌تر قابل ملاحظه است. علت آن احتمالاً تورم کم‌تر و فولوکه شدن بنتونیت در مخلوط است.

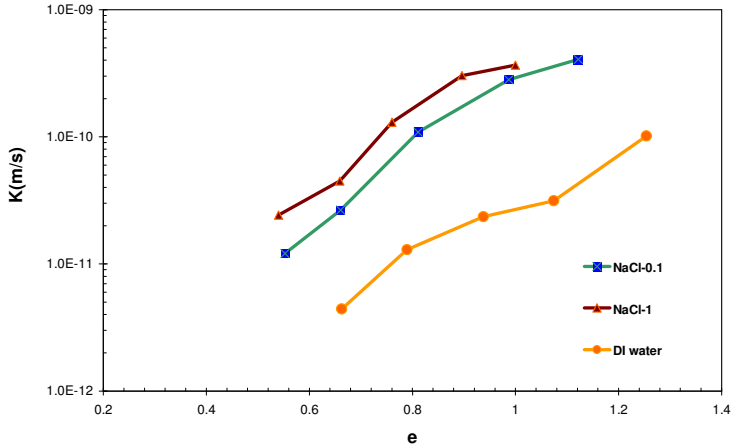
pH فقط زمانی که کم‌تر از ۲ و یا بیش‌تر از ۱۲ باشد، بر روی هدایت هیدرولیکی اثر می‌گذارد ([۲۱] و [۷]). pH محلول‌های نمک در این آزمایش‌ها در همین محدوده بوده است

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.3.6]



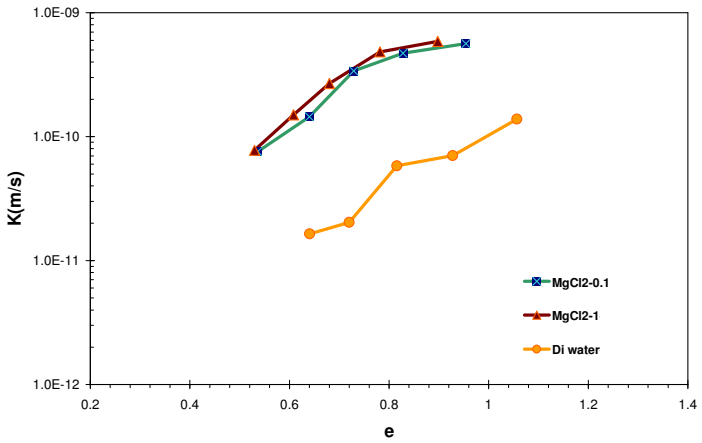
شکل۶. تغییرات هدایت هیدرولیکی در مقابل نسبت تخلخل برای محلول **NaCl** در مخلوط‌های ۱۰۰:۱۰



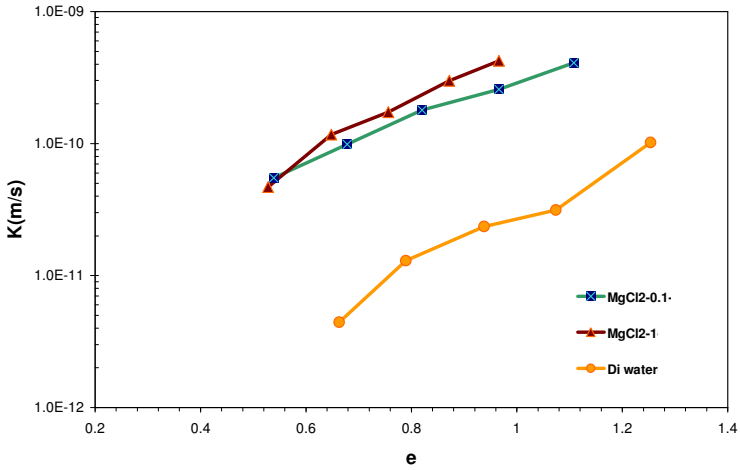
شکل۷. تغییرات هدایت هیدرولیکی در مقابل نسبت تخلخل برای محلول **NaCl** در مخلوط‌های ۱۰۰:۲۰

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.3.6]



شکل۸. تغییرات هدایت هیدرولیکی در مقابل نسبت تخلخل برای محلول $MgCl_2$ در مخلوط های ۱۰:۱۰۰



شکل۹. تغییرات هدایت هیدرولیکی در مقابل نسبت تخلخل برای محلول $MgCl_2$ در مخلوط های ۲۰:۱۰۰

تغییرات فشردگی

فشردگی خاک‌های ریزدانه نه تنها به مشخصات مکانیکی کانی‌های رسی وابسته است، بلکه به مشخصات فیزیکی-شیمیایی سیال مانند غلظت نمک و ظرفیت کاتیون نیـز بسـتگی دارد [۲۲].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.3.6]

جدول ۵ و ۶ تغییرات نشانهٔ فشردگی مخلوط‌ها را نشان می‌دهد. فشردگی بـه نـوع کـاتیون و غلظت آن‌ها وابسته است. اعداد جدول نشان می‌دهد که با افزایش درصد بنتونیت در مخلـوط خاک، قابلیت فشردگی افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که محلول‌های نمک در مقایسه بـا آب باعث کاهش نشانه فشردگی شده و همچنین افزایش درصد بنتونیت مخلوط باعث افزایش نشانهٔ فشردگی می‌شود.

میشرا و همکاران (۲۰۰۵) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند[۱۶].

جدول ۵. نشانه فشردگی (Cc) برای مخلوط خاک ۲۰:۱۰۰ و محلول‌های نمک

نشانه فشردگی (Cc)		
$MgCl_2$	NaCl	غلظت نمک
۰/۲۲۰	۰/۲۲۰	۰
۰/۲۱۱	۰/۲۱۶	۰/۱
۰/۱۰۲	۰/۱۶۴	۱

جدول۶. نشانه فشردگی (Cc) برای مخلوط خاک ۱۰:۱۰۰ و محلول‌های نمک

نشانه فشردگی (Cc)		
$MgCl_2$	NaCl	غلظت نمک
۰/۱۵۵	۰/۱۵۵	۰
۰/۰۸۲	۰/۱۳۸	۰/۱
۰/۰۸۱	۰/۱۲۷	۱

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این پژوهش به‌منظور بررسی اثر محلول های کلرید سدیم و کلرید منیزیم بر برخی مشخصات مخلوط خاک- بنتونیت، به‌عنوان پوشش کف مراکز دفن، انجام شده است. از این تحقیق نتایج زیر به‌دست آمد:

- افزودن بنتونیت به خاک ورامین موجب افزایش حد روانی آن شد. لیکن تحت تأثیر محلول‌های نمک، حدروانی خاک کاهش یافت.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.3.6]

- در آزمایش تورم آزاد، بنتونیت قرار گرفته در آب دیونیزه شده بیشترین تورم را داشته است. با قرار گرفتن بنتونیت در محلول‌های نمک از تورم آن کاسته شده است. در محلول‌های نمک با غلظت ۱ نرمال نسبت به غلظت ۰/۱ نرمال، تورم بنتونیت کاهش بیش‌تری نشان داده است.
- نفوذپذیری نمونه‌ها تحت تأثیر محلول نمک افزایش یافته است. افزایش ظرفیت کاتیون موجب افزایش هدایت هیدرولیکی شده است.
- با افزایش میزان بنتونیت در مخلوط خاک، فشردگی آن افزایش می‌یابد. نوع نمک و میزان غلظت محلول‌های نمک بر روی فشردگی خاک مؤثر است.

منابع

1. Daniel, D.E. Geotechnical Practice for Waste Disposal, Chapman and Hall, New York (1993).
2. Mesri, G. and Olson, R.E. 'Mechanisms Controlling the Permeability of Clays', Clays and Clay Minerals, 19, (1971) 151-158.
3. Young, N.,R., Mohamed, A.M.O. and Warkentin, B.P. Principles of Contaminant Transport in Soils, New York (1992).
4. Gleason, M., Daniel, D.E. and Eydholt, G.R. 'Calcium and Sodium Bentonite for Hydraulic Containment Applications', J. of Geotech. and Geoenv. Eng. ASCE, 123:5, (1997) 438-445.
5. Stern, R.,T. and Shackelford, C.D. 'Permeation of Sand-Processed Clay Mixtures with Calcium Chloride Solutions', J. of Geotech. and Geoenv. Eng. ASCE, 124:3, (1998) 231-241.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.3.6]

6. Alawaji, H.A. 'Swell and Compressibility Characteristics of Sand-Bentonite Mixtures Inundated with Liquids', Applied Clay Sci., 15, (1999) 411-430.

7. Shackelford, C.D., Benson, C.H., Katsumi, T., Edil, T.B. and Lin, L. 'Evaluation of the Hydraulic Conductivity of GCLs Permeated with Non-standard Liquids', Geotex. Geomembr., 18:2-4, (2000) 133-161.

8. Jo, H.Y, Katsumi, T., Benson, C.H. and Edil, T.B. 'Hydraulic Conductivity and Swelling of Nonprehyrated GCLs Permeated with Single-species Salt Solutions', J. of Geotech. and Geoenv. Eng. ASCE, 127:7, (2001) 557-567.

9. Shan, H-Y, and Lai, Y.J. 'Effect of Hydrating Liquid on the Hydraulic Properties of Geosynthetic Clay Liners', Geotext. Geomembr. , 20:1, (2002) 19-38.

10. Schmitz, R.M. and van Paassen, L.A. 'The Decay of the Liquid Limit of Clays with Increasing Salt Concentration', Dutch association of Eng. Geology, Delft, Ingeokring Newsletter, 9:1, (2003)10-14.

11. Ohtsubo, M., Kumar, M.,A., and Li, L. 'Effect of Salt Solutions on the Permeability of the Mixtures of Soil and Bentonite', 5th ICEG Env. Geotech, Thomas Telford (2006).

12. Singh S., and Prasad, A. 'Effects of Chemicals on Compacted Clay Liner', The electronic journal of geotechnical engineering (EJGE), 12, Bund. D (2007).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.3.6]

13. Roberts, A.A. and Shimaoka, T. 'Analytical Study on the Suitability of Using Bentonite Coated Gravel as a Landfill Liner Material', Waste Mng., 28, (2008) 2635-2644.

14. Studds, P.G., Stewart, D.I. and Cousen, T.W. 'The Effect of Salt Solutions on the Properties on Bentonite-Sand Mixtures', Clay Minerals, 33, (1998) 651-660.

15. Warkentin, B.P. 'Interpretation of the Upper Plastic Limit of Clays', Nature, 190, (1961) 287-288.

16. Mishra, A.K., Ohtsubo, M., Li, L. and Higashi, T. 'Effect of Salt Concentrations on the Permeability and Compressibility of Soil-Bentonite Mixtures', J. Fac. Agr., 50:2, (2005) 837-849.

17. Quigley, R.M. and Thompson, C.D. The Fabric of Anisotropically Consolidated Sensitive Marine Clay', Can. Geotech. J., 3:2, (1996) 61-73.

18. Olson, R.E. and Daniel, D.E. 'Measurement of Hydraulic Conductivity of Fine Grained Soils', In Permeability and Groundwater Contaminant Transport. American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication STP 746, (1981) 18-60.

19. Pandian, N.S., Nagaraj, T.S. and Narasimha Raju, P.S.R. 'Permeability and Compressibility Behaviour of Bentonite-Sand/Soil Mixes', Geotech. Testing J., 18:1, (1995) 86-93.

20. Dixon, D.A., Gray, M.N., Thomas, A.W., 'A study of the Compaction Properties of Potential Clay-Sand Buffer Mixtures for Use in Nuclear Fuel Waste Disposal', Eng. Geology 21, (1985) 247-255.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.3.6]

21. Ruhl, J.L., and Daniel, D.E. 'Geosynthetic Clay Liners Permeated with Chemical Solutions and Leachate', J. of Geotech. And Geoenv. Eng. ASCE, 123:4, (1997) 369-381.

22. Bolt, G.H. 'Physico-Chemical Analysis of the Compressibility of Pure Clays', Geotechnique, 6:1, (1956) 86-93.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.3.6]