تأثیر نمک سدیم کلرید بر تورم، تراکم‌پذیری و نفوذپذیری بنتونیت

نادر شریعتمداری*، محمد مهدی یزدان‌پناه؛
دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی عمران، گروه خاک وپی
سعید سعیدی‌جم؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان، گروه خاک وپی

تاریخ: دریافت ۹۱/۱۱/۲۳ **پذیرش** ۹۲/۸/۵

چکیده

نمک موجود در آب دریا، گنبدهای نمکی یا شیرابهٔ پسماندهای شهری می‌تواند بر پارامترهای هیدرو-مکانیکی بنتونیت به‌عنوان مصالح آب‌بند در مراکز دفن پسماندهای هسته‌ای و روکش لندفیل‌ها تأثیر بگذارد. این گزارش به بررسی تأثیر نمک سدیم‌کلرید روی حدود اتربرگ، تورم، تحکیم و نفوذپذیری بنتونیت می‌پردازد. آزمایش تورم و تحکیم روی نمونه‌ها، با دستگاه ادئومتر موجود در دانشگاه علم و صنعت ایران برای محلول سدیم‌کلرید با غلظت‌های صفر، ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵ و ۲ مولار صورت گرفته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، افزایش اندک غلظت نمک محلول نیز موجب کاهش پتانسیل تورم بنتونیت به‌میزان چشم‌گیری خواهد شد، به‌طوری‌که تورم بنتونیت با افزایش غلظت از آب خالص تا محلول سدیم‌کلرید با غلظت ۲ مولار از حدود ۸۲ درصد به حدود ۱/۵ درصد کاهش می‌یابد. حد روانی و پتانسیل خمیری بنتونیت نیز با افزایش غلظت محلول کاهش می‌یابد اما حد خمیری بنتونیت تغییر چشم‌گیری نمی‌کند. زمان به تعادل رسیدن تورم و تحکیم نمونه‌ها با توجه به افزایش نفوذپذیری با افزایش غلظت محلول کاهش می‌یابد. نفوذپذیری بنتونیت در مرحلهٔ تورم با افزایش غلظت محلول از آب خالص تا محلول ۲ مولار حدوداً ۷ برابر افزایش می‌یابد. تراکم‌پذیری نمونه‌ها نیز با افزایش غلظت نمک محلول کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: نمک سدیم کلرید، بنتونیت، تورم، تحکیم، نفوذپذیری

* **نویسنده مسئول** Shariatmadari@iust.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.3.3]

مقدمه

بنتونیت نوعی رس با خاصیت پلاستیک بالا است که از تغییر خاکسترهای آتشفشانی به وجود می‌آید. کانی غالب در بنتونیت، مونت موریلونیت است. بعضی از مشخصات بنتونیت مانند نفوذپذیری کم و قابلیت تورم زیاد برای استفاده به‌عنوان بافر[۱] و عضو آب‌بند[۲] در مراکز دفن پسماند (به‌خصوص پسماند هسته‌ای) یا پوشش لندفیل بسیار مناسب است. بنتونیت در مراکز دفن پسماند هسته‌ای و شهری عمدتاً به‌صورت ترکیب با خاک‌های دانه‌ای مانند ماسه و خرده سنگ استفاده می‌شود. به‌طورکلی خاک‌های رسی مانند بنتونیت به‌عنوان اصلی‌ترین گزینه برای آب‌بندی مراکز دفن به‌حساب می‌روند و هم‌اکنون در بسیاری از کشورهای جهان از این خاک به‌عنوان مصالح آب‌بند در شرایط محیطی مختلف استفاده می‌شود. از آن‌جاکه بنتونیت متراکم نفوذپذیری کمی دارد انتظار می‌رود که انتقال مواد رادیواکتیو[۳] ناشی از نشت احتمالی از مراکز دفن پسماند هسته‌ای و نشت شیرابه از لندفیل‌ها به میزان چشم‌گیری کاهش یابد. علاوه بر این ظرفیت تبادل کاتیونی[۴] (CEC) زیاد بنتونیت موجب جذب یون‌های رادیواکتیو می‌شود که این عامل انتقال مواد رادیواکتیو را مجدداً کاهش می‌دهد. نکتهٔ قابل‌توجه در مورد بنتونیت، ریزدانه بودن این خاک و وابسته بودن تغییرات آن به کانی‌ها و ساختارهای شیمیایی تشکیل‌دهندهٔ آن است. مشخص است که رفتار هیدرولیکی و مکانیکی خاک‌های رسی می‌تواند به‌شدت تحت تأثیر شرایط شیمیایی محیط قرار گیرد. در مواردی مانند قرینطه کردن پسماندهای پرخطر هسته‌ای، صنعتی و معدنی، این تغییرات می‌تواند به‌طور چشم‌گیری امنیت مراکز دفن و در نتیجه محیط اطراف را به‌خطر بیاندازد. به‌عنوان یک موضوع، تحلیل تأثیر نمک روی مشخصات هیدرو- مکانیکی مراکز دفن اهمیت دارد. علت آن هم احتمال نشت آب دریا به مراکز دفن (مراکز دفن پسماند هسته‌ای نزدیک دریا) یا ساخت مراکز دفن در گنبدهای نمکی است. هم‌چنین یون سدیم و کلسیم به‌میزان چشم‌گیری نسبت به سایر کاتیون‌ها در پسماندهایی مانند پسماندهای شهری موجود است [۱]. شکل ۱ تصویری از یک مرکز دفن پسماند هسته‌ای در گنبد نمکی را نشان می‌دهد. بنتونیت و ترکیب آن با ماسه مناسب‌ترین مصالح دارای خاصیت بافری در مراکز دفن هستند. [۲]، بنا بر این به‌عنوان یک مادهٔ بافر، خاصیت حفظ یک‌پارچگی خود در برابر حملات شیمیایی و در برابر آب شور را دارد [۳]. از آن‌جا که بنتونیت و ترکیبات

Buffer Sealing Material Radioactive C*ation Exchange Capacity*

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.3.3]

آن با مصالح دانه‌ای به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مصالح آب‌بند در مراکز دفن شناخته شده‌اند بررسی تأثیر نمک‌های مختلف روی پارامترهای آن حایز اهمیت است. کاربرد زیاد این مصالح در شرایط محیطی مختلف از جمله در مجاورت آب شور موجب تحقیقات گستردهٔ محققان در این زمینه شده است. برای نمونه می‌توان به تحقیقات الاواجی [٤] با بررسی تأثیر نمک‌های سدیم نیترات و کلسیم نیترات روی حدود اتربرگ، تورم و تحکیم دو نوع ماسه- بنتونیت[۱]، کاستلانوس و همکاران [٥] با بررسی تأثیر نمک سدیم‌کلرید بر تورم، تراکم‌پذیری و نفوذپذیری بنتونیت فی‌بیکس[۲]، میشرا و همکاران [٦] با بررسی تأثیر نمک‌های کلسیم کلرید و سدیم کلرید روی تورم، تراکم پذیری، حدود اتربرگ و نفوذپذیری چهار نوع مخلوط بنتونیت و شریعتمداری و همکاران [٧] با بررسی تأثیر نمک‌های سدیم کلرید، کلسیم کلرید و منیزیم کلرید روی حدود اتربرگ، تورم، تراکم‌پذیری و نفوذپذیری مخلوط رس- بنتونیت[۳] اشاره کرد.

این گزارش طی یک پروژهٔ آزمایشگاهی تأثیر نمک سدیم‌کلرید بر روی رفتار تورمی، تحکیمی و هم‌چنین تأثیر آن بر نفوذپذیری بنتونیت را بررسی می‌کند. آزمایش‌ها در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه علم و صنعت ایران انجام گرفته است.

شکل ۱. مرکز دفن ضایعات هسته‌ای در گنبد نمکی

Sand-Bentonite Febex Bentonite Clay-Bentonite

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.3.3]

مصالح و آزمایش‌ها

رس استفاده شده در آزمایش‌ها بنتونیت غنی شده با سدیم تولید گروه ایران باریت[1] است. مشخصات فیزیکی مانند وزن مخصوص، توزیع اندازهٔ دانه‌ها، درصد رطوبت و حدود اتربرگ بر اساس روش ASTM تعیین شده است [۸]. خاک طبق طبقه‌بندی متحد در گروه CH (رس با خاصیت پلاستیک بالا) قرار دارد. جدول ۱ بعضی از مشخصات ایران باریت بنتونیت را نشان می‌دهد.

در این تحقیق وزن مخصوص خشک برای همهٔ نمونه‌های بنتونیت ۱/٤ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شده است. میزان اشباع نیز برای همهٔ نمونه‌ها ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد. این امر به‌علت دور شدن از اثرات مکش[2] در خاک‌های غیراشباع است که در این تحقیق بررسی نشده است. از آن‌جاکه بنتونیت خاکی با سطح مخصوص بالا است، به‌منظور آماده‌سازی برای آزمایش پس از ترکیب و مخلوط شدن با میزان مشخصی آب مقطر برای رسیدن به درصد اشباع صد، حداقل به‌مدت ۵ روز در محفظه‌ای ایزوله شده در دمای ۲۵ درجه به‌منظور همگن شدن نمونه، قرار گرفته است. درصد رطوبت بنتونیت قبل از آزمایش مجدداً کنترل شده است. پس از عمل‌آوری بنتونیت با این روش، بنتونیت در دو ارتفاع ٦ میلی‌متری به‌صورت دینامیکی در

جدول ۱. مشخصات ایران باریت بنتونیت

پارامترهای موجود	مشخصات خاک
XRD آنالیز [۹]	مونت موریلونیت، کوارتز، کلسیت
طبقه‌بندی خاک	CH
حد روانی	۳۲۱
شاخص خمیری	۲۸۵
ماکزیمم وزن مخصوص خشک	۱/۵۱
درصد آب بهینه	۲٤
CEC(cmol/kg soil)[۹]	٦/۵
چگالی خشک دانه‌ها(Gs)	۲/۷۸
PH (نسبت آب به خاک ۱ به ۱۰) [۹]	۹/۵
سطح مخصوص دانه‌ها (m^2/gr)[۹]	٤۲۰

Iran Barite Suction

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.3.3]

در قالبی صلب و به‌کمک میله‌ای آهنی کوبیده شده است به‌صورتی که ارتفاع و قطر نهایی نمونه رتیب ۱۱و ۵۰ میلی‌متر شده است. سیال استفاده شده در آزمایش‌ها آب مقطر و محلول نمک سدیم‌کلرید با غلظت‌های ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵ و ۲ مولار است. نمک استفاده شده در محلول آبی، لرید با خلوص ۹۹ درصد است.

تورم بنتونیت تحت بار ۲۵ کیلوپاسکال و بارهای ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ٤۰۰ و ۸۰۰ کیلوپاسکال در مرحلهٔ تحکیم نمونه به‌صورت بارگذاری و باربرداری به نمونه اعمال شده‌اند. زمان هر بارگذاری در مرحلهٔ تحکیم نمونه حداقل ٤۸ ساعت است. همهٔ آزمایش‌ها با دستگاه تحکیم یک‌بعدی صورت گرفته است.

نتایج

آزمایش تورم آزاد

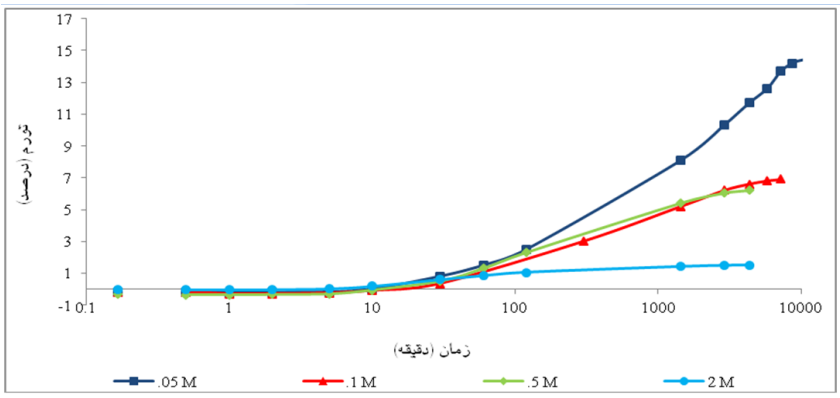
دستهٔ اول آزمایش‌های صورت گرفته، آزمایش تعیین تورم بنتونیت در حضور سیال‌های با غلظت مختلف است. شکل ۲ نتایج بررسی تورم بنتونیت را تحت بار ۲۵ کیلوپاسکال بر حسب لگاریتم زمان در غلظت‌های مختلف محلول سدیم‌کلرید نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲ افزایش غلظت محلول موجب کاهش تورم بنتونیت به‌میزان چشم‌گیری شده است. هم‌چنین افزایش غلظت محلول موجب افزایش سرعت تورم یا به‌عبارت دیگر موجب کاهش زمان به تعادل رسیدن تورم شده است. برای نمونه، نیمی از تورم نهایی در محلول ۲ مولار در حدود یک ساعت، برای محلول ۰/۵ مولار در حدود ١٤ ساعت و برای آب خالص در حدود ۱۰ روز رخ می‌دهد (از آن‌جا که اختلاف بین نمونه در آب خالص و محلول با غلظت نمک در مرحلهٔ تورم زیاد بود نمودار تورم در آب خالص در شکل ۲ رسم نشده است).

شکل ۳ تغییرات تورم نهایی بنتونیت با افزایش غلظت محلول را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳ افزایش غلظت محلول از آب خالص تا محلول ۲ مولار موجب کاهش تورم از حدود ۸۲ درصد به حدود ۱/۵ درصد شده است.

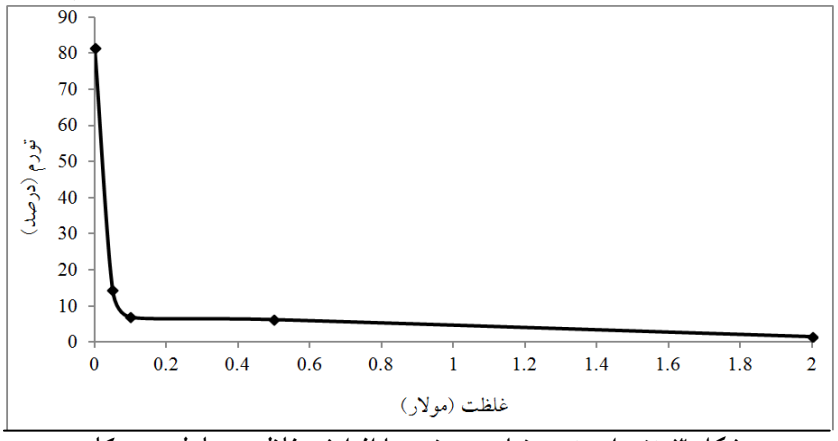
نتایج به‌دست آمده در این تحقیق تطابق قابل قبولی با نتایج به‌دست آمده به‌وسیلهٔ سایر محققان دارد. برای نمونه کاستلانوس و همکاران [۵] با بررسی اثر نمک سدیم‌کلرید روی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.3.3]



شکل ۲. تورم تحت تنش ۲۵ کیلوپاسکال در غلظت‌های مختلف محلول سدیم‌کلرید



شکل ۳. تغییرات تورم نهایی بنتونیت با افزایش غلظت محلول سدیم‌کلرید

تورم بنتونیت فی‌بیکس گزارش کردند که تورم بنتونیت با افزایش غلظت محلول از آب خالص تا محلول نمک ۲ مولار تحت اثر تنش ۵۰۰ کیلوپاسکال از حدود ۲۲ درصد به حدود ۷ درصد کاهش می‌یابد. کاستلانوس و همکاران [۱۰] در گزارشی دیگر بیان کردند افزایش غلظت نمک سدیم‌کلرید از آب خالص تا محلول نمک ۲ مولار تحت اثر تنش ۲۰ کیلوپاسکال موجب کاهش تورم از حدود ٤٥ درصد به حدود ۱۹ درصد شده است. الاواجی [٤] نیز با بررسی اثر نمک سدیم‌نیترات گزارش کرده است، افزایش غلظت نمک محلول از آب خالص تا محلول ٤ مولار تحت تنش ۷ کیلوپاسکال موجب کاهش تورم از حدود ۲٦ درصد به ٤ درصد و ٦۰ درصد به ۳ درصد در دو نوع ماسه- بنتونیت شده است. چنان‌که ملاحظه می‌شود، مشابه نتایج

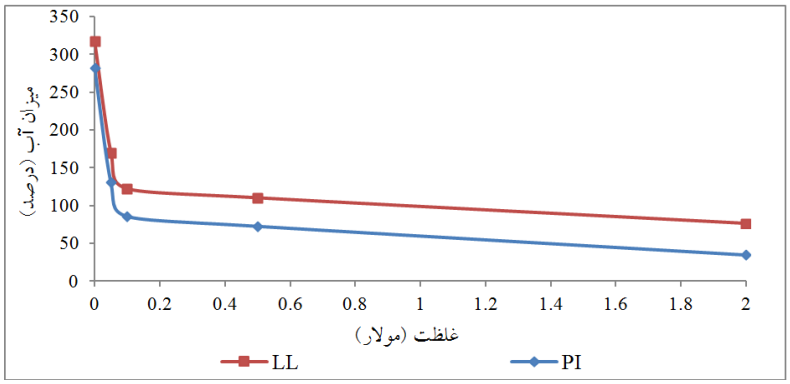
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.3.3]

این تحقیق، همهٔ محققان مذکور کاهش پتانسیل تورم با افزایش غلظت شیمیایی محلول را گزارش کرده‌اند.

آزمایش تعیین حدود اتربرگ

شکل ٤ تغییرات حد روانی و شاخص خمیری بنتونیت را با افزایش غلظت نمک سدیم کلرید نشان می‌دهد. چنان‌که از شکل ٤ مشخص است حد روانی با افزایش غلظت محلول کاهش می‌یابد. حد خمیری با تغییرات غلظت محلول تغییر محسوسی نمی‌کند بنا بر این شاخص خمیری نیز به‌شدت کاهش می‌یابد. به‌طورکلی با کاهش قابل توجه شاخص خمیری، نفوذپذیری هیدرولیکی افزایش و پتانسیل خودترمیمی کاهش می‌یابد [٤]. این مطلب در نمودار تورم شکل ۲ نیز نمایان است.



شکل ٤. تغییرات حد روانی و شاخص خمیری با افزایش غلظت محلول سدیم‌کلرید

به‌عنوان نمونه حد روانی بنتونیت در محلول نمک با غلظت ۲ مولار حدود ۷۰ شده که این حد روانی خاکی مانند کائولینیت است که خاصیت تورمی ندارد. نتایج آزمایش تورم (شکل ۲) نیز نشان‌دهندهٔ تورم ناچیز نمونه در غلظت ۲ مولار است.

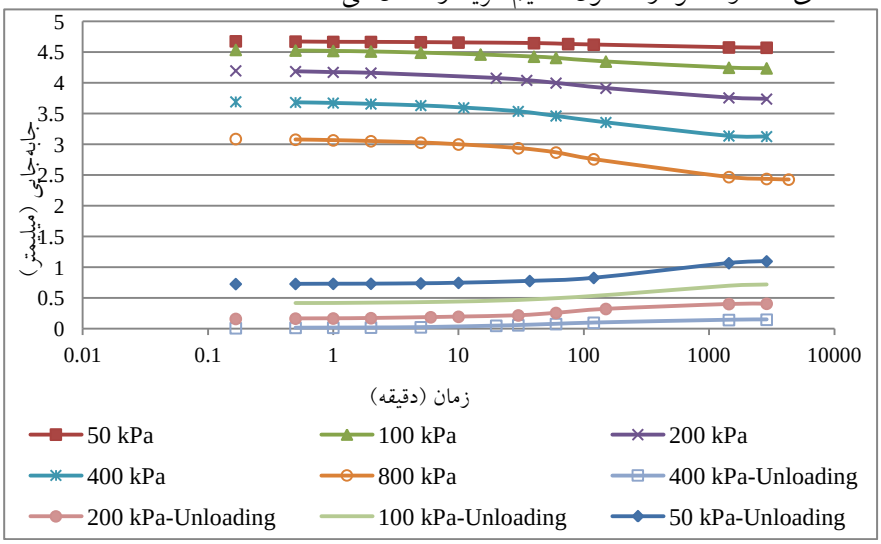
محققان مختلفی از جمله مایو [۱۱]، برندل [۱۲]، کانسلی و همکاران [۱۳] و میشرا و همکاران [٦] کاهش حدود اتربرگ با افزایش غلظت شیمیایی محلول را گزارش کرده‌اند. برای نمونه الاواجی [٤] با بررسی اثر نمک سدیم‌نیترات گزارش کرده، افزایش غلظت نمک محلول از آب خالص تا محلول ٤ مولار موجب کاهش حد روانی از حدود ۲۲۸ به ۳۸ و ۱۵۲ به ۳۲ و کاهش شاخص خمیری از حدود ۲۰۵ به ۲۲ و ۱۳۰ به ۱۷ در دو نوع ماسه- بنتونیت شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

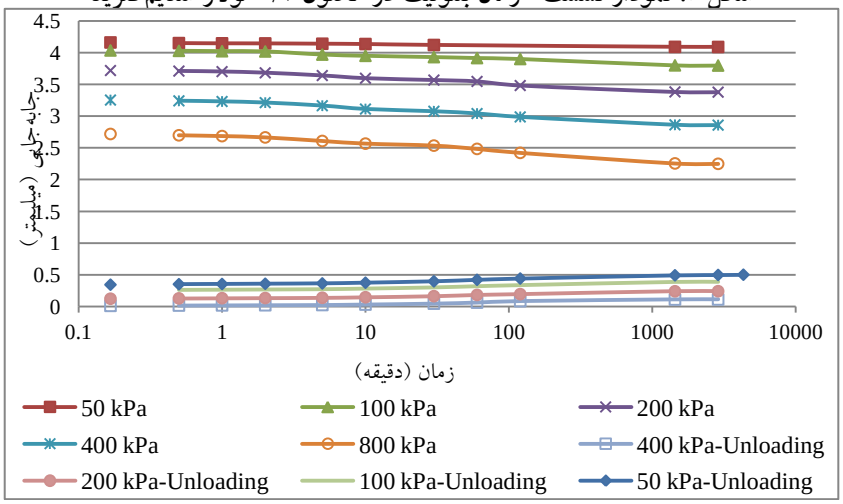
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.3.3]

آزمایش تحکیم

پس از بررسی تورم نمونه‌ها تحت شرایط افزایش غلظت نمک محلول آبی، به‌منظور بررسی سرعت و میزان نشست نمونه‌ها آزمایش تحکیم، پس از تورم نمونه‌ها در مرحلهٔ قبل تحت تنش‌های ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلوپاسکال به‌صورت بارگذاری و باربرداری صورت گرفت. شکل ۵ و شکل ٦ به‌ترتیب نمودار نشست نمونه‌ها بر اساس لگاریتم زمان در غلظت‌های ۰/۱ و ۲ مولار محلول سدیم‌کلرید را نشان می‌دهد.



شکل ۵. نمودار نشست- زمان بنتونیت در محلول ۰/۱ مولار سدیم‌کلرید



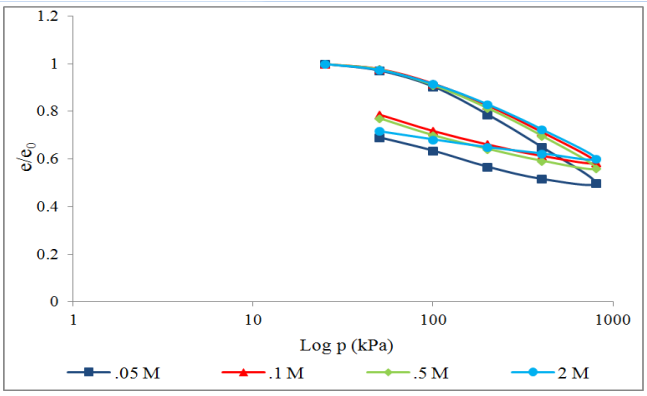
شکل ٦. نمودار نشست- زمان بنتونیت در محلول ۲ مولار سدیم‌کلرید

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.3.3]

با توجه به‌نتایج، افزایش غلظت محلول موجب افزایش سرعت نشست خواهد شد. این افزایش سرعت در ابتدای بارگذاری محسوس‌تر است. به‌عبارت دیگر زمان به‌تعادل رسیدن نشست نمونه‌ها با افزایش غلظت محلول کاهش می‌یابد.

به‌منظور مقایسهٔ بهتر، نمودار تغییرات تخلخل نسبت به تخلخل اولیه در برابر تنش قائم بر حسب کیلوپاسکال در شکل ۷ رسم شده است. این کار به‌علت تفاوت در ارتفاع اولیهٔ نمونه‌ها بعد از تورم است (این کار با توجه به تفاوت ارتفاع اولیهٔ نمونه‌ها بعد از تورم، به‌منظور در نظر نگرفتن اثر ارتفاع نمونه‌ها در مقایسه صورت گرفته است). با توجه به شکل ۷ افزایش غلظت محلول موجب کاهش تراکم‌پذیری بنتونیت شده است.



شکل ۷. نمودار تعدیل شدهٔ تغییرات تخلخل در برابر فشار تحکیم

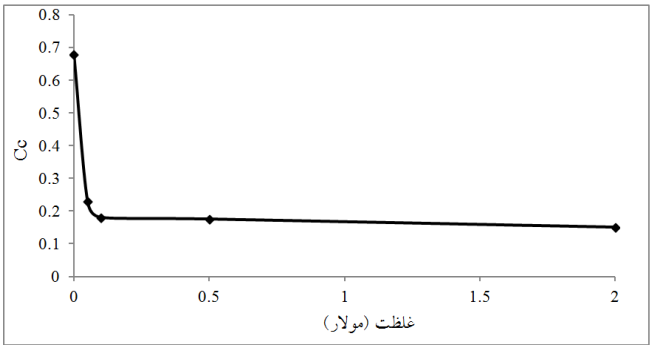
شکل ۸ نیز تغییرات شاخص تراکم (C_C) با افزایش غلظت محلول را نشان می‌دهد (شاخص تراکم در واقع شیب قسمت عادی تحکیم یافتهٔ نمودار تحکیم (تعدیل نشده) است). با توجه به این شکل شاخص تراکم با افزایش غلظت محلول کاهش می‌یابد. محققان مختلف از جمله الاواجی [٤] و شریعتمداری و همکاران [٧] نیز کاهش شاخص تراکم با افزایش غلظت محلول را گزارش کرده‌اند.

نفوذپذیری

تحقیقات برای تعیین نفوذپذیری خاک به دوروش مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شود. روش غیرمستقیم استفاده از نتایج آزمایش تحکیم و روش مستقیم استفاده از آزمایش‌های

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.3.3]

اندازه‌گیری مستقیم است. روابط ۱، ۲ و ۳ نحوهٔ محاسبهٔ ضریب نفوذپذیری به‌روش غیرمستقیم را نشان می‌دهد.



شکل ۸. تغییرات شاخص تراکم با افزایش غلظت محلول

$$m_v = \frac{\Delta h}{h.\Delta p} \quad (۱)$$

$$C_v = \frac{h'^2 . Tv}{t} \quad (۲)$$

$$K = \Upsilon_w . m_v . C_v \quad (۳)$$

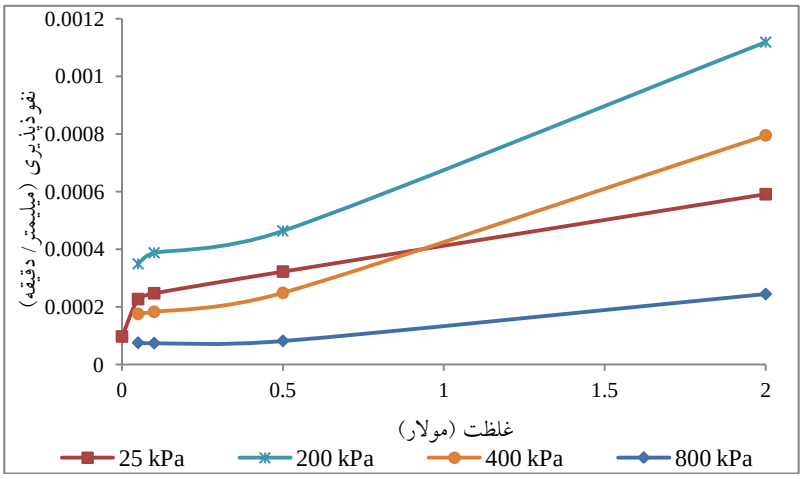
در روابط بالا m_v ضریب قابلیت فشردگی حجمی، h ارتفاع اولیهٔ نمونه، Δh تغییرات ارتفاع نمونه، Δp تغییرات تنش مؤثر، C_v ضریب تحکیم، h' حداکثر مسافت زه‌کشی، Tv عامل زمان وابسته به درجهٔ تحکیم، t مدت زمان از آغاز تحکیم، k ضریب نفوذپذیری و Υ_w وزن مخصوص محلول است.

تغییرات ضریب نفوذپذیری در مرحلهٔ تورم آزاد و در بارگذاری‌های مختلف مرحلهٔ تحکیم در شکل ۹ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۹ افزایش غلظت محلول موجب افزایش ٤ تا ۸ برابری نفوذپذیری بنتونیت در تنش‌های مختلف شده است، این نتایج با نتایج محققان مختلف تطابق دارد [۷]، [١٤]، [١٥]. هم‌چنین با افزایش تنش قائم نفوذپذیری کاهش می‌یابد زیرا با افزایش تنش قائم نمونهٔ متراکم‌تری نسبت به حالات بارگذاری قبلی خواهیم داشت که این موجب کاهش حفرات و کاهش نفوذپذیری می‌شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.3.3]



شکل ۹. تغییرات ضریب نفوذپذیری بنتونیت با افزایش غلظت محلول سدیم‌کلرید در تنش‌های مختلف

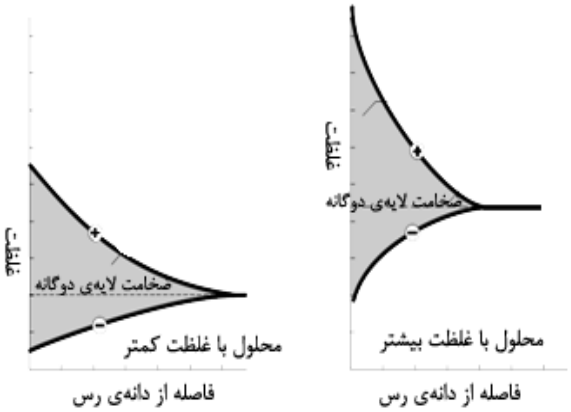
بحث

نمک موجود در آب دریا، گنبدهای نمکی یا در شیرابهٔ پسماندهای شهری می‌تواند بر پارامترهای مختلف مصالح به‌کار رفته در مراکز دفن پسماندهای هسته‌ای و شهری تأثیر بگذارد. این تأثیر می‌تواند در مورد مراکز دفن پسماندهای پر خطر بسیار مهم باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده افزایش غلظت نمک سدیم‌کلرید در محلول آبی موجب کاهش حدود اتربرگ و پتانسیل تورم بنتونیت می‌شود. این مطلب را محققان مختلفی گزارش کرده‌اند. کاهش تورم بنتونیت با افزایش غلظت محلول را می‌توان با توجه به تئوری لایهٔ آب دوگانه توضیح داد. شکل ۱۰ نمایی شماتیک از کاهش ضخامت لایهٔ دوگانه با افزایش غلظت محلول را نشان می‌دهد.

در واقع ضخامت لایهٔ دوگانه فاصله‌ای از دانهٔ رسی است که بارهای مثبت و منفی (کاتیون‌ها و آنیون‌ها یک‌دیگر را خنثی کرده‌اند. آب در این فاصله تحت تأثیر جاذبهٔ دانهٔ رسی قرار دارد و خارج از این فاصله به‌عنوان آب آزاد شناخته می‌شود که از جاذبهٔ دانهٔ رسی خارج شده است. بنا بر این در حالت افزایش نمک سدیم‌کلرید به محلول با توجه به افزایش کاتیون Na^+ در محلول آبی، یون‌های مثبت در محلول افزایش یافته بنا بر این سریعتر می‌توانند بار منفی سطح رس‌ها را خنثی کنند و در نتیجه ضخامت لایهٔ دوگانه کاهش می‌یابد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.3.3]



شکل ۱۰. نمایی شماتیک از کاهش ضخامت لایهٔ دوگانه با افزایش غلظت محلول

با افزایش غلظت نمک محلول ضخامت لایهٔ دوگانه کاهش می‌یابد و در نتیجه نیروی دافعهٔ بین دانه‌ها کم خواهد شد [۱٦]، [۱۷]. این شرایط موجب نزدیک شدن ذرات رس به یک‌دیگر و تشکیل ساختار گوشه به گوشه و گوشه به صفحه می‌شود [۱۸]، [۱۹].

با کاهش نیروی دافعه ساختار بنتونیت به سمت فولوکوله شدن، پیش خواهد رفت. محققان مختلف کاهش ضخامت لایهٔ دوگانه و تغییر ساختار رس‌های با خاصیت پلاستیک بالا به فولوکوله با افزایش غلظت شیمیایی محیط، گزارش کرده‌اند (برای نمونه بودر و دانیل [۲۰]، مایو [۱۱]، اسمیتز و همکاران [۲۱]، الاواجی [٤]، کالستد و همکاران [۲۲]، لی و همکاران [۲۳]). این تغییر ساختار منجر به نزدیک شدن ذرات به یک‌دیگر و ایجاد حفرات بزرگ‌تر در یک تخلخل ثابت می‌شود. نزدیک‌تر شدن دانه‌ها به یک‌دیگر موجب کاهشخ آب جذب شده می‌شود. کاهش حدود اتربرگ با افزایش غلظت محلول را نیز می‌توان با توجه به نیروی بین دانه‌ای ذرات رس توضیح داد [٦]. افزایش سرعت تورم و نشست با افزایش غلظت محلول با توجه به افزایش نفوذپذیری با افزایش غلظت محلول توضیح داده می‌شود. افزایش نفوذپذیری با افزایش غلظت محلول را می‌توان به تغییر ساختار بنتونیت با افزایش غلظت محلول نسبت داد. شکل ۱۱ تصویری شماتیک از تغییر ساختار بنتونیت ناشی از کاهش ضخامت لایهٔ دوگانه را نشان می‌دهد.

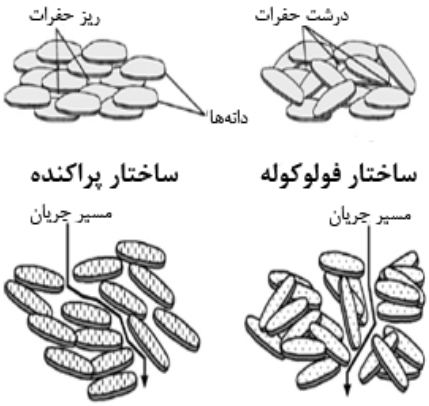
با توجه به شکل ۱۱ با تغییر ساختار بنتونیت به فولوکوله، حفرات جدیدی در بین دانه‌ها ایجاد می‌شود و در نتیجه نفوذپذیری افزایش می‌یابد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.3.3]

کاهش تراکم‌پذیری با افزایش غلظت محلول را نیز می‌توان با توجه به تغییر ساختار بنتونیت توضیح داد، زیرا خاک با ساختار فولوکوله نشست کم‌تری نسبت به خاک با ساختار پراکنده دارد.

نکتهٔ مهمی که در تفسیر همهٔ این نتایج باید به آن توجه کرد نوع خاک استفاده شده است، زیرا بنتونیت خاکی با خاصیت پلاستیک بالا است، بنا بر این نتایج به‌دست آمده تنها برای این دسته خاک معتبر است و برای خاک‌های با خاصیت پلاستیک کم‌تر مانند ترکیب‌های رس با بنتونیت باید آزمایش‌های جداگانه‌ای صورت گیرد.



شکل ۱۱. تصویر شماتیک از تغییر ساختار بنتونیت ناشی از کاهش ضخامت لایه آب دوگانه [۲٤]

نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی اثر نمک سدیم‌کلرید روی تورم، تحکیم، حدود اتربرگ و نفوذپذیری بنتونیت می‌پردازد. محلول سدیم‌کلرید با چهار غلظت ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵ و ۲ مولار به‌همراه آب مقطر خالص به‌عنوان سیال نفوذ کننده استفاده شده است. با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته این نتایج به‌دست آمده است.

- با افزایش غلظت محلول میزان تورم آزاد و زمان به تعادل رسیدن تورم کاهش می‌یابد.
- افزایش غلظت محلول موجب کاهش حد روانی و پتانسیل خمیری می‌شود، اما حد خمیری تغییر محسوسی نمی‌کند.
- سرعت نشست نمونه‌ها با افزایش غلظت محلول افزایش می‌یابد.
- با افزایش غلظت محلول شاخص تراکم و تراکم‌پذیری بنتونیت هر دو کاهش می‌یابند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.3.3]

- افزایش غلظت محلول موجب افزایش نفوذپذیری بنتونیت می‌شود.
- کاهش تورم، کاهش حدود اتربرگ، کاهش تراکم‌پذیری و افزایش نفوذپذیری با افزایش غلظت محلول با توجه به کاهش ضخامت لایهٔ دوگانه و نیروی دافعهٔ بین ذرات که موجب قرارگیری ذرات در فاصله‌ای نزدیک‌تر به یک‌دیگر و در نتیجه موجب کاهش آب جذبی بین لایه‌ها و ایجاد حفرات بین دانه‌ها می‌شود، توضیح داده می‌شود.

منابع

1. Barone F., "Description of diffusion and adsorption coefficient used for modeling contaminant migration through clayey soils", Geotech News 11(4) (1993) 47-50.
2. Mitachi T., "Mechanical Behavior of Bentonite-Sand Mixtures as Buffer Materials", Soils and Foundations 48(3) (2008) 363-374.
3. Fritz P., Barker J. F., Gale J., "Isotope Hydrology at the Stripa Test Site", Proc. N. E. A. Workshop, Int. Stripa Project, Stockholm (1982).
4. Alawaji H., "Swell and compressibility characteristics of sand-bentonite mixtures inundated with liquids", Applied Clay Science 15 (1999) 411-430.
5. Castellanos E., Villar M. V., Romero E., Lloret A., Gens A., "Chemical impact on the hydro-mechanical behaviour of high-density FEBEX bentonite", Physics and Chemistry of the Earth 33 (2008) 516-526.
6. Mishra A. K., Ohtsubo M., Y.Li L., Higashi T., Park J., "Effect of salt of various concentrations on liquid limit and hydraulic conductivity of different soil-bentonite mixtures", Environ Geol 57 (2009) 1145-1153.
7. Shariatmadari N., Salami M., KarimpourFard M., "Effect of inorganic salt solutions on some geotechnical properties of soil-bentonite mixtures as barriers", International Journal of Civil Engineering 9 (2) (2011).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.3.3]

8. American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, ASTM, P.A., Philadelphia 4 (8) (1992).

9. Shariatmadari N., Saeidijam S., "The effect of thermal history on thermo-mechanical behavior of bentonite-sand mixture", International Journal of Civil Engineering 10 (2) (2012).

10. Castellanos E., Gens A., Lloret A., Romero E., "Influence of water chemistry on the swelling capacity of a high-density bentonite", In: Miller, G.A.; Zapata, C.E.; Houston, S.L.; Fredlund, D.G. (Eds.); Unsaturated Soils 2006, Geotechnical Special Publication 147(1) (2006) 962-971.

11. Maio C. D., "Exposure of bentonite to salt solution osmotic and mechanical effects", Geotecnique 46 (4) (1996) 695-707.

12. Brandl H., "Mineral liners for hazardous waste containment", Geotechnique 42 (1) (1992) 57-65.

13. Cancelli A., Cossu R., Malpei F., Offredi A,. "Effects of leachate on the permeability of sand-bentonite mixtures", Proc. Landfilling of Waste, SPON (1994) 259-293.

14. Shackelford C. D., Benson C. H., Katsumi T., Edil T. B., Lin L., "Evaluation of the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquid", Geotextiles and Geomembranes (18:2-4) (2000) 133-161.

15. Yilmaz G., Yetimoglu T., Arasan S., "Hydraulic conductivity of compacted clay liners permeated with inorganic salt solutions", Waste Management & Research 26 (5) (2008) 464-473.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.3.3]

16. Yong R. N., Sethi A. J., Ludwig H. P., Jorgensen M. A., "Interparticle action and rheology of dispersive clays", Journal Geotech. Eng. Div. GT10 (14903) (1979) 1193-1209.

17. Ouhadi V. R., Goodarzi A. R., "Assessment of the stability of a dispersive soil treated by alum", Eng. Geol. 85 (2006) 91-101.

18. Yong R. N., "Overview of modeling of clay microstructure and interactions for prediction of waste isolation barrier performance", Eng. Geol. 54 (1999) 83-91.

19. Yong R.N., Warkentin B. P., "Introduction to soil behavior", New York, The Macmillan Company (1975).

20. Bowders J. J., Daniel D. E., "Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals", ASCE J. Geotech. Eng. 113 (12) (1987).

21. Schmitz R. M., Schroeder C., Charlier R., "Chemo-mechanical interactions in clay: A correlation between clay mineralogy and Atterberg limits", Appl. Clay Sci., 26 (2004) 351-358.

22. Kolstad D. C., Benson C. H., Edil T. B., Jo H. Y., "Hydraulic conductivity of a dense prehydrated GCL permeated with aggressive inorganic solutions", Geosynth. Int., 11(3) (2004) 233-241.

23. Lee J. M., Shackelford C. D., Benson C. H., Jo H. Y., Edil T. B., "Correlating index properties and hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners", J. Geotech. Geoenviron. Eng., 131(11) (2005) 1319-1329.

24. Ouhadi V. R., Yong R. N., Goodarzi A. R., Safari-Zanjani M., "Effect of temperature on the re-structuring of the microstructure and geo-environmental behaviour of smectite", Applied Clay Science 47 (2010).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.3.3]