مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۲-۲۸، شماره‌ی ۱، ص. ۸۹-۹۳، (یادداشت فنی)

مطالعه‌ی پایداری خصوصیات مهندسی و رئولوژیکی بنتونیت بر اثر تغییرات درجه حرارت در دفن زباله‌های اتمی

وحیدرضا اوحدی * **(استاد)**
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان
امیررضا گودرزی (استادیار)
دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان

بنتونیت به‌دلیل داشتن خصوصیات مهندسی ویژه، نظیر قابلیت تورم و جذب آب زیاد، در طراحی مراکز دفن زباله‌های اتمی کاربرد دارد. پایداری خصوصیات بنتونیت، مهم‌ترین عامل در عملکرد مطلوب مرکز دفن محسوب می‌شود. در این پژوهش با انجام یک سری آزمایش‌های رفتاری در دماهای مختلف، سازوکارهای تغییر رفتار بنتونیت مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که خصوصیات مهندسی و رئولوژیکی (سیلان‌شناختی) بنتونیت تحت اثر افزایش حرارت تغییر می‌کند. با افزایش گرما تا محدوده‌ی ۲۰۰ °C، ظرفیت جذب و نگه‌داری آب بنتونیت حدود ۱۵ درصد و میزان تورم خاک حدود ۸ درصد کاهش می‌یابد. براساس نتایج آزمایش‌های ویسکومتری و XRD، علت تغییر خصوصیات بنتونیت در مجاورت کوتاه‌مدت گرما را می‌توان به تغییر آرایش پولک‌های رسی و جمع‌شدگی ماندگار ساختار خاک نسبت داد.

واژگان کلیدی: زباله‌ی رادیواکتیو، حرارت، بنتونیت، تغییر ریزساختار، تغییر خصوصیات مهندسی، XRD.

vahidouhadi@yahoo.ca
amir_r_goodarzi@yahoo.co.uk

مقدمه

در دو دهه‌ی اخیر، کاربرد مواد رادیواکتیو در تولید انرژی هسته‌یی و فنّاوری‌های نوین پزشکی و صنعتی چنان گسترش یافته که پس از طی مراحل خاص بهره‌برداری، بخشی از این مواد بدون استفاده می‌ماند که باعنوان زباله‌ی رادیواکتیو[1] شناخته می‌شود. با توجه به خطرات ناشی از پرتوزایی این‌گونه زباله‌ها، لازم است دفن مهندسی آن‌ها با رعایت تدابیری خاص انجام شود. تجارب بین‌المللی نشان می‌دهند که بهترین گزینه برای جلوگیری از پراکنش‌های پرتوهسته‌یی (رادیونوکلئیک) مضرِ زباله‌های هسته‌یی در محیط زیست، دفن آن‌ها در اعماق زمین در محل‌هایی با سنگ بستر پایدار[2] است.[1] بدین‌منظور ابتدا شبکه‌یی از تونل‌های به‌هم پیوسته در اعماق زمین (حدود ۲۰۰ تا ۵۰۰ متری) ایجاد می‌شود و سپس با قراردادن ظروف نگه‌دارنده‌ی فلزی[3] حاوی زباله‌های هسته‌یی درون تونل‌ها، اطراف آن‌ها به‌وسیله‌ی لایه‌ی محافظ رسی پوشانده می‌شود.[2و3] مهم‌ترین هدف از اجرای این لایه‌ی محافظ، جلوگیری از تماس مستقیم آب زیرزمینی با ظروف نگه‌دارنده‌ی زباله‌های هسته‌یی است تا اولاً مانع از پوسیدگی آن شود؛ ثانیاً درصورت هرگونه پوسیدگی احتمالی از نفوذ تشعشعات هسته‌یی به چرخه‌ی آب‌های زیرزمینی جلوگیری شود.[4] جنس مصالح مورد استفاده در لایه‌ی محافظ، عمدتاً بنتونیت (جزء رس‌های خانواده اسمکتیت) بوده که به‌دلیل خمیرسانی زیاد، پتانسیل جذب آب، خاصیت خودترمیمی[4] و پتانسیل تورم زیاد بهترین گزینه برای تأمین اهداف مورد نظر از اجرای لایه‌ی محافظ محسوب می‌شود.[5]

از طرفی با توجه به مدت زمان طولانی عمر مفید طراحی مراکز دفن زباله هسته‌یی (زمانی حدود یکصدهزارسال)، اطمینان از عملکرد مناسب طرح تابعی از روش طراحی و شرایط پایداری ساختار سیستم لایه‌ی محافظ رسی است.[6] موضوع اصلی در این زمینه گرمای ناشی از زوال مواد رادیواکتیو زباله‌هاست. سطح گرمای تولیدشده برحسب شرایط مرکز دفن و نوع زباله‌ها متغیر است و در محدوده‌ی ۱۰۰ °C تا ۲۵۰ °C برای مراکز دفن مختلف گزارش شده است.[4و7] انتظار می‌رود انتقال گرما به لایه‌ی محافظ رسی، به ایجاد تغییراتی در خصوصیات رفتاریِ مصالح بافرِ مورد استفاده در آن بینجامد.[8] براین اساس، یکی از موارد تعیین‌کننده در ارزیابی رفتار مطمئن این نوع مراکز دفن، توجه به تغییرات احتمالی در خصوصیات رفتاریِ بافرِ محصورکننده‌ی اطراف زباله‌های رادیواکتیو براثر استقرار آن در مجاورت گرمای حدوداً ۲۰۰ °C است. علی‌رغم اهمیت این موضوع تاکنون تحقیقات محدودی در این خصوص انجام شده است. براین اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر مطالعه‌ی پایداری خصوصیات مهندسی و رئولوژیکی (سیلان‌شناختی) بنتونیت براثر تغییرات درجه حرارت است.

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۸۸/۳/۳۰، اصلاحیه ۱۳۸۹/۳/۲، پذیرش ۱۳۸۹/۶/۲۱.

مواد و روش انجام آزمایش‌ها

مصالح بافر مورد استفاده در مراکز دفن زباله هسته‌یی عمدتاً خاک بنتونیت است.[۳] بنابراین کلیه‌ی آزمایش‌های مورد نظر در مطالعه‌ی حاضر نیز بر روی خاک بنتونیت با ساختار پراکنده صورت گرفته است. نمونه بنتوینت مورد مطالعه از شرکت ایران باریت تهیه شد. خصوصیات نمونه‌ی بنتونیت مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.[۹]

خصوصیات نگه‌داشت آب و خصوصیات تورمی خاک بنتونیت به‌عنوان لایه‌ی محافظ، اهمیت به‌سزایی در جلوگیری از تماس مستقیم آبِ زیرزمینی با ظروف نگه‌دارنده‌ی حاوی زباله‌های هسته‌یی و ممانعت از احتمال پوسیدگی آن‌ها خواهد داشت.[۱۰] در این راستا، با انجام یک سری آزمایش‌های مرتبط با شرایط اندرکنش خاک ـ آب شامل حدود اتربرگ، آزمایش مکش و آزمایش تورم، و نیز احتمال تغییر خصوصیات رفتاری خاک در شرایط تغییر درجه حرارت مورد مطالعه و تحقیق قرارگرفته است. بدین‌منظور نمونه‌های اشباع‌شده‌ی بنتونیت برای مدت ۷۲ ساعت در پنج دمای مختلف ــ شامل ۲۵ °C، ۵۰ °C، ۱۰۰ °C، ۱۵۰ °C و ۲۰۰ °C ــ نگه‌داری و سپس مورد آزمایش قرارگرفته‌اند. نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش‌های مکش و تورم، ابتدا با نسبت مساوی آب به خاک تهیه و سپس در سلول‌های پیش بارگذاری تا تنش ۸۰ کیلوپاسکال متراکم شدند. در ادامه، با کسب اطمینان از تراکم یکسان نمونه‌ها و با استفاده از رینگ‌های برنجی با قطر ۵ سانتی‌متر، از خاک متراکم نمونه‌گیری شد و پس از ایجاد شرایط حرارتی لازم، آزمایش‌های مورد نظر انجام شد. نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمایش حدود اتربرگ، ابتدا تحت شرایط حرارتی مورد نظر قرارگرفتند و پس از اشباع مجدد و نگه‌داری در ظروف دربسته‌ی پلاستیکی به‌مدت ۹۶ ساعت، طبق استاندارد ASTM آزمایش شدند.[۱۱] برای ارزیابی طیف XRD نمونه‌های بنتونیت حرارت داده شده، ابتدا نمونه‌های لازم برای انجام آزمایش بر روی لام شیشه‌یی تهیه[۱۲] و سپس با استفاده از دستگاه Siemens-Diffractometer D8 Advance مورد آزمایش قرارگرفتند. به‌منظور ارزیابی علت تأثیر تغییرات درجه حرارت بر ریزساختار بنتونیت، علاوه بر آزمایش XRD یک سری آزمایش ویسکومتری نیز انجام شده است.

نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمایش ویسکومتری، ابتدا در قالب ترکیب آب و خاک با نسبت ۱:۲۰ تهیه و پس از شرایط تعادل‌سازی، ویسکوزیته‌ی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه ویسکومتر مدل Brookfield DV-II +Pro اندازه‌گیری شده است.

جدول ۱. خصوصیات بنتونیت مورد مطالعه.

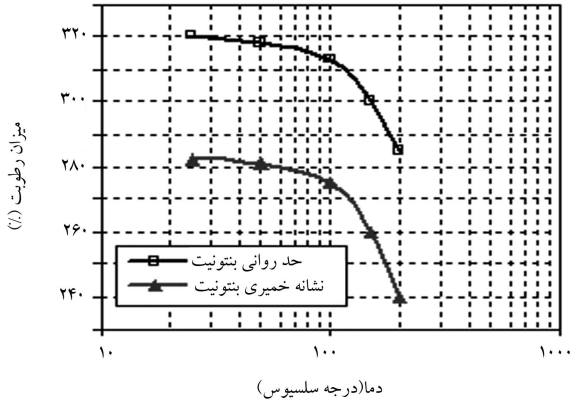
خصوصیات فیزیکی	
حد روانی (٪)	۳۱۴٫۵
دامنه خمیری (٪)	۲۸۳٫۳
طبقه‌بندی خاک	CH
چگالی دانه‌های جامد	۲٫۷۹
درصد رس (٪)	۷۶
درصد لای (٪)	۲۳
درصد ماسه (٪)	۱
خصوصیات ژئوتکنیک زیست‌محیطی	
pH	۱۰
EC (dS/m)	۰٫۶۴
Na^+ (cmol/kg-soil*)	۴۸٫۵
Ca^{2+} (cmol/kg-soil)	۱۴٫۲
Mg^{2+} (cmol/kg-soil)	۳٫۴
K^+ (cmol/kg-soil)	۲٫۱
CEC (cmol/kg-soil)	۶۸٫۲

*cmol/kg-soil: سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک.

بحث و تحلیل داده‌های اخذشده

در دفن مهندسی زباله‌های اتمی، استفاده از مصالحی با ظرفیت قابل توجه در نگه‌داشت آب و خاصیت بافرینگ زیاد ازجمله شروط اصلی مصالح مورد استفاده در لایه‌ی محافظ رسی است. همچنین لازم است این مصالح در تغییرات شرایط محیطی و حرارتی، خصوصیات مهندسی اولیه‌ی خود (ازجمله ظرفیت نگه‌داشت آب) را به‌خوبی حفظ کنند. براین اساس باتوجه به ارتباط نزدیک نتایج حدود اتربرگ با ظرفیت نگه‌داشت آب و شکل‌پذیری خاک، تأثیر حرارت بر حدود اتربرگ بنتونیت مورد مطالعه قرارگرفت (شکل ۱). چنان‌که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، با افزایش سطح درجه حرارت اعمال‌شده به خاک، حد روانی و نشانه‌ی خمیری خاک کاهش می‌یابد به‌طوری‌که در نمونه‌ی حرارت داده‌شده تا دمای ۲۰۰ °C، نسبت به بنتونیت اولیه، حد روانی و نشانه‌ی خمیری خاک حدود ۱۰٪ کاهش نشان می‌دهد. روند کاهش حدود اتربرگ بنتونیت بر اثر افزایش درجه حرارت، نشان‌گر کاهش ظرفیت نگه‌داشت آب و کاهش خمیرسانی بنتونیت است و عاملی در راستای کاهش کارایی مطلوب مصالح بافر محسوب می‌شود.

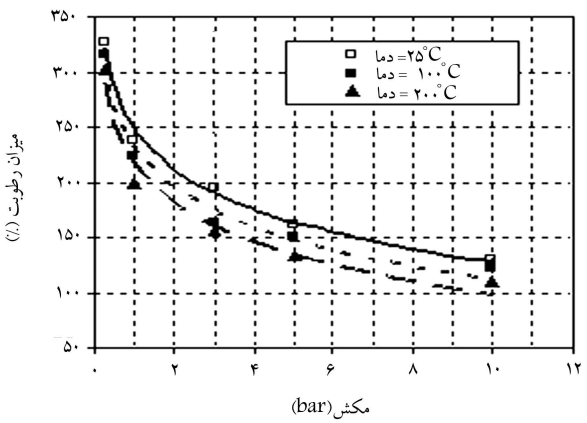
با توجه به تأثیر ظرفیت نگه‌داشت آب برای نیل به اهداف مورد نظر در طراحی لایه‌ی محافظ رسی و اهمیت این مسئله بر عملکرد مطمئن طولانی‌مدت مرکز دفن زباله‌ی هسته‌یی، علاوه بر بررسی حدود اتربرگ با انجام آزمایش‌های مکش، تأثیر تغییر درجه حرارت بر تغییرات پتانسیل نگه‌داری آب توسط خاک مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرارگرفته است (شکل ۲). نتایج حاصله نشان‌دهنده‌ی آن است که منحنی ظرفیت نگه‌داشت آب توسط خاک در شرایط یکسان فشار، براثر افزایش



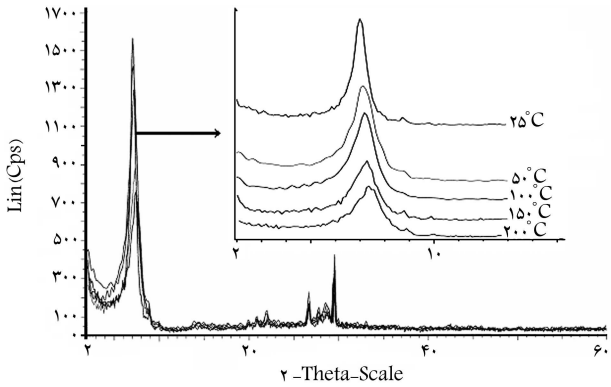
شکل ۱. تغییرات حدود اتربرگ بنتونیت پس از اعمال حرارت.

درجه حرارت تغییر می‌کند، به‌طوری‌که ظرفیت نگه‌داشت آب در بنتونیتِ حرارت داده شده تا ۲۰۰ °C نسبت به نمونه‌ی اولیه حدود ۱۵٪ کاهش یافته است. تغییرات به وجود آمده در شکل ۲ هم‌راستا با نتایج شکل ۱ است و نشان می‌دهد که بر اثر افزایش حرارت، میزان نگه‌داری آب توسط بنتونیت روند کاهشی دارد.

علت تغییرات رفتاری مشاهده شده در نتایج شکل‌های ۱ و ۲ با توجه به یکسان‌بودن شرایط آماده‌سازی نمونه‌ها و مایع منفذی (آب‌مقطر) را می‌توان ناشی از دو عامل متفاوت دانست. عامل اول عبارت است از فرض تغییر در کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی خاک براثر تغییرات شرایط حرارتی. با فرض عدم تغییر در کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی خاک، دومین عامل ممکن در تغییر روند منحنی‌های ارائه‌شده در شکل‌های ۱ و ۲ را می‌توان به تغییر آرایش و نحوه‌ی قرارگیری ذرات رسی بر اثر تغییرات درجه حرارت نسبت داد؛ زیرا در شرایط عدم تغییر نیروهای خارجی، تغییر رفتار خاک‌های ریزدانه را صرفاً می‌توان ناشی از تغییر آرایش و نحوه‌ی قرارگیری پولک‌های رسی براثر تغییر شرایط نیروهای داخلی بین ذرات ارزیابی کرد.[۱۳] در شرایط مورد بحث و با فرض عدم تغییر در نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی خاک، افزایش حرارت و دی‌هیدراته‌شدن پولک‌های رسی سبب افزایش غلظت الکترولیت‌های لایه‌ی دوگانه، کاهش نیروهای دافعه بین پولک‌های رسی، و نهایتاً کاهش پراکندگی قابل توجه در ساختار اولیه‌ی بنتونیت شده است. به‌طوری‌که به‌واسطه‌ی جمع‌شدگی ساختار و کاهش فضای مابین پولک‌های رسی، قابلیت نگه‌داشت آب توسط خاک کاهش خواهد یافت. به‌منظور تعیین قطعیِ علت تغییر خصوصیات مهندسی خاک بنتونیت در شرایط مختلف تغییر حرارت، با انجام آنالیز اشعه‌ی X نسبت به تجزیه و تحلیل مشخصات ریزساختاری نمونه‌ها اقدام، و نتایج آن در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج



شکل ۲. تغییرات ظرفیت نگه‌داشت آب توسط بنتونیت در اثر افزایش حرارت.



شکل ۳. تغییر مشخصات ریزساختاری بنتونیت پس از حرارت دادن و اشباع مجدد.

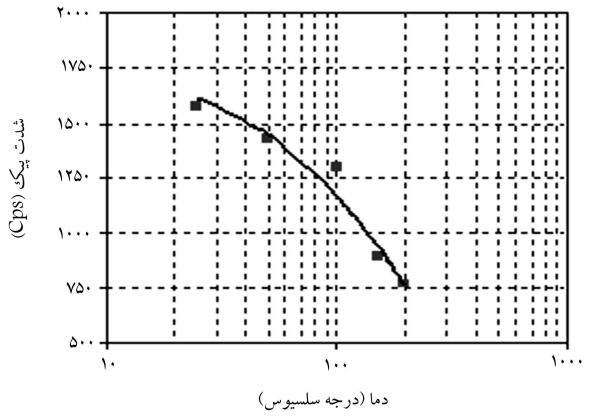
طیف اشعه‌ی X نمونه‌ها در شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش حرارت، موقعیت پیک اصلی بنتونیت (۱۲٫۴۱Å) تغییری نکرده ولی شدت پیک اصلی بنتونیت کاهش یافته است. عدم تغییر موقعیت پیک معرف بنتونیت براثر افزایش حرارت، بیان‌گر عدم تغییر در کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی خاک است.

از سوی دیگر با توجه به ارتباط شدت پیک طیف اشعه‌ی X با پراکندگی در ساختار خاک،[۱۲] براساس نتایج ارائه‌شده در شکل ۴ می‌توان نتیجه گرفت که روند کاهش شدت پیک اصلی خاک بر اثر مجاورت با گرما، تحت تأثیر جمع‌شدگی ساختار خاک و ناشی از دی‌هیدراته‌شدن پولک‌های رسی بوده است. این نتیجه‌گیری با نتایج ارائه‌شده توسط دیگر محققین به‌خوبی مطابقت دارد.[۱۴،۱۵] به‌طوری که پس از اشباع مجدد بنتونیت با آب مقطر، امکان برگشت بخشی از تغییر ساختار ایجادشده به‌دلیل تغییر شرایط بار روی پولک‌های رسی[۱۰] مهیا نبوده است. در اثر تغییر ریزساختار خاک و شکل‌گیری توزیع جدیدی از فضای مابین سطوح رسی، تغییر رفتار فیزیکی ـ مکانیکی بنتونیت مورد انتظار است،[۱۳] که نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در شکل‌های ۱ و ۲ مؤید این موضوع است.

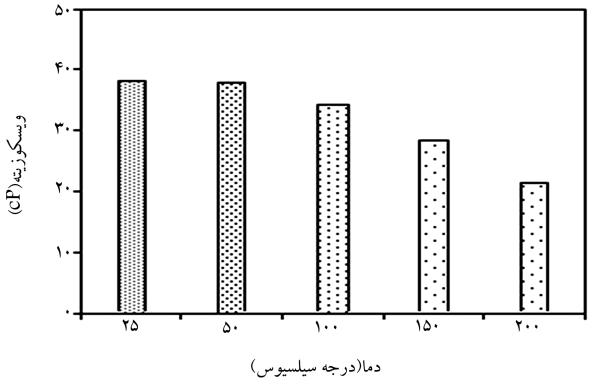
با توجه به تأثیر افزایش حرارت در عدم پایداری خصوصیات مهندسی مصالح بافر و اهمیت مهندسی آن در عملکرد مناسب مصالح بافر، به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر علل تغییرات مشاهده شده، انجام آزمایش ویسکوزیته در دستور کار قرار گرفت. تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد که تغییرات ویسکوزیته‌ی خاک ارتباط نزدیکی با تغییرات شرایط ریزساختار و نوع آرایش پولک‌های رسی دارد.[۱۶] افزون بر این، به‌واسطه‌ی امکان دست‌یابی به نمونه‌های همگن در انجام آزمایش ویسکوزیته برای نمونه‌های عمل‌آوری شده، انجام این آزمایش بر انجام آزمایش نفوذپذیری ترجیح داده شد.

نتایج تغییرات ویسکوزیته‌ی بنتونیت در درجه حرارت مختلف، در شکل ۵ ارائه شده است. براساس نتایج ارائه‌شده در این شکل مشاهده می‌شود که براثر تغییر درجه حرارت، و در شرایط یکسان انجام آزمایش و ثابت بودن نوع کانی رسی، ویسکوزیته‌ی سوسپانسیون خاک ـ آب مقطر کاهش یافته است. با توجه به توضیحات قبلی، علت اصلی تغییر رفتار فوق به‌واسطه‌ی تغییر در آرایش پولک‌های رسی و تغییر در ریزساختار خاک بوده است که این نتیجه‌گیری با نتایج دیگر محققین انطباق مناسبی دارد.[۱۷]

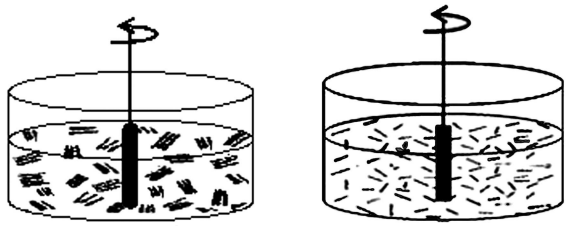
در شکل ۶ این رفتار به‌طور شماتیک توصیف شده است. در واقع در آزمایش تعیین ویسکوزیته برای نسبت مشخصی از سوسپانسیون خاک ـ آب (و با فرض



شکل ۴. کاهش شدت پیک اصلی بنتونیت در طیف اشعه‌ی ایکس براثر افزایش گرما.



شکل ۵. تأثیر حرارت بر تغییرات ویسکوزیته نمونه‌های سوسپانسیون بنتونیت.



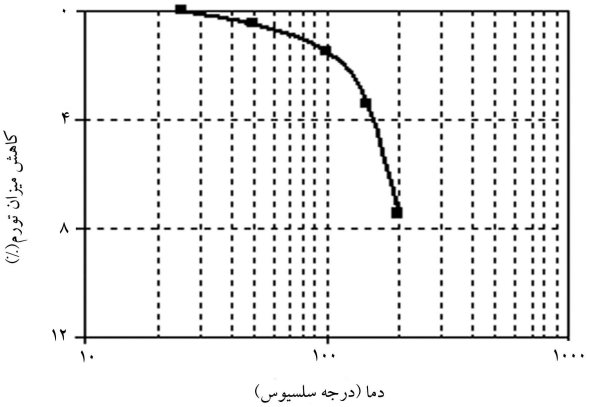
الف) ساختار پراکنده؛ (تماس زیاد پولک های پراکنده رس با اسپیندل)

ب) ساختار توده‌یی. (کاهش تماس کلوئیدهای رسی با اسپیندل)

شکل ۶. نمایش شماتیک تأثیر ریزساختار خاک بر میزان ویسکوزیته‌ی سوسپانسیون.

وجود کانی رسی مشخص) هرچه پراکندگی ذرات رسی بیشتر باشد، با توجه به عدم امکان رسوب پولک‌های سبک رسی و تماس بیشتر پولک‌ها با استوانه‌ی مدور[5] دستگاه ویسکومتر، سوسپانسیون از ویسکوزیته‌ی بیشتری برخوردار است. به‌عبارتی کاهش ویسکوزیته‌ی مشاهده‌شده در شکل ۵، ناشی از ایجاد ساختاری توده‌یی (جمع‌شدگی) در بافت پولک‌های بنتونیت است که با نتایج آزمایش‌های اشعه‌ی ایکس نیز هم‌خوانی قابل توجهی نشان می‌دهد.

از سوی دیگر، براساس نتایج تحقیقات سایر محققین، عملکرد مطلوب بنتونیت به‌عنوان مصالح مناسب محصورکننده در اطراف زباله‌های رادیواکتیو (خصوصاً قابلیت خودترمیمی آن)، علاوه بر نحوه‌ی نگه‌داشت آب توسط خاک، تابعی از قابلیت تورم خاک است.[۲و۳] به‌بیان دیگر، تورم بین لایه‌یی و بین پولکی بنتونیت سبب انسداد ریزترک‌های ایجادشده در بنتونیتِ متراکم می‌شود. این ویژگی که



شکل ۷. تغییرات قابلیت تورم مصالح بافر بنتونیتی در اثر افزایش حرارت.

اصطلاحاً «قابلیت خودترمیمی» نامیده می‌شود، سبب بهبود عملکرد طولانی‌مدت لایه‌ی محافظ رسی می‌شود. براین اساس، در مطالعه‌ی حاضر علاوه بر آزمایش‌های قبلی، رفتار تورمی نمونه‌های بنتونیت قبل و پس از حرارت مورد بررسی قرارگرفت. در شکل ۷ تغییرات تورم نمونه‌ی بنتونیت در مقابل تغییرات درجه حرارت ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود، با افزایش درجه حرارت اعمال شده به نمونه‌ی بنتونیت، تورم خاک کاهش می‌یابد. میزان کاهش تورم نمونه‌ی بنتونیت حرارت داده شده تا $200\ ^\circ C$ نسبت به نمونه‌ی اولیه حدود ۸ درصد بوده است.

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های ریزساختاری، علت کاهش تورم خاک را می‌توان ناشی از عدم برگشت بخشی از ساختار خاک در زمان هیدراته‌شدن مجدد پولک‌های رسی حرارت داده شده دانست. ایجاد جمع‌شدگی ماندگار در ساختار و کاهش قابلیت تورم خاک در نتایج پژوهش حاضر، در شرایط اجرایی سبب کاهش اتصال بین لایه‌ی محافظ و ظروف نگه‌دارنده‌ی زباله رادیواکتیو و کاهش خصوصیات خودترمیمی بنتونیت می‌شود.[۴] تغییرات ایجادشده احتمال حضور آب در مجاورت ظروف نگه‌دارنده‌ی زباله رادیواکتیو را افزایش داده و در نهایت تهدیدی در راستای انتشار آلودگی رادیواکتیو به چرخه‌ی آب‌های زیرزمینی محسوب می‌شود.

یکی از نکات حائز اهمیت در مجموعه نتایج آزمایش‌های فیزیکی، رئولوژیکی و ریزساختاریِ پژوهش حاضر آن است که روند تغییرات ایجادشده در خصوصیات رفتاری بنتونیت در شرایط حرارتی متفاوت، در دو محدوده‌ی متمایز قابل تفکیک است. عمده‌ی تغییرات رفتاری خاک در محدوده‌ی دماهای بالاتر از $100\ ^\circ C$ بوده و در محدوده دماهای کم‌تر از $100\ ^\circ C$ خصوصیات مهندسی خاک تغییرات کم‌تری داشته است. براساس نتایج حاصله، کنترل زمان لازم برای خنک‌سازی[6] زباله‌ها قبل از انتقال به مرکز دفن (به‌منظورکنترل سطح دمای زباله‌های رادیواکتیو در زمان دفن آن‌ها) را می‌توان یکی از روش‌های مؤثر در افزایش ضریب اطمینان طراحی و عملکرد مطلوب مراکز دفن زباله برشمرد. یادآور می‌شود که تغییرات رفتاری مشاهده‌شده در دماهای بالاتر از $100\ ^\circ C$ نیز محدود بوده که این موضوع بیانگر شرایط رفتاری ویژه‌ی بنتونیت به‌عنوان مناسب‌ترین مصالح بافر برای ایزوله‌کردن مراکز دفن مهندسی زباله‌های اتمی است.

نتیجه‌گیری

۱. قابلیت نگه‌داشت آب در نمونه‌ی رسی بنتونیت بر اثر افزایش درجه حرارت اعمال شده به خاک کاهش می‌یابد. روند تغییرات ایجادشده به‌دلیل تأثیر کاهشی بر قابلیت تورم و شکل‌پذیری خاک، تهدیدی در راستای عملکرد مطلوب بنتونیت به‌عنوان مصالح بافر ایزوله‌کننده‌ی اطراف زباله‌های رادیواکتیوی محسوب می‌شود.

۲. براساس نتایج آزمایش‌های ریزساختاری پژوهش حاضر، علت تغییر خصوصیات مهندسی بنتونیت در مجاورت کوتاه‌مدت گرما، ناشی از تغییر آرایش ذرات رسی و جمع‌شدگی ماندگار ساختار قابل توجیه است. تغییرات ایجادشده سبب شکل‌گیری توزیع جدیدی از فضای مابین سطوح رسی شده و براثر آن، شرایط اندرکنش خاک ـ آب تغییر می‌کند.

۳. با افزایش درجه حرارت، روند تغییرات ایجادشده در خصوصیات مهندسی بنتونیت، تابعی از میزان تغییر درجه حرارت نمونه بوده و عمدتاً در دماهای بالاتر از $100\ ^\circ C$ اتفاق می‌افتد. در محدوده‌ی دماهای کم‌تر از $100\ ^\circ C$ تغییرات خصوصیات مهندسی خاک اندک است.

پانوشت

1. Radioactive waste
2. stable bedrock
3. canister
4. self-sealing behavior
5. spindle
6. cooling period

منابع

1. McKinley, I.G.; Neall, F.B.; Kawamura, H. and Umeki, H. "Geochemical optimization of a disposal system for high-level radioactive waste", *Geochemical Exploration,* **90**, pp. 1-8 (2006).
2. Pusch, R.; Kasbohm, J.; Pacovsky, J. and Cechova, Z. "Are all smectite clays suitable as "buffers"?", *Physics and Chemistry of the Earth,* **32**, pp. 116-122 (2007).
3. Pusch, R. "The performance of clay barriers in repository for high-level radioactive waste", *Nuclear Engineering and Technology,* **38**, pp. 483-488 (2006).
4. SKB, SR-97, *Waste, Repository Design and Sites, SKB Technical Report TR-99-08,* Stockholm, Sweden (1999).
5. Wersin, P.; Johnson, L.H. and McKinley, I.G. "Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100 °C: A critical review", *Physics and Chemistry of the Earth,* **32**, pp. 780-788 (2007).
6. Samper, J.; Zheng, L.; Montenegro, L.; Fernandez, A.M. and Rivas, P. "Coupled thermo-hydro-chemical models of compacted bentonite after FEBEX in situ test", *Applied Geochemistry,* **23**, pp. 1186-1201 (2008).
7. Imbert, C.; Olchitzky, E.; Lassabate´re, T.; Dangla, P. and Courtois, A. "Evaluation of a thermal criterion for an engineered barrier system", *Engineering Geology,* **81**, pp. 269-283 (2005).
8. Vinsova, H.; JedinakovaKrızova, V.; Kolarıkova, I.; Adamcova, J.; Prikryl, R. and Zeman, J. "The influence of temperature and hydration on the sorption properties of bentonite", *Environmental Radioactivity,* **99**, pp. 415-425 (2008).
9. Ouhadi, V.R. and Goodarzi, A.R. "Assessment of the stability of a dispersive soil treated by alum", *Engineering Geology,* **85**, pp. 91-101 (2006).
10. Plötze, M.; Kahr, G.; Dohrmann, R. and Weber, H. "Hydro-mechanical, geochemical and mineralogical characteristics of the bentonite buffer in a heater experiment: The HE-B project at the mont terri rock laboratory", *Physics and Chemistry of the Earth,* **32**, pp. 730-740 (2007).
11. ASTM, *American Society for Testing and Materials,* Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, **4.08** p.998 (1994).
12. Ouhadi, V.R.; Yang, R.; Bayesteh, H. and Goodarzi, A.R. "Influence of potential determining ions on the micro structural performance and contaminant adsorption of a hominid illicit clay", *Journal of Water, Air & Soil Pollution,* **18**, pp. 77-93 (2006).
13. Anandarajah, A. and Zhao, D. "Triaxial behavior of kaolinite in different pore fluids", *Journal of Geotechnical and Geioenvironmental Engineering,* **126**, pp. 148-155 (2000).
14. Moore, D.M. and Reynolds, R.C., *X-Ray Diffraction and Identification and Analysis of Clay Minerals,* Oxford University, Press, New York (1989).
15. Neaman, A.; Pelletier, M. and Villieras, F. "The effects of exchanged cation, compression, heating and hydration on textural properties of bulk bentonite and its corresponding purified montmorillonite", *Applied Clay Science,* **22**, pp. 153-168 (2003).
16. van Olphen, H., *An introduction to Clay Colloid Chemistry,* Wiley Inter-science, New York, pp. 301 (1977).
17. Abend, S. and Lagaly, G. "Sol-gel transitions of sodium montmorillonite dispersions", *Applied Clay Science,* **16**, pp. 201-227 (2000).