

تأثیرات حرارت ناشی از افزایش عمق و تشعشعات هسته‌ای و نیز افزایش غلظت نمک بر بنتونیت مصرفی در مراکز دفن پسماندهای هسته‌ای

مصطفی نوباری^۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۴

چکیده

مراکز دفن پسماندهای هسته‌ای پرخطر، در عمق ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ متری از سطح زمین احداث می‌گردند. مناطق کویری به جهت دور بودن از مراکز جمعیت و وجود خاک‌های رسی که خواصی از قبیل شکل‌پذیری، تورم، نفوذناپذیری و ترمیم‌پذیری خودکار در صورت ترک خوردن دارند، مکان مناسبی برای نگهداری پسماندهای هسته‌ای می‌باشند. در میان انواع رس‌ها، رس بنتونیت به دلیل فراوانی آن و دارا بودن خواص مکانیکی مناسب، به عنوان لایه محافظ پسماندهای هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به افزایش دمای خاک اطراف مراکز دفن پسماندهای هسته‌ای بر اثر افزایش عمق و تشعشعات تا مرز ۱۱۵ درجه، ضرورت مطالعه رفتار مکانیکی رس در این دما نمایان می‌گردد، لذا جهت بررسی این موضوع اقدام به ارتقاء دستگاه تحکیم معمولی (با اضافه نمودن مخزن آب مجزا و المنت حرارتی) گردید. نتایج آزمایشات حاکی از این بود که تأثیر غلظت نمک به مراتب بیشتر و تعیین‌کننده‌تر از افزایش دما بر روی نمونه‌های بنتونیت می‌باشد. در اثر افزایش غلظت نمک، نفوذپذیری رس افزایش یافته و میزان تورم بنتونیت نیز که برای ترمیم ترک‌ها حائز اهمیت است، شدیداً کاهش می‌یابد. لذا در چنین شرایطی پیشنهاد می‌گردد از لایه‌های ضخیم‌تر رس برای پوشش اطراف مخازن پسماند استفاده شود. ضمناً با توجه به تأثیر کمتر افزایش دما بر رفتار نمونه‌های رسی، در مطالعات آتی می‌توان از تأثیرات دما چشم‌پوشی نموده و با استفاده از تجهیزات موجود و بدون اعمال افزایش دما، اقدام به پژوهش جدید نمود.

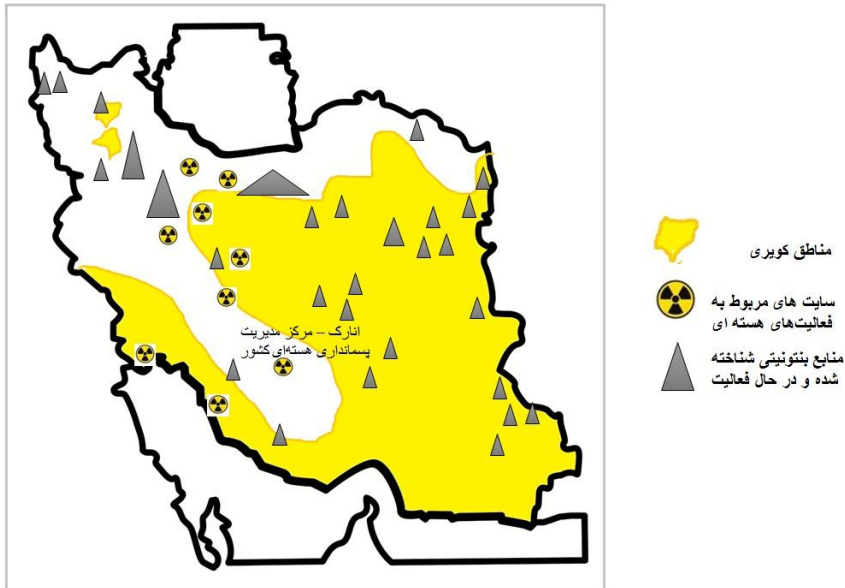
^۱ فوق لیسانس عمران (خاک و پی - ژئوتکنیک) و نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: mostaf.nobari@gmail.com

واژگان کلیدی: آزمایش تحکیم، افزایش دما، افزایش نمک، بتونیت، دفع پسماند هسته‌ای.

۱- کلیات

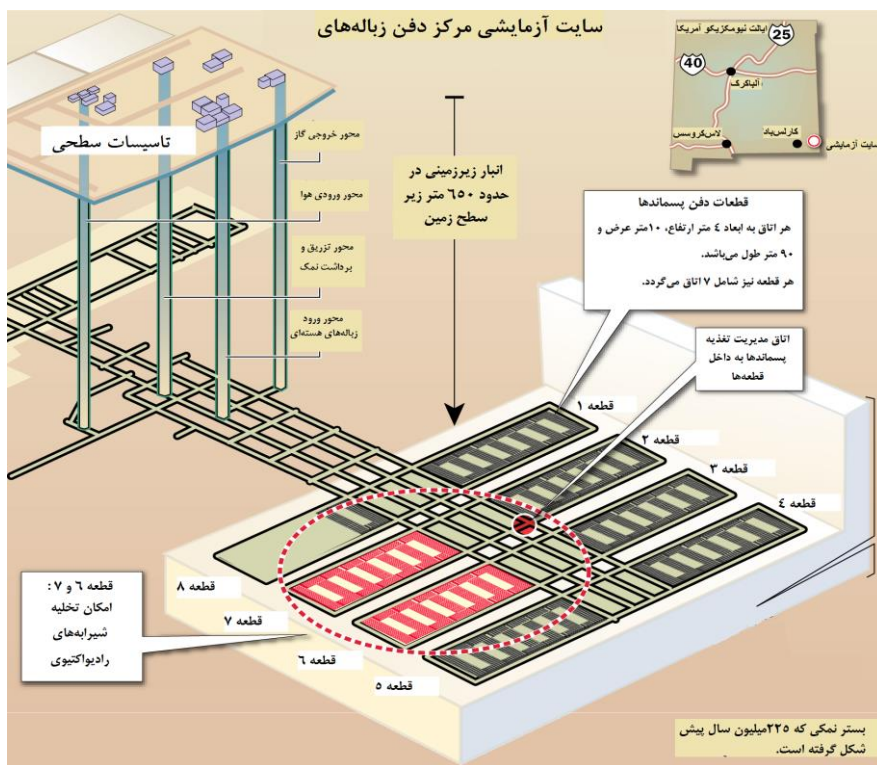
۱-۱- طرح مسئله

کشور ایران دارای اراضی کویری وسیع و منابع بتونیتی فراوانی می‌باشد و با توجه به دستیابی به تکنولوژی فرآیندهای هسته‌ای در کشور، لزوم برنامه‌ریزی برای مدیریت پسماندهای حاصله امری ضروری خواهد بود. ضمناً با توجه به حساسیت‌های ایجاد شده در سطح بین‌المللی نسبت به مسائل هسته‌ای ایران، مسلم است که صفر تا صد فرآیندهای هسته‌ای از استخراج تا دفن بایستی توسط نیروها و منابع داخلی و بومی، اجرا و تأمین گردند. مناطق کویری به دلیل خصوصیتی از قبیل دوری از مناطق مسکونی، عدم حرکت آب‌های زیرزمینی در آن، وجود خاک‌های رسی و نمکی و نیز پارامترهای زمین‌شناسی پایدار، محل مناسبی برای ایجاد مراکز دفن پسماندهای هسته‌ای می‌باشند. از میان انواع رس‌ها، رس بتونیت بنا به دلایلی که مطرح خواهد شد، ماده مناسبی جهت بکارگیری به عنوان لایه محافظ پسماندهای هسته‌ای بوده و در این پژوهش نیز، از این رس به عنوان ماده اصلی آزمایش استفاده شده است. شکل‌پذیری زیاد این رس در مقابل بارهایی که در طراحی مراکز دفن پسماندهای هسته‌ای در نظر گرفته می‌شود، مانند زلزله (که در طول عمر طرح ۱۰۰۰۰ ساله مراکز دفن هسته‌ای ممکن است رخ دهد و یا حرکات تکتونیک زمین) (Edwards, et al, 2013:171)، باعث می‌گردد آسیب وارده به لایه محافظ پسماندها به حداقل برسد. ضمناً ترمیم‌پذیری بالای این ماده باعث می‌گردد بعد از ایجاد ترک به هر علت، تحت اثر خاصیت تورمی رس، ترک مذکور ترمیم یابد. نفوذپذیری پایین رس، عامل دیگری است که مانع از نفوذ آب به داخل محفظه‌های دفن و نیز خروج نشتی‌های احتمالی از مخازن پسماند می‌گردد.



شکل شماره ۱. پراکندگی مراکز هسته‌ای، منابع بتونیتی (نقشه سازمان زمین‌شناسی ایران) و محدوده‌های کویری در ایران (همشهری آنلاین)

شیوه دفن زباله‌های هسته‌ای بدین نحو است که تونلی جهت دسترسی به عمق ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ متر در زمین حفاری می‌گردد و پس از رسیدن به بستر مناسب، تونل‌هایی در تراز افق به عنوان انباره‌های پسماندها، ایجاد می‌شود. زباله‌های پرتوزا پس از طی مراحل شیشه‌سازی و سرد شدن و قرارگرفتن درون مخازن فولادی به ضخامت ۲۰ سانتیمتری، درون انباره‌های حفر شده قرارگرفته و اطراف آن با بتونیت پر می‌شود (Ewing, et al, 1995: 67). با رفتن در عمق زمین دمای آن به ازای هر صد متر حدود ۳ درجه افزایش می‌یابد (Parton, et al, 1981, 208). بعلاوه با گذشت زمان بر اثر تشعشعات نیز دما افزایش خواهد یافت. نهایتاً طبق برآوردی که محققین انجام داده‌اند احتمال افزایش این دما تا ۱۱۵ درجه محتمل خواهد بود (Gibb, 1999: 206).



شکل شماره ۲. نمای کلی از یک مرکز دفن پسماند هسته‌ای

در پژوهش انجام گرفته نمونه‌های رس بنتونیت تحت اثر دمای بالا و مستغرق در محلول نمک واقع شدند، سپس توسط دستگاه تحکیم یک بعدی، تورم آزاد و تورم آنها تحت بارهای وارده، مورد بررسی قرار گرفت تا کارایی این ماده بعنوان مصالح اصلی مورد استفاده در مراکز دفن پسماندهای هسته‌ای، مورد مطالعه قرار گیرد.

۱-۱-۱- زباله‌های هسته‌ای و مراکز دفن آن

ضایعات هسته‌ای را بر حسب نوع محتویات، پتانسیل تولید حرارتی و شدت پرتوزایی به سه دسته‌ی ضایعات سطح پایین^۱، ضایعات فرا اورانیومی^۲ و ضایعات سطح بالا^۳ دسته‌بندی می‌کنند (Ewing, et al, 1995:64). برای دفع دو دسته آخر از پسماندها، از روش دفن در اعماق زمین استفاده می‌گردد.

جدول شماره ۱. مراکز دفن پسماندهای پرخطر هسته‌ای در حال ساخت و بهره‌برداری در کشورهای مختلف (Edwards, et al, 2013:59)

کشور	وضعیت بهره‌برداری	عمق	جنس بستر
بلژیک	تحت بررسی	حدود ۲۲۵ متر	رس نرم
فرانسه	نشست‌هایی در رابطه با اجرا برگزار شده	حدود ۵۰۰ متر	سنگ آهک
آلمان	پیش‌بینی شده	حدود ۸۰۰ متر	گنبد نمکی
سوئیس	نشست‌هایی در رابطه با اجرا برگزار شده	-	رس
ژاپن	تحت بررسی	-	-
انگلیس	تحت بررسی	-	-
آمریکا	ساخت بخش آزمایشی تا سال ۲۰۱۰ - در حال تکمیل	۲۰۰ الی ۳۰۰ متر	توده آتشفشانی

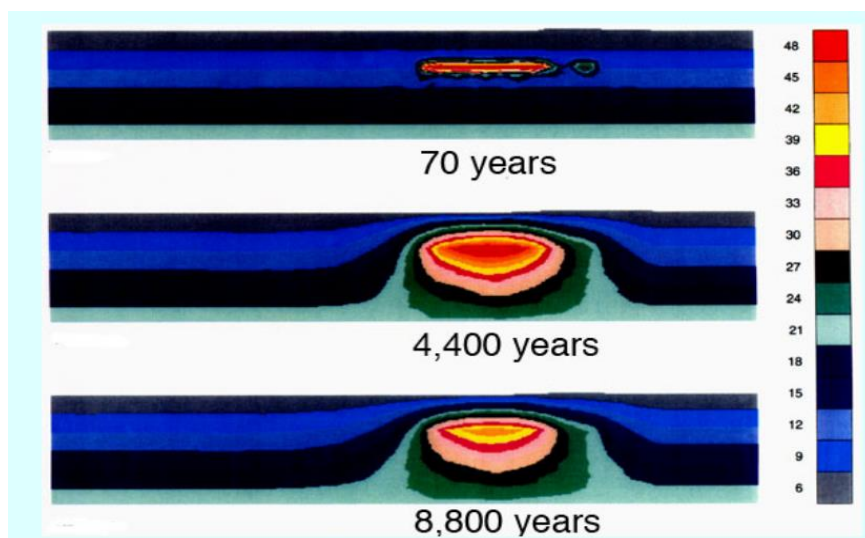
^۱ Low Level Waste

^۲ Transuranic Waste

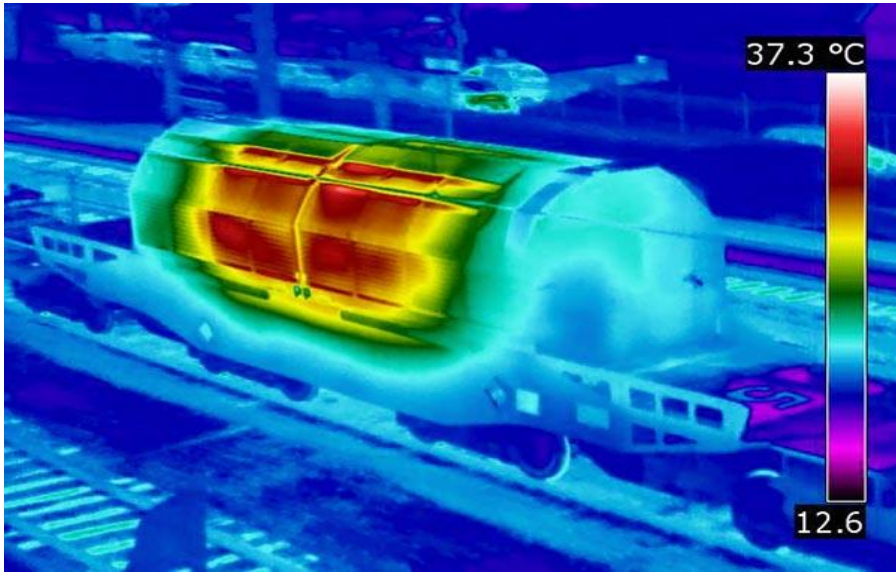
^۳ Hi Level Waste

۱-۲-۱- افزایش دما در اطراف سلول‌های دفن زباله‌های هسته‌ای (اثر عمق و تشعشعات)

مشاهدات مستقیم در معادن و گمانه‌ها حاکی از افزایش درجه حرارت با افزایش عمق می‌باشد. یک مرکز دفن واقع در ناحیه کویری (با متوسط دمای ۲۰ درجه در طول سال)، اگر در عمق یک کیلومتری سطح زمین واقع گردد، دمایی معادل ۵۰ درجه سانتیگراد خواهد داشت که به این مقدار، اثر حرارتی تشعشعات زباله‌های هسته‌ای هم افزوده خواهد شد. نتایج بدست آمده از تحقیقات مؤسسه ائتلاف هسته‌ای کانادالحاکی از ۴۸ درجه افزایش در اطراف مخازن پسماندهای هسته‌ای می‌باشد. این دما که در ابتدا ایجاد می‌گردد، پس از گذشت ۸۸۰۰ سال افزایش نیافته و با گذشت زمان تنها توسط گرادیان حرارتی خاک‌های اطراف، به نقاط مختلف منتقل خواهد شد (Edwards, et al, 2012:32).



شکل شماره ۳. آنالیز حرارت تولید شده بر اثر تشعشعات هسته‌ای در طول زمان (Edwards, et al, 2013:1)



شکل شماره ۴. تصویر بر گرفته از دوربین‌های حرارتی از یک محموله پسماند هسته‌ای (Manaugh, 2011)

اگر دمای ۴۸ درجه‌ای که بر اثر تشعشعات پسماندها ایجاد می‌گردد را بتوان با حرارت ناشی از عمق زمین (۵۰ درجه) ادغام نمود، دمای اطراف سلول‌های پسماند در مناطق کویری تقریباً برابر ۱۰۰ درجه سانتیگراد خواهد بود.

بر اساس آیین‌نامه دفن پسماندهای هسته‌ای آمریکا؛ دمای اطراف مخازن پسماندها نباید از ۱۰۰ درجه تجاوز نماید چرا که منجر به زنگ‌زدگی فولادهای استفاده شده گردیده و گازهای درون مخازن آزاد خواهند شد (Lennemann, 1978: 4).

اهمیت و ضرورت تحقیق

چنانکه ذکر شد در مجاورت پسماندهای مدفون، دما افزایش می‌یابد لذا اثر افزایش دما نیز بایست مورد مطالعه قرار گیرد.

در طولانی مدت ممکن است در لایه محافظ اطراف پسماندهای هسته‌ای به دلیل حرکت‌های زمین و یا زلزله، ترک خوردگی ایجاد گردد، لذا بدلیل عدم دسترسی به محل ترک خوردگی و عدم امکان شناسایی محل آن، خاصیت خودترمیمی رس، مفید به فایده خواهد بود. بنابراین برای پی بردن به مقدار خودترمیمی، میزان تورم‌پذیری بتونیت باید مورد مطالعه قرارگیرد. این خاصیت رس با دستگاه تحکیم قابل ارزیابی است.

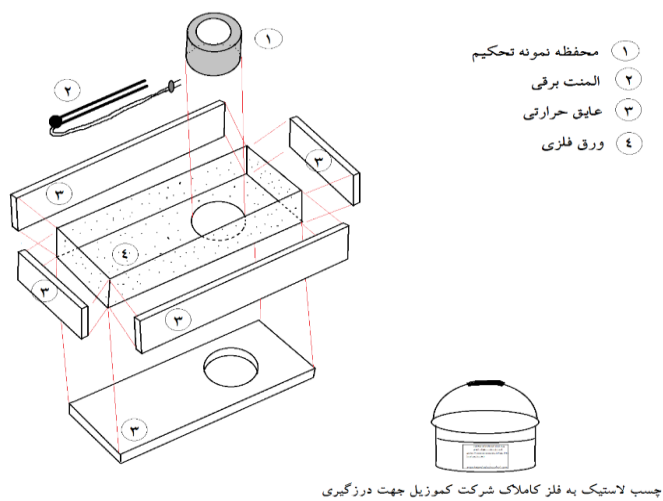
به دلیل خاصیت جذب امواج توسط بلورهای نمک، در برخی موارد اطراف سلول‌های پسماند هسته‌ای نمک قرارداده می‌شود، لذا در صورت نفوذ آب به اطراف این سلول‌ها، خاک رس در معرض املاح نمک قرارخواهد گرفت.

اکنون که ایران به طور نسبی به این فناوری دست‌یافته، مدیریت صحیح دفن پسماندهای هسته‌ای نیازمند مطالعات گسترده‌ای است که تحقیق حاضر گامی در راستای تلاش برای نیل به این هدف می‌باشد.

روش تحقیق

تحقیق حاضر از نوع آزمایشگاهی می‌باشد. نمونه‌ها پس از ساخت، درون دستگاه تحکیم قرار داده شده و شرایط واقعی مراکز دفن تا حد امکان در آزمایش اعمال می‌گردد. از آنجا که دستگاه تحکیم با قابلیت کنترل دما وجود ندارد، طراحی و ساخت سیستمی الحاقی به دستگاه تحکیم معمولی در برنامه‌ی آزمایشگاهی پروژه قرارگرفت.

شکل (۵) تصویری شماتیک از بخش‌های مختلف دستگاه و شکل (۶) تصویری از دستگاه تحکیم حرارتی ساخته شده در شرکت ژرفابین خاک و سازه را نشان می‌دهد.



شکل شماره ۵. اجزای استفاده شده در ارتقاء دستگاه تحکیم



شکل شماره ۶. نمای داخلی دستگاه تحکیم با قابلیت کنترل دما



شکل شماره ۷. نمای خارجی دستگاه تحکیم با قابلیت کنترل دما (ساخته شده در شرکت ژرفابین خاک و سازه)

همان‌گونه که در تصویر ۷ مشاهده می‌گردد، به مجموعه دستگاه آزمایش علاوه بر سلول معمولی تحکیم، یک محفظه آب با دمای ۸۰ درجه اضافه گردیده تا دمای نمونه افزایش یابد.

مروری بر پیشینه تحقیق

با توجه به کاربرد بنتونیت در مراکز دفن، بررسی تأثیر افزایش دما بر تورم رس‌ها در تحقیقات مختلف مورد توجه بوده است. در زمینه مطالعات، گزارش‌های مختلف حاکی از کاهش کرنش‌های تورمی با افزایش دما می‌باشد.

خلاصه نتیجه تحقیقات - کرنش تورمی	محققین
افزایش دما موجب کاهش تورم می‌شود.	(Pusch et.al, 1990: 1128) و (Lingnau et.al, 1996: 110) و (Villar et.al, 2008: 46) و (Shariatmadari et.al, 2012:165) و (Romero et.al, 2000: 434)
گزارش‌های مختلف حاکی از کاهش کرنش‌های تورمی با افزایش دما می‌باشد.	نتیجه نهایی

مطالعات گذشته نشان‌دهنده‌ی افزایش فشار تورمی بتونیت سدیمی طبق گزارش پوش و همکاران است (Pusch et.al, 1990: 1129).

خلاصه نتیجه تحقیقات - فشار تورمی	محققین
مطالعات نشان‌دهنده‌ی افزایش فشار تورمی بتونیت سدیمی است	(Pusch et.al, 1990: 1129) و (Cho et.al, 2000: 1279) و (Arifin, 2008: 42)
کاهش جزئی در فشار تورمی را با افزایش دما در مورد ماسه - بتونیت گزارش کردند	(Lingnau et.al, 1996:109)
اکثر گزارش‌ها حاکی از افزایش فشار تورمی بتونیت با افزایش دما می‌باشد	نتیجه نهایی

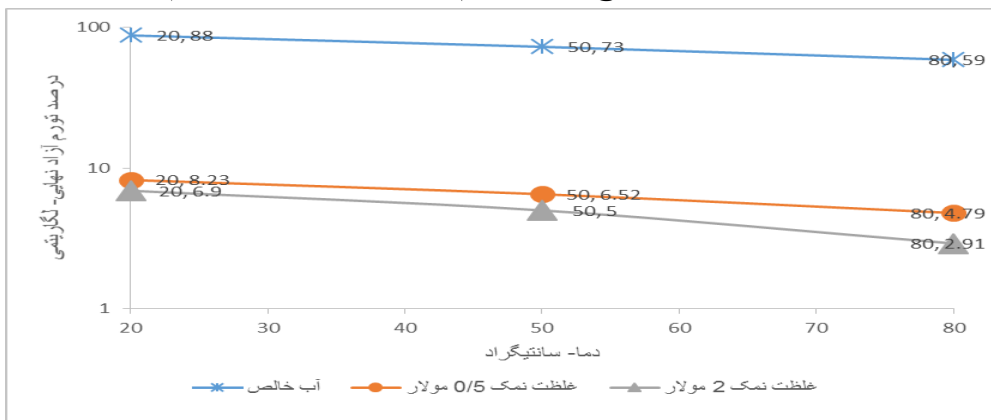
در خاک‌های رسی بخشی از آب بین دانه‌ها توسط دانه‌های خاک مقید و محبوس می‌گردند (لایه‌ی آب دوگانه). بخش دیگر آب جذب شده، آب آزاد است و می‌تواند توسط هد هیدرولیکی طبیعی جریان پیدا کند. گیب اشاره کرده است که در دماهای بالاتر از ۷۰ درجه خصوصیات آب جذبی (لایه‌ی آب دوگانه) شبیه آب آزاد می‌شود. بنابراین کل آب حفره‌ای مانند آب آزاد رفتار می‌کند (Gibb, 1999: 209).

محققین	خلاصه نتیجه تحقیقات توانایی نگهداری آب
(Gibb, 1999: 209)	در دماهای بالاتر از ۷۰ درجه آب جذبی = آب آزاد
(Tang et.al, 2005: 291)	در ۲۰ تا ۸۰ درجه، افزایش دما موجب کاهش ظرفیت نگهداری آب می‌شود.
(Romero et.al, 2000: 429) و (Villar et.al, 2010: 75)	علاوه بر کشش سطحی، تغییر فابریک رس و مشخصات شیمیایی آب از دیگر عوامل مؤثر در کاهش ظرفیت نگهداری آب، با افزایش دما می‌باشد.
نتیجه نهایی	در رابطه با رس بتونیت افزایش دما موجب کاهش ظرفیت نگهداری آب می‌شود.

۲- یافته‌ها

۲-۱- آزمایش تورم آزاد

یکی از مهمترین مزایای لایه‌ی مهندسی پوشش محافظه‌ی پسماندهای هسته‌ای، وجود تورم و قابلیت خودترمیمی است تا در صورت بروز ترک در این لایه، در اثر تورم بسته شود. لذا اولین سری از آزمایش‌های انجام شده مربوط به رفتار تورمی بتونیت می‌باشد. در این آزمایش نمونه رس با رطوبت بهینه (جهت دستیابی به چگالی بیشینه) نمونه‌سازی می‌گردد. در شرایط طبیعی وقتی آب با این خاک تماس برقرار می‌نماید، خاک شروع به تورم می‌نماید. در این تحقیق آب با دما و غلظت نمک متفاوت به نمونه اعمال شده و نتایج ارزیابی می‌گردند. بدیهی است خاکی که در اعماق زمین مدفون شده، فشار سربار زیادی نیز بر روی آن اعمال گردیده، لیکن برای مشاهده بهتر تأثیرات دما و نمک بر خاصیت تورمی از فشار سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال که مقدار کمتری نسبت به واقعیت دارد (معادل حدود ۵ متر عمق خاک) استفاده گردید. آزمایش در دماهای ۲۰ و ۵۰ و ۸۰ درجه و در غلظت‌های مختلفی از محلول نمک (۰/۵ و ۲ مولار) انجام شد و نتیجه نهایی مطابق نمودار شکل شماره ۸ استخراج گردید. برای نشان داده شدن بهتر نتایج، درصد تورم به صورت لگاریتمی ترسیم گردیده است.



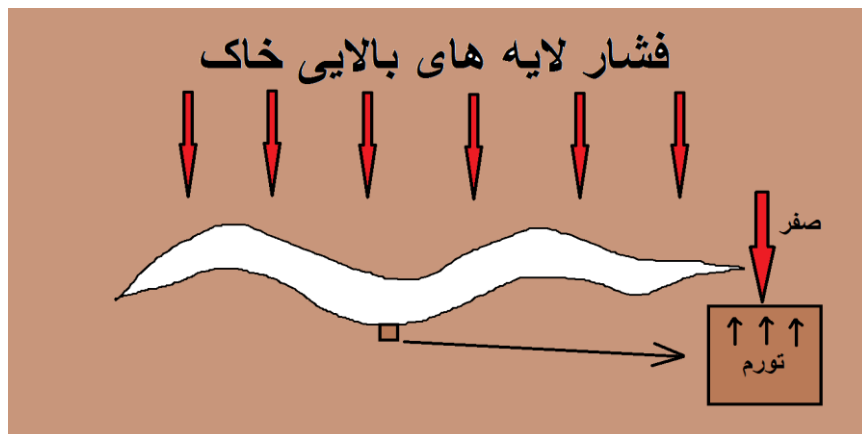
شکل شماره ۸. میزان تورم آزاد و نهایی نمونه‌ها در دما و غلظت‌های مختلف

نتیجه آزمایش این بود که دما و نمک باعث کاهش مقدار تورم در نمونه گردید که در این میان تأثیر کاهش دما را می‌توان از تأثیر دما چشم‌پوشی نمود.

علت این امر قرارگیری یون‌های نمک در لایه آب مضاعف میان دانه‌های رس به جای آب می‌باشد. با توجه به تمایل بیشتر دانه‌های رس به جذب یون‌های سدیم و کلر به جای مولکول دوقطبی آب، چند مولکول آب و یک مولکول نمک در ترکیب با دانه رس قرار می‌گیرد و در نتیجه حجم آب محبوس میان دانه‌های رس کاهش می‌یابد، بنابراین نمونه رسی تمایل کمتری برای جذب آب داشته و در نتیجه تورم کمتری خواهد داشت (به جای چند مولکول بزرگ آب، یک یون کوچک سدیم یا کلر جذب ساختار رس می‌شود).

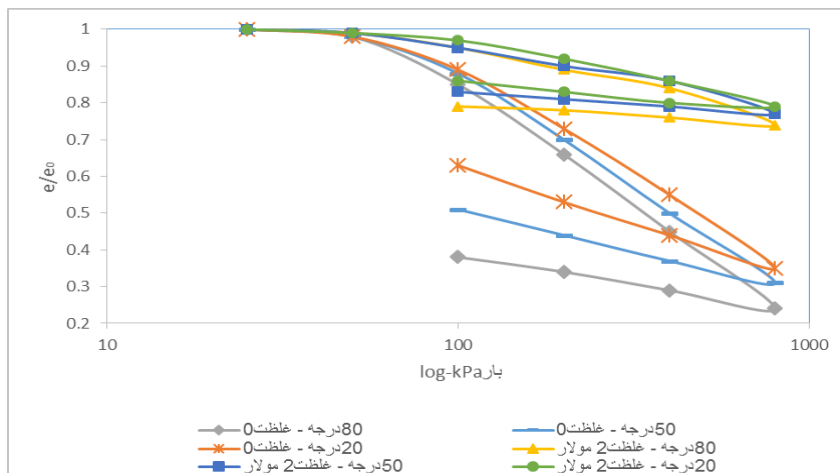
۲-۲- آزمایش تحکیم

همان‌گونه که در شکل شماره ۹ مشاهده می‌گردد، بنتونیت مصرف شده در مراکز دفن، تحت فشار سربار خاک هستند و در صورت بروز ترک، فشار خاک از المان‌های اطراف ترک برداشته شده و در نتیجه‌ی این باربرداری، نمونه شروع به تورم ناشی از باربرداری خواهد نمود. در این پژوهش توسط آزمایش تحکیم سعی شده تا این رفتار رس در شرایط مذکور مورد مطالعه قرار گیرد.



شکل شماره ۹. تورم بنتونیت بر اثر باربرداری طبیعی که بر اثر ترک خوردگی ایجاد می‌گردد

به منظور بررسی سرعت و میزان نشست نمونه‌ها، آزمایش تحکیم تحت تنش‌های ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰ کیلو پاسکال به صورت بارگذاری و باربرداری صورت گرفت.



شکل شماره ۱۰. نتایج آزمایش تحکیم در دما و غلظت‌های مختلف نمک

با توجه به شکل شماره ۱۰، نمونه‌هایی که بدون افزودن نمک مورد آزمایش واقع گردیده‌اند دارای نشست، تحکیم و تورم بیشتری نسبت به نمونه‌هایی می‌باشند که در معرض محلول نمک بوده‌اند. به طور کلی وجود نمک، ساختار پایدارتری به توده رس داده (ساختار فولکوله)، لذا باعث می‌شود در برابر بارهای وارده، نشست و تورم کمتری داشته باشد. با استفاده از روابط (۱-۲) و (۲-۲) و (۳-۲) و با در دست داشتن نتایج آزمایش تحکیم، می‌توان مقدار نفوذپذیری یا آبگذری نمونه‌ها را برآورد نمود.

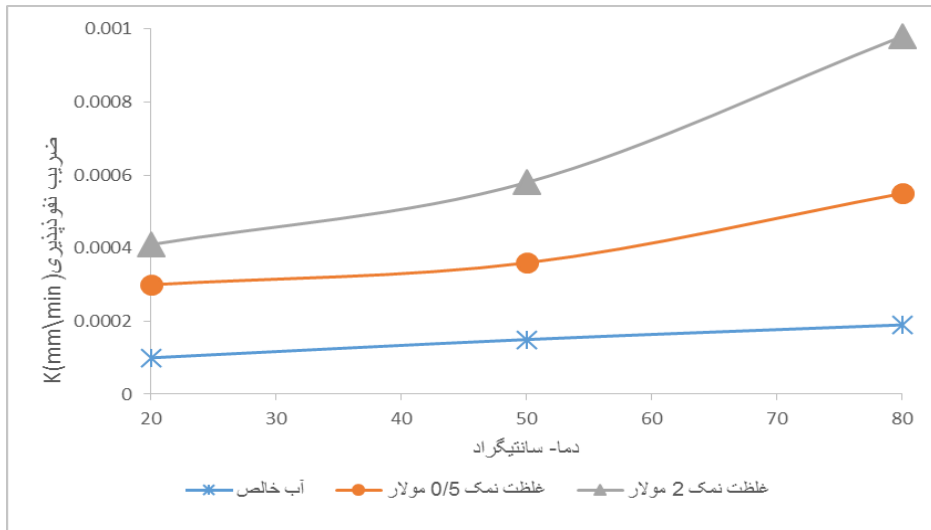
$$Mv = \frac{\Delta h}{h \cdot \Delta p} \quad (1-2)$$

$$Cv = \frac{Tv \cdot h'^2}{t} \quad (2-2)$$

$$K = \gamma_v \cdot m_v \cdot Cv \quad (3-2)$$

در روابط بالا m_v ضریب قابلیت فشرده‌گی حجمی، h ارتفاع اولیه نمونه، Δh تغییرات ارتفاع نمونه، Δp تغییرات تنش مؤثر، Cv ضریب تحکیم، h' حداکثر مسافت زهکشی، Tv

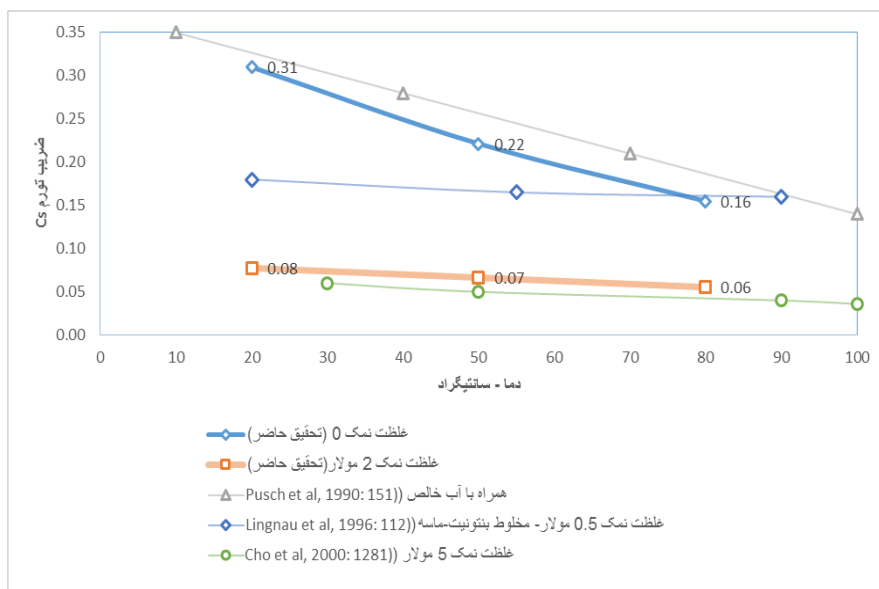
عامل زمان وابسته به درجه‌ی تحکیم، t مدت زمان از آغاز تحکیم، k ضریب نفوذپذیری و V_p وزن مخصوص محلول می‌باشد. نتایج بدست آمده برای ضریب نفوذپذیری در شکل شماره ۱۱ نمایش داده شده است.



شکل شماره ۱۱. تغییر نفوذپذیری با افزایش دما و غلظت نمک

با افزایش دما، نفوذپذیری (آبگذری) نمونه‌ها به دلیل افزایش سرعت حرکت آب در میان دانه‌های رس، افزایش می‌یابد. در غلظت‌های بالای نمک نیز به دلیل تغییر در ساختار قرارگیری دانه‌های رس از پراکنده به فولکوله (حالت مشبک و لانه زنبوری)، شاهد آبگذری بیشتری می‌باشیم.

با محاسبه و استخراج شیب منحنی مربوط به باربرداری (شکل شماره ۱۰)، نتایج شکل شماره ۱۲ که نشان‌دهنده ضریب تورم در دما و غلظت‌های مختلف می‌باشد، بدست می‌آید.



شکل شماره ۱۲. تغییرات ضریب تورم همگام با افزایش دما و غلظت نمک

نتایج استخراج شده حاکی از این بود که هم دما و هم افزایش مقدار نمک محلول، باعث کاهش مقدار تورم در نمونه‌ها می‌گردند، لکن در این میان تأثیر کاهندگی نمک به مراتب بیشتر از دما بوده است، لذا در غلظت‌های بالای نمک می‌توان از تأثیر دما صرف‌نظر نمود. نتایج سایر محققین نیز نشانگر کاهش ضریب تورم با افزایش دما و غلظت نمک محلول بوده است. به دلیل تفاوت در ساختار بنتونیت یک معدن با معدنی دیگر، نتایج تحقیقات محققین، دقیقاً مشابه یکدیگر نخواهند بود. برای همین لازم است تا هر کشوری مطالعات جداگانه‌ای بر روی نمونه‌های حاصله از معادن خود داشته باشد.

۳- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج آزمایش‌های صورت‌گرفته حاکی از این بود که در تورم آزاد (بدون اعمال بار) که تورم به دلیل جذب آب توسط دانه‌های بنتونیت رخ می‌دهد و نیز در تورم ناشی از باربرداری، میزان تورم بر اثر افزایش دما و نیز افزایش مقدار محلول نمک، کاهش می‌یابد. در رابطه با کاهش تورم، تأثیر افزایش غلظت نمک در کاهش تورم به مراتب بیشتر از افزایش دما می‌باشد، لذا در

غلظت‌های بالای نمک می‌توان از تأثیر دما صرف‌نظر نمود. در تحقیقات اجرایی بعدی می‌توان جهت سهولت در اجرای آزمایش‌ها و با استناد به آزمایش‌هایی که در تحقیق حاضر و نیز برخی از تحقیقات پیشین بعمل آمده، از اعمال دما و ساخت دستگاه‌های جدید صرف‌نظر نموده و به جای آن از وقت و نیرو در بررسی سایر موارد استفاده نمود.

با توجه به تأثیر افزایش غلظت نمک در کاهش خاصیت تورم و خودترمیمی، به منظور ایمنی بیشتر مراکز دفن، استفاده از لایه‌ی مانع مهندسی ضخیم‌تر پیشنهاد می‌گردد. همچنین در صورت استفاده از مخلوط ماسه و رس بتونیت در موارد اجرایی، پیشنهاد می‌شود به‌منظور افزایش پتانسیل تورم و خودترمیمی و کاهش نفوذپذیری، درصد ماسه در مخلوط ماسه-بتونیت، کاهش یابد.

با توجه به ساختار باردار دانه‌های رس، آزمایشات صورت گرفته وقتی واقعی خواهند بود که اثر تشعشعات بر ساختار رس، هم‌زمان با گرم شدن محیط اطراف سلول‌های پسماند هسته‌ای و عبور آب با املاح نمکی، توأم با هم مورد بررسی قرارگیرد. لذا مطالعه بر روی این موضوع در مواردی که تصمیم بر انجام مطالعات جدی‌تری گرفته شود، پیشنهاد می‌گردد.

منابع

خسروشاهی، محمد (۱۳۹۱)، لکه‌های زرد ۶۰ درصد ایران را فراگرفته است، قابل دسترسی در :

<http://hamshahronline.ir/details/197078>.

اطلس‌های زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی ایران، قابل دسترسی در:

<http://gsi.ir/fa/contents/html>. اطلس‌های زمین‌شناسی ایران.

Arifin, Y. F. (2008). Thermo-hydro-mechanical behavior of compacted bentonite-sand mixtures: an experimental study.

After 2017, available at <https://www.nukewatch.org/activemap/NWC-WIPP.html> .

Canadian Coalition for Nuclear Responsibility.

Cho, W. J., Lee, J. O., & Kang, C. H. (2000). Influence of temperature elevation on the sealing performance of a potential buffer material for a high-level radioactive waste repository. *Annals of Nuclear Energy*, 27(14), 1271-1284.

Dixon, D. A., Martino, J. B., Vignal, B., Masumoto, K., & Fujita, T. (2007). Overview of the evolution, performance and state of a bentonite-based tunnel seal after 5 years of operation. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32(8-14), 741-752.

Edwards, G. (2013). Consideration of Environmental Impacts on Temporary Storage of Spent Fuel After Cessation of Reactor Operation.

Edwards, G., & Time, A. (2012). Thinking outside the Nuclear Box.

Ewing, R. C., Weber, W. J., & Clinard Jr, F. W. (1995). Radiation effects in nuclear waste forms for high-level radioactive waste. *Progress in nuclear energy*, 29(2), 63-127.

Fuel, S. N. (1983). *Waste Management Company (SKB). Final Storage of Spent Nuclear Fuel—KBS-3, Summary*”, Stockholm.

Gibb, F. G. (1999). High-temperature, very deep, geological disposal: a safer alternative for high-level radioactive waste?. *Waste Management*, 19(3), 207-211.

Johannesson, L. E., Börgesson, L., Goudarzi, R., Sandén, T., Gunnarsson, D., & Svemar, C. (2007). Prototype repository: A full scale experiment at Äspö HRL. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32(1-7), 58-76.

Lennemann, W. L. (1978). The management of high-level radioactive wastes. *IAEA Bull*, 21(4), 1-16.

Lingnau, B. E., Graham, J., & Tanaka, N. (1995). Isothermal modeling of sand–bentonite mixtures at elevated temperatures. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(1), 78-88.

Lingnau, B. E., Graham, J., Yarechewski, D., Tanaka, N., & Gray, M. N. (1996). Effects of temperature on strength and compressibility of sand-bentonite buffer. *Engineering Geology*, 41(1-4), 103-115.

Manaugh, G. (2011). *Hadean Transport*, available at <http://www.bldgblog.com/tag/nuclear-waste>.

Nukewatch.org (2015). *LANL Management Contract Up For Bid*.

Parton, W. J., & Logan, J. A. (1981). A model for diurnal variation in soil and air temperature. *Agricultural Meteorology*, 23, 205-216.

Pusch, R., Karnland, O., & Hökmark, H. (1990). GMM-a general microstructural model for qualitative and quantitative studies of smectite clays (No. SKB-TR--90-43). Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

Romero, E., Gens, A., & Lloret, A. (2000). Temperature effects on water retention and water permeability of an unsaturated clay. In *Unsaturated soils for Asia. Proceedings of the Asian Conference on Unsaturated Soils, UNSAT-ASIA 2000, Singapore, 18-19 May, 2000* (pp. 433-438). AA Balkema.

Shariatmadari, N., & Saeidijam, S. (2012). The effect of thermal history on thermo-mechanical behavior of bentonite-sand mixture. *International Journal of Civil Engineering*, 10(2), 162-167.

Simmons, G. R., & Baumgartner, P. (1994). *The disposal of Canada's nuclear fuel waste: engineering for a disposal facility* (No. AECL--10715). Atomic Energy of Canada Limited.

Tang, A. M., & Cui, Y. J. (2005). Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(1), 287-296.

Villar, M. V., & Lloret, A. (2008). Influence of dry density and water content on the swelling of a compacted bentonite. *Applied Clay Science*, 39(1-2), 38-49.

Villar, M. V., Gómez-Espina, R., & Lloret, A. (2010). Experimental investigation into temperature effect on hydro-mechanical behaviours of bentonite. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2(1), 71-78.