

## اثر محلول نمک بر مشخصات لایه پوششی مراکز دفن مواد زائد

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

صنعت ایران

shariatmadari@iust.ac.ir

پذیرش ۸۹/۳/۲۹

تاریخ: دریافت ۸۸/۲/۲۷

### 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  $\text{NaCl}$  و  $\text{MgCl}_2$  در چندین غلظت بر روی مشخصات مخلوط خاک محل - بنتونیت در دو نسبت ۱۰۰:۱۰ و ۱۰۰:۲۰ (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 دو ظرفیتی 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.

### 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 در کف 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 بتونیت به‌عنوان پوشش کف مناسب است. مونت‌موریلونیت کانی اصلی موجود در بتونیت است که باعث کاهش نفوذپذیری پوشش کف می‌شود. تورم بین لایه‌ای و لایه آب هیگروسکوپی چسبیده به مونت‌موریلونیت باعث کاهش نفوذپذیری بتونیت 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 - بتونیت به‌عنوان پوشش کف مراکز دفن زباله است. نمک‌های استفاده شده شامل دو نمک  $\text{NaCl}$  و  $\text{MgCl}_2$  در دو غلظت ۰/۱ نرمال و ۱ نرمال است. مشخصات مورد بررسی حد روانی مخلوط، تورم آزاد بتونیت و هدایت هیدرولیکی با استفاده از دستگاه تحکیم یک بعدی است.

### مروری بر پژوهش‌های گذشته

پژوهش‌های بسیاری بر روی بررسی اثر مواد مختلف بر روی مشخصات خاک به خصوص بتونیت خالص انجام شده است. در سال ۱۹۷۱ مصری و السون<sup>۱</sup> 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 کلرید سدیم باعث افزایش هدایت هیدرولیکی در نوعی خاک طبیعی شد. علت این بود که افزایش غلظت کاتیون‌های سدیم در لایه دوگانه باعث کاهش نیروهای رانش بین ذرات گردیده که در نهایت نفوذپذیری افزایش یافت [۳].

در ادامه در سال ۱۹۹۷، گلیسون و همکاران<sup>۲</sup> نشان دادند که جذب آب به وسیله دو نوع بتونیت یعنی بتونیت-کلسیم و بتونیت-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<sup>۳</sup> مخلوط‌هایی از ماسه و بتونیت تهیه کردند و تحت نفوذ محلول کلرید کلسیم قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که هدایت هیدرولیکی مخلوط‌های ماسه و بتونیت، 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<sup>۴</sup> به بررسی رفتار خاک‌های متورم شونده پرداخت. وی به بررسی اثر نمک‌های  $\text{NaNO}_3$  و  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  در غلظت‌های ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۴ نرمال بر روی رفتار مخلوط ماسه و ۲۰ درصد بتونیت پرداخت. نتایج به دست آمده چنین بود: کلیه نمک‌ها در کلیه غلظت‌ها به طور محسوسی باعث کاهش حدود آتربرگ بتونیت شدند. با افزایش غلظت نمک، حد روانی و اندیس پلاستیسته کاهش یافت به طوری که در غلظت حدود ۱ نرمال به کم‌ترین مقدار خود

<sup>1</sup> Mesri and Olson

<sup>2</sup> Gleason et al.

<sup>3</sup> Stern and Shackelfrod

<sup>4</sup> Alawaji

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

شکلفورد و همکاران (۲۰۰۰)، جو و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۰۱) و شان و لای<sup>۶</sup> (۲۰۰۲) بیان کردند که با افزایش تورم آزاد بتونیت، هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد [۷]، [۸]، [۹]. در سال ۲۰۰۳ اشمیتز و پاسان<sup>۷</sup> با بررسی اثر محلول‌های نمک بر روی چند رس نشان دادند اثر محلول نمک بر روی مشخصات رسی‌هایی که دارای مقادیر بیش‌تر اسمکتیت هستند، قابل ملاحظه‌تر است [۱۰]. در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۶، اوهتسوبو و همکاران<sup>۸</sup> به بررسی اثر محلول نمک بر روی مشخصات ترکیب خاک بازالتی و ۱۰ درصد بتونیت و ترکیب خاک بازالتی و ۲۰ درصد بتونیت 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 تقریباً یک‌سان بود ولی با افزایش غلظت یون‌ها در محلول نمک، به طور محسوسی کاهش یافت [۱۱]. سینگ و پاراساد<sup>۹</sup> در سال ۲۰۰۷، برای ملاحظه اثر مواد شیمیایی آلی و غیرآلی بر روی خاک بتونیت، از دو ماده که عموماً در مراکز دفن زباله یافت می‌شود، 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 بتونیت 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<sup>۱۰</sup> به بررسی امکان استفاده از شن پوشیده شده با بتونیت به عنوان پوشش کف مرکز دفن پرداختند. آن‌ها نشان دادند هنگامی که از انرژی تراکم برای تراکم کردن نمونه‌ها به میزان مناسبی استفاده شود، هدایت هیدرولیکی به طور چشم‌گیری پایین خواهد بود ( $6 \times 10^{-10}$  سانتی‌متر بر ثانیه) [۱۳].

<sup>5</sup> Jo et al.

<sup>6</sup> Shan and Lai

<sup>7</sup> Schmitz and Paassen

<sup>8</sup> Ohtsubo et al.

<sup>9</sup> Sing and Parasad

<sup>10</sup> Roberts and Shimaoka

اثر محلول نمک بر مشخصات لایه پوششی مراکز دفن مواد زائد

در این پژوهش به بررسی اثر  $\text{NaCl}$  و  $\text{MgCl}_2$  بر روی مشخصات مخلوط خاک-بتونیت پرداخته شده است.

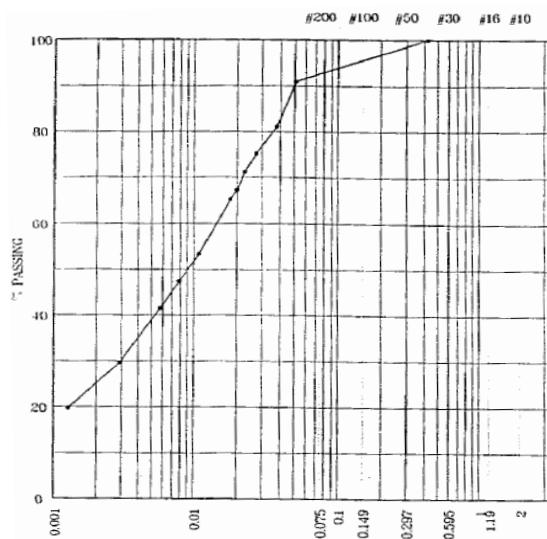
### مواد و روش‌ها

خاک استفاده شده در این تحقیق، مخلوطی از خاک رس از منطقه خاتون‌آباد ورامین و خاک بتونیت است. بتونیت به کار رفته در آزمایش‌ها، بتونیت حفاری ساخت شرکت باریت فلات ایران بوده است. برخی از مشخصات خاک‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات خاک ورامین و بتونیت

مشخصات	رس ورامین	بتونیت
Gs	۲/۶۷	۲/۵۳
حد روانی (%)	۳۴/۲۰	۱۹۹/۴
شاخص خمیری (%)	۱۳/۶۶	۱۵۷/۹
OMC(%)-MDD( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	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.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک ورامین

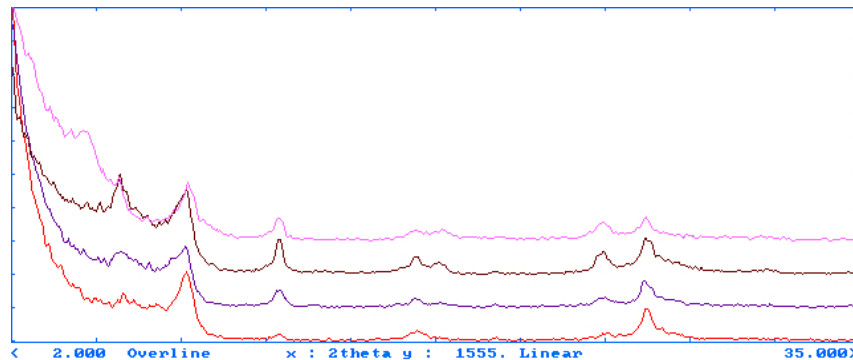
برای بررسی کانی‌های رس ورامین از دستگاه دیفرکتوگرام مدل D5000 ساخت کارخانه زیمنس آلمان (لامپ مسی با طول موج ۱/۵۴۰۹ آنگستروم استفاده شد. شکل ۲ نمودار XRD کانی‌های رسی خاک ورامین را نشان می‌دهد نتیجه آزمایش نشان می‌دهد که کانی قالب اولیه تشکیل‌دهنده‌ی خاک رس ورامین ایلیت است، پس از آن اسمکتیت و کلریت است. برای بررسی عناصر تشکیل‌دهنده، خاک رس ورامین به روش XRF تجزیه شد. این دستگاه قابلیت تولید اشعه ایکس با انرژی و طول موج معین را دارد. چنانچه ماده‌ای تحت تابش مداوم اشعه ایکس قرار گیرد، اتم‌های تشکیل‌دهنده ماده اشعه 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 محدوده مشخصی از طول موج قرار می‌گیرد. نتایج آنالیز XRF خاک ورامین در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. تجزیه شیمیایی خاک رس ورامین

درصد	مواد تشکیل‌دهنده خاک
۵۴/۱	سیلیس $\text{SiO}_2$
۶/۹	اکسید آهن $\text{Fe}_2\text{O}_3$
۱/۴	اکسید آهن $\text{Fe}_3\text{O}_4$
۱۵/۲	اکسید آلومینیوم $\text{Al}_2\text{O}_3$
۳/۲	اکسید منیزیم $\text{MgO}$
۱/۱۵	اکسید کلسیم $\text{CaO}$
۱/۰۳	اکسید سدیم $\text{Na}_2\text{O}$
۲/۸	اکسید پتاسیم $\text{K}_2\text{O}$
۰/۱۷	سولفات $\text{SO}_3$
۰/۰۳	کلر $\text{Cl}$
۲/۸	سنگ آهک $\text{CaCO}_3$
۱۱/۱	افت حرارتی در ۱۰۰۰

محلول‌های استفاده شده به‌عنوان سیال منفذی شامل آب دیونیزه شده و محلول‌های نمک  $\text{NaCl}$  و  $\text{MgCl}_2$  است. نمک‌ها از شرکت ایران‌میریک تهیه شده‌اند. مشخصات نمک در

جدول ۳ ملاحظه می شود.



شکل ۲. نمودار XRD خاک ورامین

جدول ۳. مشخصات محلول‌ها

چگالی* g/cm <sup>3</sup>	جرم مولکولی g/mol	فرمول شیمیایی	نام نمک
۱/۰۳۸۷	۵۸/۴۴	NaCl	کلرید سدیم
۱/۰۳۵۸	۲۰۳/۳۰	MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	کلرید منیزیم

\* برای غلظت ۱ نرمال در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد

## آزمایش‌ها

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

### آزمایش حد روانی

تعیین حد روانی نمونه‌های خاک ورامین و بتونیت، همچنین مخلوط این دو خاک، در درصدهای وزنی ۹۰ درصد خاک ورامین و ۱۰ درصد بتونیت (۱۰:۱۰۰) و ۸۰ درصد خاک ورامین و ۲۰ درصد بتونیت (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 ۱N، ۰/۱N، ۰/۰۱N و ۲N تهیه شد و حد روانی خاک با استفاده از آن‌ها تعیین شد.

### آزمایش تورم آزاد

آزمایش تورم آزاد مطابق استاندارد ASTM D5890 انجام گرفت. این آزمایش بر روی بتونیت اجرا شد. محلول‌های استفاده شده شامل نمک‌های کلرید سدیم و کلرید منیزیم در دو غلظت ۰/۱ N و ۱ N بود. برای کاهش اثر اصطکاک بین بتونیت و دیواره استوانه مدرج، تغییراتی در این آزمایش صورت گرفت [۱۳]. نحوه انجام آزمایش چنین بود: ابتدا بتونیت در گرمکن در دمای  $5 \pm 10.5$  درجه 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 بتونیت، در مقادیر ۲ گرمی، هر بار در ۱۰ دقیقه در استوانه ریخته شد. پس از این که آخرین مقدار بتونیت (۲ گرم آخر) ریخته شد، دیواره استوانه با دقت با محلول نمک مورد نظر شسته شد و به حجم ۲۰۰۰ میلی‌لیتر 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 بتونیت 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 ۰/۱N و ۱N 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 به دست آمده از طریق آزمایش تحکیم قابل مقایسه با مقادیر هدایت هیدرولیکی اولیه به دست آمده از آزمایش اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی از طریق مستقیم است [۱۴].

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. تهیه 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 به دست 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. نمونه 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  $\gamma_w$  وزن مخصوص سیال منفذی است.

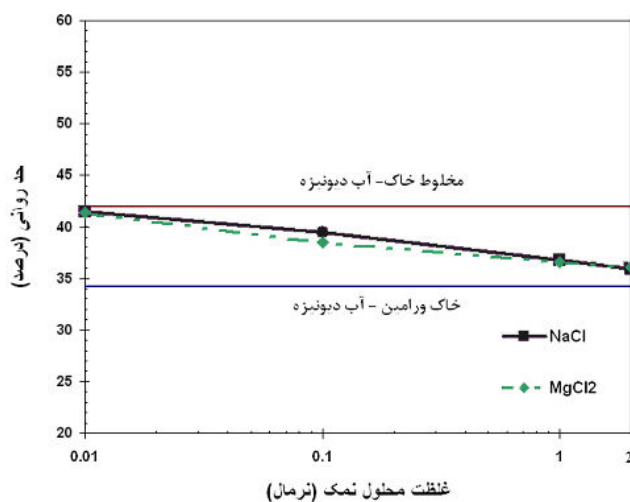
## نتایج و بحث

### آزمایش حد روانی

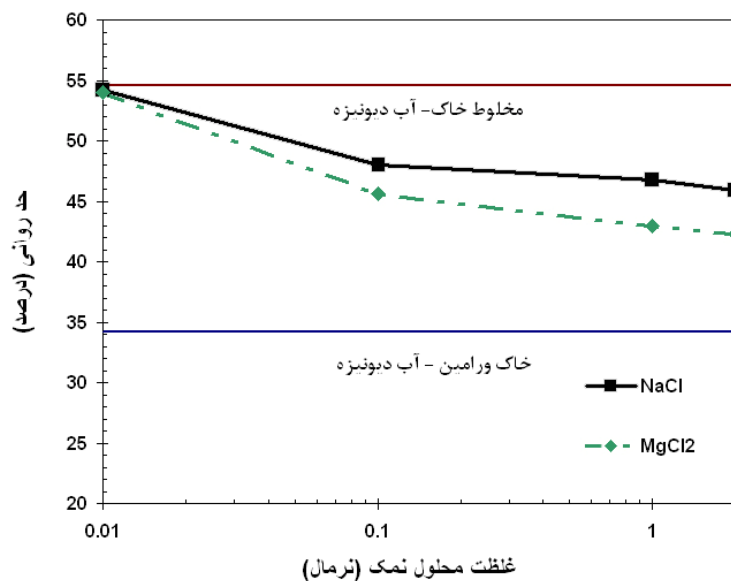
نتایج آزمایش حد روانی در شکل ۳ و ۴ آورده شده است.

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 و ۱ و ۲ 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 ۱۰۰:۲۰، محلول نمک کلرید منیزیم موجب کاهش بیش‌تری در حد روانی شده است. دلیل آن وجود کاتیون‌های دو ظرفیتی در محلول کلرید منیزیم است. بین حد روانی مخلوط خاک تحت تأثیر 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].



شکل ۳. تغییرات حد روانی مخلوط خاک ۱۰:۱۰

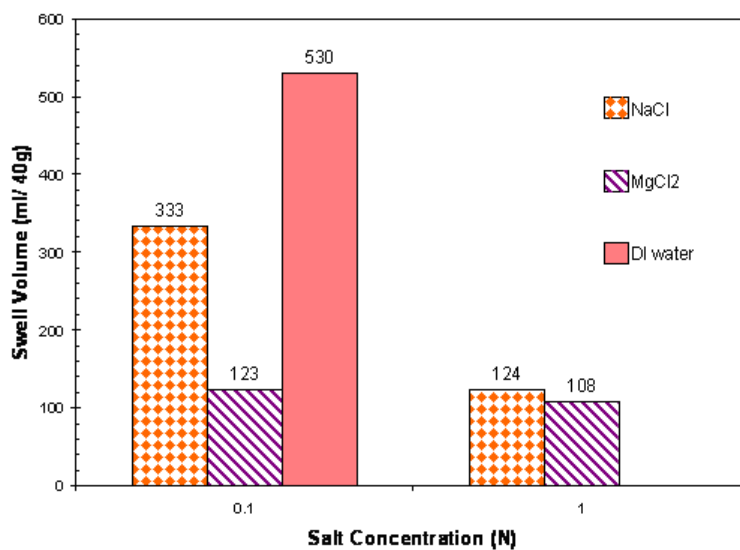


شکل ۴. تغییرات حد روانی مخلوط خاک ۱۰۰:۲۰

#### آزمایش تورم آزاد

شکل ۵ نتایج آزمایش تورم آزاد را نشان می‌دهد. با قرار گرفتن بنتونیت در آب دیونیزه شده، بیش‌ترین تورم مشاهده شد (معادل ۵۳۰ میلی‌لیتر در ۴۰ گرم بنتونیت). با قرار گرفتن 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 طوری که تورم بنتونیت در کلرید سدیم نسبت به کلرید منیزیم بیش‌تر بوده است. جدول ۴ 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 این که محلول‌ها خنثی و یا قلیایی بوده‌اند، تفاوت در میزان تورم به pH محیط بستگی نداشته است.



شکل ۵. 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

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].

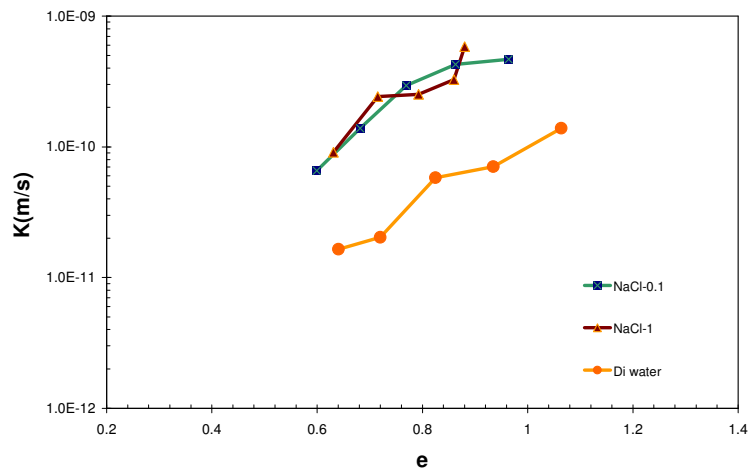
تغییرات لگاریتم هدایت هیدرولیکی ( $\log k$ ) با نسبت تخلخل ( $e$ ) تقریباً به صورت خطی است. مشاهدات مشابهی به وسیله پژوهش‌گران دیگر بیان شده است [۱۸]، [۱۹]، البته در این تحقیقات نمونه‌ها با آب تحت آزمایش قرار گرفته بودند.

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.

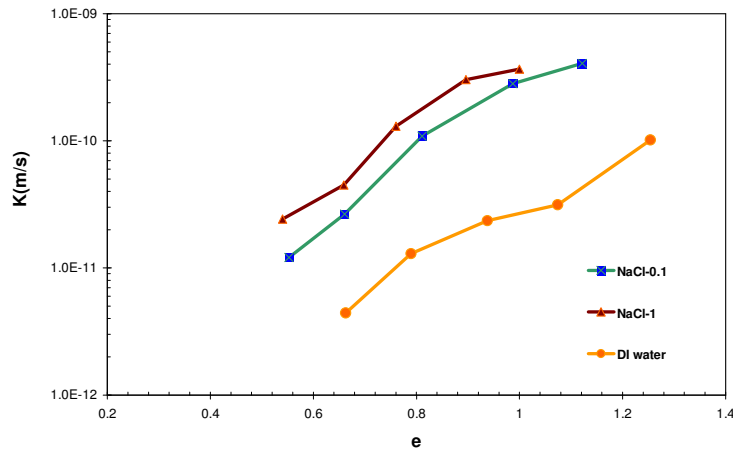
در تمامی آزمایش‌ها، وقتی که نمونه‌ها تحت نفوذ محلول نمک قرار می‌گیرند، نسبت به وقتی که تحت نفوذ آب دیونیزه هستند، نفوذپذیری‌شان افزایش می‌یابد. یعنی هدایت هیدرولیکی با افزایش غلظت الکترولیت در سیال منفذی، افزایش یافته است. این افزایش هدایت هیدرولیکی احتمالاً به علت اثر غلظت محلول بر تخلخل مؤثر (فضای 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 سطحی شده، 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 ۲۰:۱۰۰ بیش‌تر قابل ملاحظه است. علت آن احتمالاً تورم کم‌تر و فولوک‌شدن بنتونیت در مخلوط است.

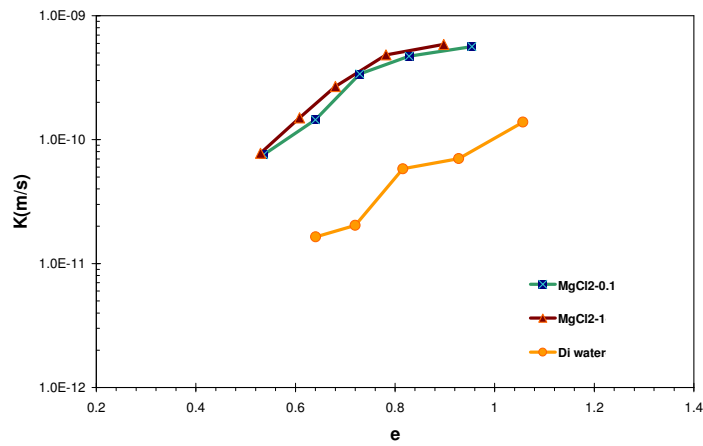
pH فقط زمانی که کم‌تر از ۲ و یا بیش‌تر از ۱۲ باشد، بر روی هدایت هیدرولیکی اثر می‌گذارد [۲۱] و [۷]. pH محلول‌های نمک در این آزمایش‌ها در همین محدوده بوده است



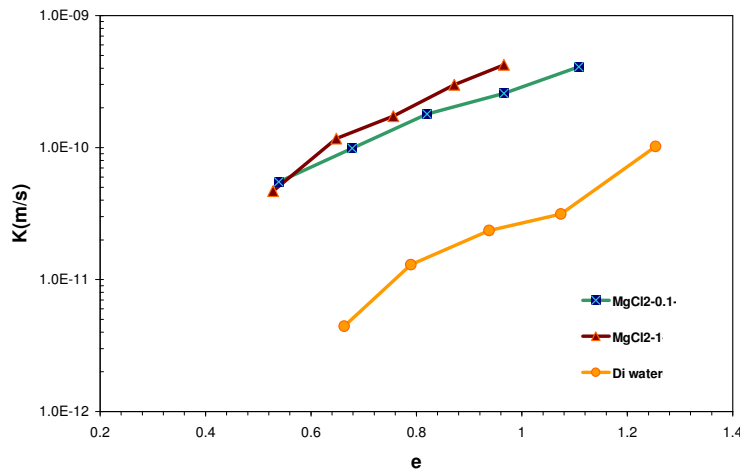
شکل ۶. تغییرات هدایت هیدرولیکی در مقابل نسبت تخلخل برای محلول NaCl در مخلوط‌های ۱۰۰:۱۰



شکل ۷. تغییرات هدایت هیدرولیکی در مقابل نسبت تخلخل برای محلول NaCl در مخلوط‌های ۱۰۰:۲۰



شکل ۸. تغییرات هدایت هیدرولیکی در مقابل نسبت تخلخل برای محلول  $MgCl_2$  در مخلوط های ۱۰۰:۱۰



شکل ۹. تغییرات هدایت هیدرولیکی در مقابل نسبت تخلخل برای محلول  $MgCl_2$  در مخلوط های ۱۰۰:۲۰

### تغییرات فشردگی

فشردگی خاک های ریزدانه نه تنها به مشخصات مکانیکی کانی های رسی وابسته است، بلکه به مشخصات فیزیکی-شیمیایی سیال مانند غلظت نمک و ظرفیت کاتیون نیز بستگی دارد [۲۲].

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

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

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

نشانه فشردگی (Cc)		
غلظت نمک	NaCl	MgCl <sub>2</sub>
۰	۰/۲۲۰	۰/۲۲۰
۰/۱	۰/۲۱۶	۰/۲۱۱
۱	۰/۱۶۴	۰/۱۰۲

جدول ۶. نشانه فشردگی (Cc) برای مخلوط خاک ۱۰۰:۱۰ و محلول‌های نمک

نشانه فشردگی (Cc)		
غلظت نمک	NaCl	MgCl <sub>2</sub>
۰	۰/۱۵۵	۰/۱۵۵
۰/۱	۰/۱۳۸	۰/۰۸۲
۱	۰/۱۲۷	۰/۰۸۱

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این پژوهش به منظور بررسی اثر محلول‌های 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.

- 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.

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 Nonprehydrated 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', 5<sup>th</sup> 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).

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.

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.