

ثبتیت کباتل و کادمیم در رس‌های خاک به کمک انرژی حرارتی

مصطفی چرم و سیروس جعفری^۱

چکیده

آلودگی یکی از گرفتاری‌های بشر کنونی است، و از منابع مهم آن، ضایعات رادیواکتیو و فلزات سنگین می‌باشد. خاک مهم‌ترین مکان برای دفع ضایعات هسته‌ای است، و در میان اجزای خاک، رس بیشترین نقش را در نگهداری این ضایعات دارد. عمر پایداری ساختمان رس‌ها نسبت به نیمه عمر اغلب عناصر رادیواکتیو بیشتر است. بنابراین، با ثبتیت این عناصر در رس‌ها می‌توان از انتشار آنها در محیط جلوگیری کرد. گزارش‌ها نشان می‌دهد که رس‌ها می‌توانند انباره بسیار مناسبی برای ثبتیت عناصر آلوده کننده باشند، ولی در مورد نقش نوع رس در ثبتیت عناصر زاید و ساز و کار این ثبتیت در رس‌ها اطلاعات کافی و شواهد آزمایشی مستدلی در دسترس نیست. از این‌رو، هدف از انجام این پژوهش بررسی میزان ثبتیت عناصر سنگین کباتل و کادمیم در دو نوع خاک رسی اهواز و داراب فارس به کمک انرژی حرارتی بوده است. پس از خالص‌سازی، رس‌ها با کادمیم و کباتل اشبع و برای شش ساعت در دمای ۲۵، ۲۰۰ و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند. مقدار کاتیون قابل تبادل با منیزیم عصاره‌گیری شد.

در رس‌های اشبع شده با کباتل، با افزایش دما از ۲۵°C تا ۴۰۰°C، کاهش در بار الکتریکی آشکارا دیده شد، به طوری که ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به ترتیب برای خاک اهواز و داراب از ۳۵/۶ و ۵۰/۱ به ۲۸/۱ و ۱۴/۵ cmol_{c+/kg} کاهش یافت. در رس‌های اشبع شده با کادمیم این کاهش بار الکتریکی خفیف‌تر بود، و پس از حرارت دادن در ۴۰۰°C CEC به ترتیب از ۳۴/۳ و ۳۲/۵ به ۴۷/۷ و ۵۱/۲ cmol_{c+/kg} کاهش پیدا کرد. بنابراین، می‌توان تغییرات ایجاد شده را به انتقال کباتل به داخل ساختمان رس نسبت داد. در صورتی که عنصر کادمیم با شعاع یونی بزرگ‌تر (۹۷ Å/۰)، نمی‌تواند به ساختمان رس داخل شود. کمی تغییر در بار الکتریکی و فضاهای بین لایه‌ای دلیلی بر این مدعاست. از این نتایج می‌توان برای دفع ایمن و بدون خطر ضایعات رادیواکتیو استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: عناصر آلاند، بار الکتریکی، ثبتیت کاتیون، کائی‌شناختی، پراش پرتوایکس

۱. به ترتیب استادیار و دانشجوی سابق کارشناسی ارشد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

مقدمه

شندن خسارات جیران ناپذیری به محیط زیست و منابع طبیعی

گردید، و هنوز هم ادامه دارد (۱).

آلودگی فلزات سنگین ممکن است منشأ کشاورزی و یا صنعتی داشته باشد. فلزات سنگین عناصری چون کادمیم، جیوه، نیکل، سرب، روی، کبالت و غیره هستند که وزن مخصوص حقیقی آنها از پنج گرم در سانتی متر مکعب بیشتر است. کادمیم ممکن است از طریق کودهای فسفاته، لجن فاضلاب‌های شهری و کارخانه‌های ذوب فلز به خاک راه یابد. کادمیم در خاک غیر متحرک است. بنابراین، در روی خاک تجمع پیدا می‌کند (۲). کادمیم مثل سرب و آلومنیم از جمله فلزاتی است که دارای اثر سمی زیاد در تغذیه گیاه و انسان می‌باشد. کادمیم باعث وارد شدن صدماتی به لوله‌های مویین کلیه‌ها می‌شود؛ ایجاد بیماری تورم غشایی مخاط بینی می‌کند؛ و بیماری مزمن ریوی را به وجود می‌آورد، که در آن کیسه‌های هوایی به شدت کشیده و بزرگ می‌شوند.

خاک به دلیل توانایی کاستن از خطرات ناشی از فلزات سنگین، مهم‌ترین منبع دریافت مواد زاید است (۱۲). فلزات سنگین می‌توانند با ذرات خاک از طریق فرایندهای تبادل یونی و جذب شیمیایی پیوند برقرار کنند. مواد آلی خاک نیز نقشی کلیدی در ایجاد کمپلکس و ابقاء فلزات بازی می‌کند. میزان و توزیع فلزات سنگین در خاک‌ها تحت تأثیر عواملی چون مواد مادری، میزان مواد آلی، کانی‌شناختی، توزیع اندازه ذرات، افق‌بندی خاک، سن خاک، زهکشی و پوشش گیاهی است. فلزات سنگین به مقدار چشم‌گیری در اجزای رس و سیلت انباسته می‌شوند.

خاک از مهم‌ترین مکان‌های دفن مواد زاید رادیواکتیو کم تابش (LLW) یا Low level waste و پر تابش (HLW) یا (High level waste) است. تا کنون راه حل قاطعی برای دفع مواد زاید رادیواکتیو به دست نیامده است. امروزه از بعضی از معادن بسیار قدیمی نمک که برای همیشه متروک مانده‌اند، و یا چاههای خیلی عمیق نفت، که بهره‌برداری از آنها پایان یافته است، برای این منظور استفاده می‌شود. گروهی نیز صحراهای

امروزه بشر از مشکل آلودگی محیط رنج می‌برد. این آلودگی در نتیجه فعالیت دو دسته از مواد آلوده کننده ایجاد می‌شود. دسته‌ای از مواد آلوده کننده عناصر سنگین چون کادمیم (Cd)، کبالت (Co) و غیره، و دسته دیگر عناصر رادیواکتیو مانند اورانیم (U)، پالادیم (Pd) و غیره هستند، که هر دو سری عناصر فوق رفتار شیمیایی مشابهی دارند. از آن جا که گسترش و کاربرد روز افزون انرژی اتمی موجب تولید مواد زاید رادیواکتیو می‌شود، باید تلاش کرد که در عین استفاده از مزایای بیکران انرژی اتمی، مشکلات ناشی از مواد زاید رادیواکتیو با روش‌های مطلوب و درستی برطرف شود که به سلامتی بشر و محیط زیست لطمه‌ای وارد نسازد.

آلودگی (Pollution) به صورت وارد شدن سطوحی از مواد یا انرژی برای به مخاطره اندختن سلامتی انسان و زیان رساندن به منابع حیاتی و سیستم‌های اکولوژیک، و یا تخریب و از بین بردن مطبوعیت محیط زیست تعریف می‌شود، و بدیهی است که با آلوده‌سازی (Contamination)، یعنی وارد شدن یا حضور مواد بیگانه یا انرژی به محیط، که ممکن است باعث آلودگی نشود، تفاوت دارد. می‌توان گفت که آلوده سازی شرط لازم برای آلودگی است ولی شرط کافی نمی‌باشد (۵).

مواد رادیواکتیو به دلیل وجود هسته‌های ناپایدار از خود پرتوهایی می‌تابانند که برای حیات زیان‌آور است. برای بسیاری از حالت‌ها مواد رادیواکتیو را می‌توان ایزوتوپ‌های ناپایدار فلزات سنگین دانست. مثلاً کبالت با قرار گرفتن در کوره‌های اتمی به رادیو کبالت ۶۰ تبدیل می‌شود که عنصری رادیواکتیو بوده و دارای تابش پرتو گاما است، که از آن در دستگاه‌های رادیولوژی استفاده می‌شود (۳).

ورود عناصر رادیواکتیو و فلزات سنگین به چرخه‌های حیاتی سبب ایجاد مخاطراتی برای موجودات زنده، و به ویژه انسان می‌گردد. بهترین مثال مستند از اثر مواد رادیواکتیو بر موجودات زنده، وقایع هیروشیما، ناکازاکی و چرنوبیل است، که پس از مرگ شمار زیادی از ساکنین این شهرها، باعث وارد

مواد و روش‌ها

در این پژوهش اثر نوع رس‌های خاک و ساز و کار ثبت عناصر آلوده کننده کاتالیت و کادمیم به کمک دما، در دو خاک رسی اهواز و داراب با کانی‌شناختی متفاوت بررسی شد. این دو نمونه خاک از اعماق ۶۰-۳۰ و ۱۰۰-۶۵ سانتی‌متری پروفیل‌های شاهد موجود در زمین‌های دانشکده کشاورزی اهواز و فارس (منطقه داراب)، که به ترتیب خاک آنتی‌سول و مالی‌سول می‌باشند، برداشت شد.

برای جداسازی رس، از هر یک از این خاک‌ها ۵۰ گرم برداشته، در یک بشر ریخته و پس از افزودن ۲۰۰ میلی‌لیتر آب مقطور، آهک و مواد آلی آنها به ترتیب به کمک اسید کلریدیریک ۱:۱ و آب اکسیژنه ۳۰٪ از بین برده شد. سپس برای پراکندگی ذرات، ۵۰ میلی‌لیتر کالگون اضافه شد و پس از نیم ساعت به هم زدن با دستگاه، در استوانه مدرج یک لیتری ریخته و با آب مقطور به حجم رسانیده شد. پس از به هم زدن با میله فلزی مخصوص، به مدت ۲۴ ساعت برای سیفون کردن سوسپانسیون تا عمق ۳۰ سانتی‌متر به صورت ساکن به حال خود رها گردید. در هنگام سیفون کردن، انتهای لوله سیفون کننده باید بالاتر از ۳۰ سانتی‌متر قرار گیرد تا سبب وارد شدن اجزای درشت‌تر بر اثر مکش وارد نشود. رس موجود در سوسپانسیون در هوا خشک شد (۱۶).

برای بررسی میزان ثبت کاتیون‌های Co^{2+} و Cd^{2+} در رس‌های خاک به کمک دما، رس‌های خالص شده با نمک کاتالیت و کادمیم اشباع شده و میزان ثبت نیز به کمک تغییرات پدید آمده در CEC رس‌ها و الگوهای XRD بررسی شد. برای اشباع‌سازی، چهار گرم از رس خالص شده در یک لوله سانتریفوژ ریخته، و به آن ۲۰ میلی‌لیتر از محلول یک مولار CoCl_2 افزوده و به مدت ۳۰ دقیقه تکان داده شد. سپس به مدت پنج دقیقه در ۱۵۰۰ rpm سانتریفوژ شده و محلول رویی دور ریخته شد. این عمل سه بار تکرار گردید. برای خارج کردن کاتیون‌های محلول از رس اشباع شده، نمونه‌ها آن قدر با الكل اتانول ۹۶٪ شستشو شدند تا رس شروع به پراکنش کرده

خشک و لم یزرع را برای این کار مناسب می‌دانند. هم‌چنین، گروهی مواد زاید را در صندوق‌های بتنی ریخته و در دریا غرق می‌کنند. هم‌اکنون نیز ریختن مواد زاید اتمی به دریا به میزان کم در برخی از کشورها صورت می‌گیرد (۳).

در ایالت متحده آمریکا، دفع مواد زاید هسته‌ای با سطوح کم و مواد با سطوح زیاد به دو روش متفاوت انجام می‌شود. مهم‌ترین روش پذیرفته شده متدالوبل برای دفع مواد کم تابش، دفن کردن در اراضی کم عمق است. برای مواد پر تابش دفن در مخازن عمیق ژئولوژیک از متدالوبل ترین روش‌هاست (۱۳).

استفاده از خاک برای دفن ضایعات بشر به خاطر وجود رس‌های موجود در خاک و مواد آلی است. جذب این عناصر به وسیله رس‌ها از انتقال و انتشار آنها در محیط جلوگیری می‌کند. میزان انجام این عمل بستگی به میزان رس، نوع رس، pH خاک و مواد آلی موجود در خاک دارد (۶ و ۸). خاک‌های با بافت سبک، که میزان رس کمی دارند، برای دفع فاضلاب‌ها و مواد زاید صنعتی (که حاوی فلزات سنگین و عناصر سمی هستند) توصیه نمی‌شوند (۶ و ۱۴). مطالعات نشان داده است در خاک‌هایی که طی سالیان دراز ضایعات صنعتی دریافت کرده بودند فلزات سنگین به بیشترین میزان در جزء رس و به میزان کمتر در جزء سیلت انباشته شده بودند، و غلظت نیکل و روی هم بستگی مثبتی با میزان رس در تمام خاک‌ها دارد (۱۲). فضای خالی در ساختمان چهاروجبه و هشتوجبه رس‌های سیلیکاتی می‌تواند محل مناسبی برای به دام انداختن برخی از عناصر باشد، به شرطی که بین مراکز بار منفی در ساختمان رس‌های سیلیکاتی با عناصر کمترین فاصله ایجاد شود. این تغییر شکل در رس‌ها بستگی به نوع رس، درجه حرارت و نوع کاتیون دارد (۷).

بنابراین هدف از انجام این پژوهش بررسی ساز و کار و میزان ثبت عناصر سنگین کاتالیت و کادمیم در رس‌های خاک به کمک انرژی حرارتی است.

مختلف به صورت پودر درآمده و پس از تعلیق آنها در آب، از آنها پلاک تهیه شد.

برای کانی شناختی هر نمونه خاک پنج پلاک تهیه شد (۱۷)، که عبارت بودند از تیمار شاهد، اشباع با K^+ ، اشباع با Mg^{2+} ، اشباع با Mg^{2+} + گلیسرول، و اشباع با K^+ به همراه حرارت دادن در 55.0°C . گلیسرول به دلیل داشتن ماهیت قطبی به صورت دو لایه بین سطوح لایه‌ای کانی‌های اسمکتیت قرار گرفته و فضای پایه‌ای آنها را به $17/7 \text{ \AA}$ افزایش می‌دهد، در حالی که این تیمار تغییری در ورمی‌کولیت‌ها ایجاد نمی‌کند (۱۵) و (۱۶). از میان روش‌های تهیه پلاک برای تجزیه با پرتو ایکس، دو روش پودری و مایع تعیق رایج‌تر است، و هر کدام برای مقاصد به خصوصی کاربرد دارند. روش مایع نسبت به روش پودری نتایج روش‌تری برای نقاط فراز d001 به دست می‌دهد (۱۰). نوع دستگاه پرتو ایکس مورد استفاده در این پژوهش Philips Pw1840 ۱/۵۴۵۶ \AA است. شدت جریان به کار رفته 55 mA و ولتاژ 40 KV .

نتایج و بحث

شناسایی کانی‌های رسی خاک اهواز

ویژگی‌های پروفیل خاک اهواز که در رده‌بندی جدید آمریکایی جزو رده آنتی‌سول قرار می‌گیرد، در جدول ۱ آورده شده است. ظرفیت تبادل کاتیونی خاک $\text{cmol}_{(+)}/\text{kg}$ $11/5$ است، که اگر بر حسب صد گرم رس بیان شود میزان آن $34 \text{ cmol}_{(+)}/\text{kg}$ خواهد بود، که گویای نوع رس‌های با بار الکتریکی کم مانند کائولینیت و ایلیت است. برای پی بردن به نوع کانی‌های رسی، کانی شناختی نمونه خاک اهواز نیز صورت گرفت.

جدول ۲ مقادیر فضای d001 مربوط به نمونه رس‌های خاک اهواز را نشان می‌دهد. فضای $\text{\AA} = 14/5 \text{ d001}$ مربوط به کانی کلریت است، که یک رس ۲:۲ می‌باشد. تغییر نیافتن در این فضای ساختمانی تحت اثر تیمارهای مختلف اشباع‌سازی و حرارتی، تأییدی بر وجود کانی کلریت است، زیرا اگر این فضا

(حدوده هشت بار) و با نیترات نقره یک مولار هیچ رسوبی ایجاد نکند (۷). سپس نمونه‌های اشباع شده در دمای آزمایشگاه خشک شدند. اشباع‌سازی رس با کادمیم نیز مشابه کبالت به کمک محلول یک مولار CdCl_2 صورت گرفت.

به منظور بررسی ساز و کار تثیت عناصر کبالت و کادمیم به کمک دما، تیمارهای حرارتی 200.0°C و 400.0°C انتخاب شد. هر کدام از نمونه‌ها در سه تکرار تهیه شدند. از تیمار حرارتی به این دلیل استفاده می‌شود که کاتیون تبادلی در حالت هواخشک هیدراته است، و دما سبب از دست رفتن آب هیدراته اطراف کاتیون شده و شعاع کاتیون را به اندازه واقعی تبدیل کرده، انتقال کاتیون را به درون فضای خالی رس‌ها آسان می‌کند (۹). با توجه به گزارش بوکا و میلر (۴)، دمای 400.0°C ۴ ساعت تغییر ساختمانی در کانی‌های رس نمی‌شود، و در مورد رس مونت‌موریلینیت، دمای تا 600.0°C اثری بر ساختمان این کانی ندارد. بنابراین، در این پژوهش از تیمار حرارتی تا 400.0°C استفاده شد.

سه گرم از رس اشباع شده با Cd^{2+} و Co^{2+} از نمونه‌های اهواز یا داراب در بوته‌های چینی ریخته، یک دسته در دمای 200.0°C و دسته دیگر در 400.0°C برای شش ساعت حرارت داده شد. سپس نمونه‌های حرارت دیده در یک هاون چینی خرد شده و برای مراحل بعدی نگهداری گردید. پس از آماده سازی نمونه‌ها، pH و هدایت الکتریکی در سوسپانسیون $1:10$ ، و نیز ظرفیت تبادل کاتیونی یا بار الکتریکی رس‌ها اندازه‌گیری شد. برای مطالعه کانی شناختی با دستگاه X-Ray، روی پلاک‌ها چندین قطره از سوسپانسیون تهیه شده ریخته شد، به طوری که پس از خشک شدن به صورت یک لایه نازک روی سطح پلاک نمایان شود. تمام الگوهای XRD برای تیمارهای مختلف (دمای آزمایشگاه)، 200°C و 400°C درجه سانتی‌گراد تهیه گردید.

آماده سازی نمونه‌ها برای XRD

برای مطالعه تغییرات پدید آمده در ساختمان کانی‌ها بر اثر اشباع سازی با کبالت و کادمیم، هر کدام از تیمارها به وسیله پراش پرتو ایکس بررسی شدند. برای این منظور، نخست نمونه‌های

جدول ۱. ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی نمونه خاک اهواز

EC (dS/m)	CEC (cmol _{c+} /kg)	Gypsum	SP	CaCO ₃ (%)	OM	pH	بافت	دانه بندی (%) رس	عمق (cm)
				(%)				سیلت	ماسه
۲۰/۲	۱۱/۵	۶	۵۰	۴۳	۰/۹	۷/۴	لوم	۳۱	۳۱
۲۴/۱	۹/۹	۸	۴۵	۴۴	-	۷/۴	لوم	۳۵	۳۰-۶۰

جدول ۲. مقادیر فضای d مربوط به نمونه‌های رس خاک اهواز

مقادیر فضای d (Å)							نوع تیمار
۱۴/۶	۱۰/۵۵	۹/۹۵	۷/۱۵	۵	۴/۷۲	۳/۵۷	۳/۳۴
۱۴/۶	۱۰/۵۵	۱۰	۷/۱۶	۵	۴/۷۶	۳/۵۷	۳/۳۵
۱۴/۶	۱۰/۵۵	۱۰	۷/۱۶	۵	۴/۷۶	۳/۵۷	۳/۳۴
۱۴/۶	۱۰/۵۵	۱۰	۷/۱۶	۵	۴/۷۶	۳/۵۷	۳/۳۴
۱۴/۶	۱۰/۵۵	۱۰	-	۵	۴/۷۸	-	۵۵۰ °C

۱۷/۷ Å افزایش می‌دهد، قابل شناسایی است.

در مورد کانی‌های شناسایی شده، نکته شایان توجه وجود کانی رسی پالیگورسکیت در این خاک‌هاست. این نوع رس در خاک‌های اروپا و آمریکا به ندرت دیده می‌شود، ولی وجود آن در خاک‌های منطقه خاورمیانه و آفریقای شمالی زیاد گزارش شده است (۹).

تشکیل رس کائولینیت در شرایط وجود کاتیون‌های بازی و بدون شستشوی زیاد از جنبه تئوری کمی بعيد به نظر می‌رسد، ولی می‌توان چنین فرض کرد که اولاً شرایط پایداری این کانی رس در این خاک‌ها فراهم بوده، و به همین علت انواع کانی‌های رس در این خاک‌ها یافت می‌شود. ثانیاً به علت رسوی بودن این گونه خاک‌ها، امکان جا به جایی و حمل دائم مواد (به وسیله تخریب رودخانه‌ای) را، که در شرایط دیگری تشکیل شده‌اند، به نقاط کثونی نمی‌توان نادیده گرفت. نکته مهم دیگر بودن مونتموریلونیت در مقادیر چشم‌گیر است.

با توجه به روش تخمین نیمه کمی رس‌ها، می‌توان از روی ارتفاع نقاط فراز XRD، و یا سطح زیر منحنی مربوط به هر نقطه فراز، با در نظر گرفتن خط زمینه، درصد کانی‌های موجود

مربوط به ورمی‌کولیت باشد، باید در اثر اشباع‌سازی با پتانسیم به $d_{001}=10\text{ \AA}$ کاهش یابد. فضای $d_{001}=10/55\text{ \AA}$ مربوط به کانی پالیگورسکیت بوده، که در الگوهای پراش پرتو ایکس به صورت چسبیده به نقطه فراز 10 \AA ظاهر شد. پالیگورسکیت یک کانی ۲:۱ است، و فضای ساختمانی مربوط به نقطه اول فراز آن (d001) از تیمارهای مختلف اثربازی نیست. این مطلب در جدول ۲ نشان داده شده است.

کانی شناسایی شده دیگر، ایلیت یا میکای آبدار است، که فضای $d_{001}=9/95\text{ \AA}$ را به خود اختصاص می‌دهد. هم‌چنین، این کانی که یک رس ۲:۱ است از تیمارهای مختلف اثربازی نیست. این تغییر ناپذیری در فضای d ، به علت تثبیت پتانسیم بین لایه‌ای در ساختمان کانی است. فضای $d_{001}=7/1\text{ \AA}$ مربوط به کانی کائولینیت است، و بودن این نقطه فراز در تیمار اشباع و دمای 550°C دلیلی بر این مدعای می‌تواند باشد. ساختمان کائولینیت در دمای 550°C به هم می‌ریزد (جدول ۲). هم‌چنین، مقدار کمی از کانی رس مونتموریلونیت در نمونه تشخیص داده شد، که میزان آن ناچیز بود. وجود این کانی بر اثر اشباع‌سازی نمونه با منزیزم و گلیسرول، که فضای d را به

XRD، ترتیب مقدار نسبی نوع رس‌ها به صورت زیر است: پالیگورسکیت < کلریت < مونت‌موریلولوئیت نتایج تجزیه فیزیکی، شیمیایی و کانی‌شناختی دو خاک اهواز و داراب نشان داد که این دو خاک با هم تفاوت اساسی دارند. غالب بودن رس ایلیت در خاک اهواز و مونت‌موریلولوئیت در خاک داراب، می‌تواند عامل اساسی در رفتار متفاوت این دو خاک باشد. اختلاف چشم‌گیر CEC بخش رس دو خاک (اهواز با میزان CEC برابر $\text{cmol}_{\text{c+}}/\text{kg}$ ۳۴، داراب با CEC برابر $\text{cmol}_{\text{c+}}/\text{kg}$ ۵۹) دلیلی بر این مدعاست. پس انتظار می‌رود این دو خاک تحت واکنش‌های شیمیایی، رفتار مشابهی نشان ندهند.

تغییرات شیمیایی و کانی‌شناختی حاصل از اشباع‌سازی با کبات خاک اهواز

جدول ۵ تغییرات شیمیایی و کانی‌شناختی حاصل از اشباع‌سازی نمونه رس اهواز با کبات را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. مقادیر pH در سوپیانسیون ۱:۱۰ در آب مقطر عموماً بستگی به طبیعت کاتیون دارد. در تیمار حرارتی، با افزایش دما از 25°C به 400°C ، افزایش pH از $6/4$ به $6/7$ دیده می‌شود. این نشان می‌دهد که کاتیون به شدت به سطح رس پیوند یافته، که خود به دلیل واکنش کاتیون با گروه‌های آلومینیمی یا سیلیسیمی و کاهش آزادسازی پروتون از گروه‌های OH- است. به سخن دیگر، واکنش‌های هیدرولیز کمتر صورت می‌گیرد و pH روند افزایشی نشان می‌دهد.

مقادیر هدایت الکتریکی نیز روندی مشابه pH داشت. با افزایش دما، مقادیر هدایت الکتریکی از $31/3 \mu\text{S}/\text{cm}$ به $24/5 \mu\text{S}/\text{cm}$ در 25°C به 400°C کاهش یافت. این امر نیز به دلیل تشکیل پیوند قوی‌تر کاتیون کبات با گروه‌های آلومینیمی یا سیلیسیمی است که از غلظت کاتیون در عصاره ۱:۱۰ کاسته و در نتیجه هدایت الکتریکی را کاهش می‌دهد. تیمار حرارتی کل بار الکتریکی نمونه را نیز کاهش داده است، به طوری که مقادیر کاتیون تبادلی از $35/6 \text{cmol}_{\text{c+}}/\text{kg}$

در هر نمونه را تخمین زد (۱۷). با استفاده از روش فوق، درصد تقریبی کانی‌های موجود در نمونه خاک اهواز از این قرار است: ایلیت ۲۰٪، کلریت ۱۷٪، کائولینیت ۱۶٪، پالیگورسکیت ۱۴٪ و مونت‌موریلولوئیت کمتر از ۳٪. با توجه به این که CEC ایلیت در حدود ۴۰-۲۰، کلریت ۴۰، کائولینیت ۱۵-۵، پالیگورسکیت ۲۰-۵ و مونت‌موریلولوئیت $100-80 \text{ cmol}_{\text{c+}}/\text{kg}$ است (۹)، و با توجه به نسبت‌های یاد شده برای کانی‌های موجود در نمونه خاک اهواز، می‌توان CEC را برای صد گرم از رس‌های مذکور محاسبه کرد. این میزان برابر با $30/8 \text{ cmol}_{\text{c+}}/\text{kg}$ بود، که با CEC به دست آمده از طریق آزمایش ($34 \text{ cmol}_{\text{c+}}/\text{kg}$) نسبتاً هم خوانی دارد. تفاوت بین CEC محاسبه شده از طریق نسبت‌های کانی‌های شناسایی شده، با CEC نمونه خاک مورد آزمایش را می‌توان به مواد آلی و دیگر ترکیبات موجود در خاک نسبت داد.

شناسایی کانی‌های رسی خاک داراب

دومین نمونه خاکی که در این پژوهش به کار رفت، خاک داراب بود. نمونه فوق از عمق ۱۰۰-۶۵ سانتی‌متر برداشته شد، که کلیه ویژگی‌های پروفیلی و تجزیه شیمیایی و فیزیکی آن در جدول ۳ نشان داده شده است. این خاک بر اساس رده‌بندی جدید آمریکایی جزو رده مالی سول است. نمونه خاک دارای $pH = 8/1$ قابلیت هدایت الکتریکی $3/1 \text{ dS}/\text{m}$ ، و ظرفیت تبادل کاتیونی $13/9 \text{ cmol}_{\text{c+}}/\text{kg}$ است (جدول ۳). اگر درصد رس موجود در خاک بر حسب صد گرم رس بیان شود، مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی برابر $59 \text{ cmol}_{\text{c+}}/\text{kg}$ خواهد بود.

مقادیر فضای d_{0001} مربوط به نمونه‌های رس خاک داراب در جدول ۴ آورده شده است. نقطه فراز $d_{0001} = 13 \text{ \AA}$ در اثر تیمار منیزیم + گلیسرول، به $d_{0001} = 17/18 \text{ \AA}$ تغییر پیدا کرده است. این تغییر دلیل وجود رس مونت‌موریلولوئیت در نمونه است. رس کلریت با نقطه فراز 14 \AA و ایلیت با 10 \AA شناسایی شدند، که دلیل آن تغییر نیافتن نقاط فراز یاد شده با تیمارهای مختلف بود. با توجه به ارتفاع نقاط فراز در الگوهای مختلف

جدول ۳. ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی نمونه خاک داراب

EC (dS/m)	CEC (cmol _{c+} /kg)	Gypsum	SP	CaCO ₃ (%)	OM	pH	بافت	دانه بندی (%)	عمق
				(%)			رس	سیلت	ماسه
۲/۳	-	۰/۳	۶۳/۵	۴۵/۷	۲/۸	۷/۵	رسی	۲۹/۷	۴۵/۷
۲/۴	-	۰/۲	۵۷/۵	۵۸/۱	۱/۱	۷/۸	لوم	۲۵/۷	۳۷/۷
۳/۱	۱۳/۹	۰/۲	۶۳/۵	۶۸/۷	۱/۲	۸/۱	لوم	۲۳/۷	۴۱/۷
									۳۴/۶
									۶۵-۱۰۰

جدول ۴. مقادیر فضای d مربوط به نمونه‌های رس داراب

مقادیر فضای d (Å)								نوع تیمار
-	۱۴	۱۳	۱۰	۷/۰۷	۴/۹۸	۴/۷۱	۴/۲۷	اشباع با پتاسیم
-	۱۴/۴	۱۳	۱۰	۷/۰۷	۴/۹۸	۴/۷۳	-	اشباع با منزیم
۱۷/۱۸	۱۴	-	۱۰	۷/۰۷	-	۴/۹۹	-	اشباع با منزیم + گلیسرول
-	۱۴	-	۹/۹۱	۷/۰۷	-	۴/۹۸	۴/۱۲	اشباع با پتاسیم + دما در ۵۵°C

جدول ۵. نتایج مربوط به خاک اهواز اشباع شده با کپالت در دماهای مختلف

دما (°C)	EC ۱:۱۰ (µS/cm)	pH	CEC (cmol _{c+} /kg)	d001 (Å)	کلریت	پالیگورسکیت	ایلیت	کائولینیت
۲۵	۳۱/۳	۷/۴	۳۵/۶	۱۰/۵۵	۱۴/۲۸	۷/۲۲	۱۰	
۲۰۰	۳۰/۱	۷/۵	۳۳	۱۰/۵۵	۱۴/۲۸	۷/۱۲	۱۰	
۴۰۰	۲۴/۵	۷/۷	۲۸/۸	۹/۲۵	۱۴			۷/۱۲

می‌توان از عامل‌های عمدۀ در کم بودن میزان ثبیت کپالت در اثر حرارت‌دهی، نوع کانی‌های غالی بر کاهش داشته و اغلب بارشان در لایه چهاروجهی قرار دارد ذکر کرد. افزایش دما نیز بر میزان ثبیت یون کپالت یا کاهش بار الکتریکی اثر گذاشته است، به طوری که حرارت‌دهی تا ۲۰۰°C تنها ۲/۶ cmol_{c+}/kg بار منفی نمونه را کاهش داده است، در حالی که در حرارت ۴۰۰°C این میزان کاهش به ۶/۸ cmol_{c+}/kg رسیده است. به همین دلیل، کاهش هدایت الکتریکی و یا افزایش pH در عصاوه ۱:۱۰ آب مقطر نیز برای ۲۰۰°C کمتر از ۴۰۰°C است.

تغییرات چندانی در فضای d برای کانی‌های موجود در

در ۲۵°C، به ۳۳ cmol_{c+}/kg در ۲۰۰°C و ۲۸/۸ cmol_{c+}/kg در ۴۰۰°C کاهش یافته است. کاهش در میزان کل بار الکتریکی به طبیعت کاتیون، دما و نوع کانی‌های رسی غالب در نمونه مستگی دارد.

در میان ویژگی‌های مربوط به طبیعت کاتیون، شعاع یونی از همه مهم‌تر است. کاتیون‌های با شعاع ۰/۷ Å و یا کمتر به خوبی می‌توانند در اثر حرارت‌دهی باکانی‌های رس پیوند کووالانس داده و جزئی از ساختمان کانی شوند (۷). پژوهش‌ها نشان داده است که این پیوند، بیشتر با کانی‌هایی که بار اصلی آنها در لایه هشت‌وجهی قرار دارد صورت می‌گیرد (۱۱).

با توجه به نوع کانی‌های تشخیص داده شده در نمونه اهواز،

برد. در خاک اهواز با دمای 400°C تنها $6/8 \text{ cmol}_{\text{c},+}/\text{kg}$ کاهش اتفاق افتاده است، در حالی که در نمونه داراب این میزان کاهش به $35/6 \text{ cmol}_{\text{c},+}/\text{kg}$ می‌رسد.

الگوهای XRD مربوط به دماهای 200°C و 400°C در شکل ۲ نشان داده شده است. با سانتی‌گراد برای نمونه فوق در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به الگوهای XRD، فضای d برای کانی مونت‌موریلوفیت از $14/6 \text{ \AA}$ در 250°C به $9/6 \text{ \AA}$ در 400°C تغییر یافته است، که نشان دهنده تغییر ساختار کریستالی کانی در اثر ثبت کبات در لایه هشت‌وجهی خود است. این فضای d در 200°C تغییری پیدا نکرده است. برای رس‌های ایلیت و کلریت تغییر چشم‌گیری در فضای d پیدا نیامده است. هم‌چنین، در اثر افزایش دما شدت نقاط فراز XRD رس‌ها کاهش یافته است، که در شکل ۲ به خوبی دیده می‌شود. کاهش در شدت نقاط فراز برای نمونه‌های رس داراب بیشتر از نمونه‌های رس اهواز است.

تغییرات شیمیایی و کانی‌شناختی حاصل از اشباع‌سازی با کادمیم کادمیم نیز چون کبات یکی از عناصر سنگین است، و هر دوی این فلزات جزو عناصر واسطه در جدول تناوبی عناصر بوده، تقریباً خواص شیمیایی مشابهی دارند. عنصر کادمیم نسبت به عنصر کبات دارای شعاع یونی بزرگ‌تری است (0.97 \AA)، در نتیجه انتظار می‌رود که ثبت آن در رس‌ها همانند کبات نباشد. بنابراین، برای مقایسه، رس‌های خاک اهواز و داراب با عنصر کادمیم نیز اشباع شد و تمام مراحل بعدی شبیه به تهییه نمونه‌های اشباع با کبات انجام گردید.

خاک اهواز

نتایج تجزیه شیمیایی و کانی‌شناختی مربوط به نمونه خاک اهواز اشباع شده با کادمیم برای دماهای 200°C و 400°C درجه سانتی‌گراد در جدول ۷ آورده شده است. تغییرات pH در سوسپانسیون $1:10$ ناچیز می‌باشد. این تغییر تنها $0/1$ واحد در 400°C بوده است، که نشان از تغییر نیافتن وضعیت هیدروکسیل لایه‌ها (OH⁻) دارد؛ یا به عبارتی پیوند میان کادمیم

نمونه اهواز در دماهای مختلف پدید نیامد (جدول ۵)، ولی با افزایش دما، شدت نقاط فراز XRD رس‌ها کاهش یافته است، و در دمای 400°C این نقاط با ارتفاع کمی از سطح زمینه دیده می‌شوند (شکل ۱).

خاک داراب

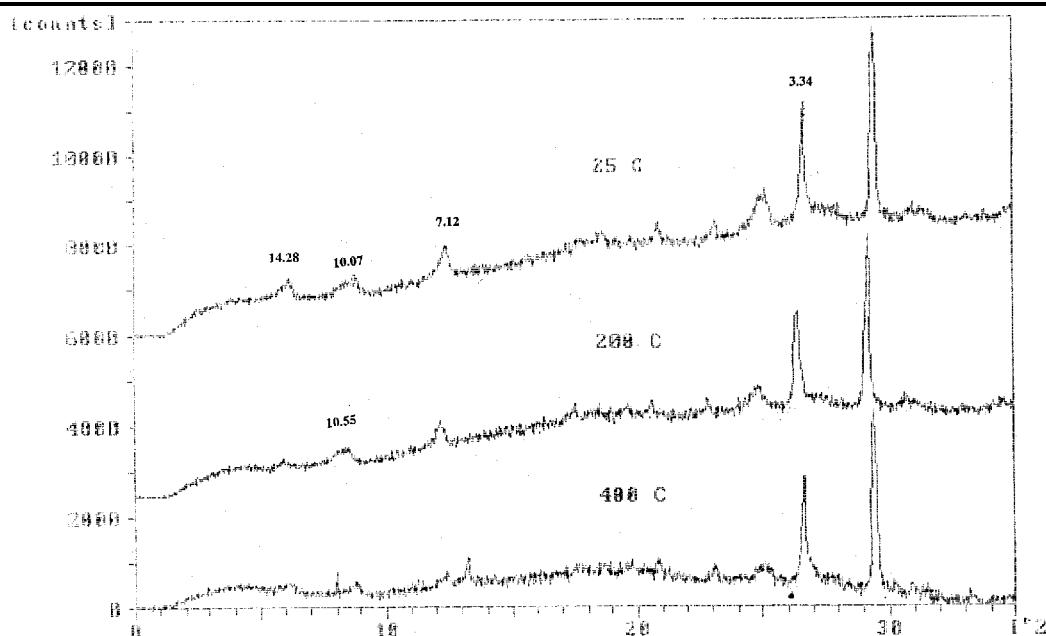
جدول ۶ تغییرات شیمیایی و کانی‌شناختی نمونه‌های رس داراب اشباع شده با کبات در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. در نمونه رس‌های داراب نیز با افزایش دما، هدایت الکتریکی کاهش یافته است. در این نمونه هدایت الکتریکی از $41/6 \mu\text{S}/\text{cm}$ در 25°C به $30/3 \mu\text{S}/\text{cm}$ در 400°C کاهش یافته است. هم‌چنین، با افزایش pH در اثر دما می‌تواند به دلیل پیوند یافتن کبات با کانی‌های موجود در نمونه باشد. در اثر این پیوند از میزان کاتیون محلول کاسته شده و هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد. هم‌چنین، در اثر کاهش یونیزاسیون عامل هیدروکسیل (OH⁻) در اثر پیوند کبات با این عامل‌ها، غلظت یون آزاد H^+ کم می‌شود، و بنابراین محلول افزایش می‌یابد.

ظرفیت تبادل کاتیونی کانی‌های رس نمونه داراب در اثر دمای 400°C کاهش چشم‌گیری نشان داد. این کاهش در ظرفیت تبادلی رس‌های خاک از $50/1 \text{ cmol}_{\text{c},+}/\text{kg}$ در 25°C به $14/5 \text{ cmol}_{\text{c},+}/\text{kg}$ در 400°C در 200°C و به $39/4 \text{ cmol}_{\text{c},+}/\text{kg}$ در 400°C بود. دلیل این کاهش، نوع کانی‌های رسی غالب در خاک داراب است. با توجه به کانی‌شناختی نمونه داراب، که رس مونت‌موریلوفیت در آن غالب است، و این که بار اصلی کانی مونت‌موریلوفیت در لایه هشت‌وجهی قرار دارد، این عامل سبب ثبت کاتیون کبات شده و بار کل نمونه را تا این اندازه کاهش داده است که این کاهش بار الکتریکی، بر قابلیت هدایت الکتریکی و pH نیز اثر گذاشته است.

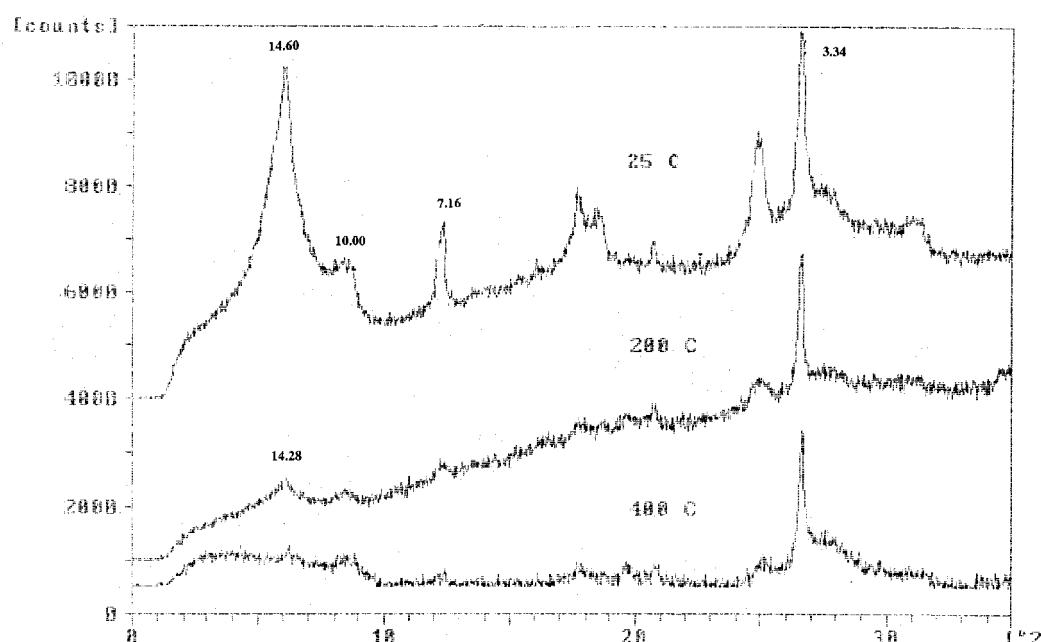
از مقایسه کاهش CEC در نمونه‌های خاک اهواز و داراب می‌توان به اثر نوع کانی‌های غالب در ثبت کاتیون کبات پس

جدول ۶. نتایج مربوط به خاک داراب اشبع شده با کبالت در دماهای مختلف

پالیگورسکیت	d001 (Å)	CEC (cmol _{c+kg})	pH 1:10	EC (µS/cm)	دما (°C)
کلریت	ایلیت	مونت‌موریلونیت			
—	14/6	10/1	14/6	50/1	7/8 25
—	14/28	10/1	14/5	39/4	7 200
—	14	10/1	9/6	14/0	7/6 10/8 400



شکل ۱. الگوهای XRD خاک اهواز اشبع شده با کبالت در دماهای مختلف



شکل ۲. الگوهای XRD خاک داراب اشبع شده با کبالت در دماهای مختلف

پدید آمده در بار الکتریکی کل کانی‌های رسی نمونه داراب از $51/2 \text{ cmol}_{\text{c},+}/\text{kg}$ در 25°C به $49/8 \text{ در } 49^\circ\text{C}$ ، 200°C و $47/7 \text{ در } 400^\circ\text{C}$ رسید. این کاهش برای 200°C ، 200°C و $1/4 \text{ cmol}_{\text{c},+}/\text{kg}$ در 400°C رسید. این کاهش این میزان کاهش، با کاهش $3/5 \text{ در } 400^\circ\text{C}$ واحد بود. در مقایسه این میزان کاهش، با کاهش در بار الکتریکی کانی‌های رسی فوق در حالت اشباع‌سازی با کبات، اثر نوع کاتیون نسبت به رس‌های نمونه اهواز مشخص‌تر است. کاهش کم در میزان بار الکتریکی کانی‌های رس، که ناشی از کمی پیوند میان کادمیم و رس‌هاست، سبب افزایش نسبتاً کمی در pH نمونه‌های دما دیده شده است. کاهش pH در حالت اشباع‌سازی با کادمیم در دمای 200°C برابر با $0/1$ واحد است، و در 400°C این کاهش به $0/3$ واحد می‌رسد.

کاهش هدایت الکتریکی رس‌های نمونه داراب در حالت اشباع با کادمیم، در دمای 200°C به $0/9 \mu\text{S}/\text{cm}$ و در 400°C به $2/1$ واحد رسید، که به دلیل کاهش کم در بار الکتریکی است. این کاهش در برابر $11/3 \mu\text{S}/\text{cm}$ در 200°C و $25/8 \text{ در } 400^\circ\text{C}$ برای حالت اشباع‌سازی همین نمونه با کبات قرار دارد، که برای کادمیم بسیار کم بوده است.

فضای d در نمونه‌های رس خاک اشباعی با کادمیم برای ایلیت و کلریت تغییری نکرد (جدول ۸)، در حالی که این فضا برای رس مونت‌موریلونیت از $14/6 \text{ \AA}$ در 25°C و $14/3 \text{ \AA}$ در 200°C به $9/6 \text{ \AA}$ در 400°C می‌رسد، که تغییر در ساختمان کریستال کانی را نشان می‌دهد. ولی این تغییر منجر به تثبیت کاتیون مذکور روی رس مونت‌موریلونیت نمی‌شود، زیرا این کاتیون با عصاره‌گیری از روی رس مذکور قابل تبادل بوده و خارج شده است (کاهش کم در بار کل الکتریکی کانی). بنابراین، این پدیده را نمی‌توان به مهاجرت یون تبادلی به داخل ساختمان رس نسبت داد.

الگوهای XRD مربوط به دمای 25°C ، 200°C و 400°C سانتی‌گراد برای نمونه داراب در شکل ۴ نشان داده شده است. دمای 400°C اثر کمی بر نقاط فراز داشته است، و تغییرات پدید آمده در آنها جزئی است، ولی در دمای 400°C نقاط فراز تقریباً حالت خوابیده دارند. مقایسه الگوهای XRD مربوط

با رس‌های موجود در نمونه صورت نگرفته است. در نتیجه تشکیل نشدن پیوند، آزادسازی کاتیون‌ها از مکان‌های تبادلی و وارد شدن آنها به محلول سوسپانسیون در دماهای مختلف به راحتی صورت گرفته و حرارت اثری در آن نداشته است. به همین دلیل، هدایت الکتریکی نیز تغییرات زیادی را نشان نمی‌دهد. هدایت الکتریکی از $35/1 \mu\text{S}/\text{cm}$ در 25°C به $34/7 \text{ در } 400^\circ\text{C}$ و $33/9 \text{ در } 400^\circ\text{C}$ رسیده است. یعنی در اثر حرارت دهی تا 400°C ، تنها $1/2 \mu\text{S}/\text{cm}$ برای شش ساعت در آن پدید آمده است. اثر دما بر کاهش بار الکتریکی کل نیز کم بوده است. دما بر کل نمونه را از 25°C در $34/3 \text{ cmol}_{\text{c},+}/\text{kg}$ به $32/5 \text{ cmol}_{\text{c},+}/\text{kg}$ در 400°C در $33/8 \text{ در } 400^\circ\text{C}$ ، و $0/5 \text{ cmol}_{\text{c},+}/\text{kg}$ در 200°C و $1/8$ واحد در 400°C یعنی تنها کاهش داشته است. این مسئله نشان از آن دارد که کاتیون پیوند یافته با سطح رس‌های نمونه خیلی کم بوده است، و چون در مقایسه با تیمار اشباع‌سازی با کبات تنها نوع کاتیون تفاوت داشته است، در این قسمت اثر نوع کاتیون در ایجاد پیوند با سطح کانی‌های رس به خوبی نمایان است. افزایش در شعاع کریستاله کاتیون کادمیم سبب کاهش میزان تثبیت این کاتیون شده است.

شکل ۳ الگوهای XRD رس خاک‌های اشباع شده با کادمیم را نشان می‌دهد. شدت نقاط فراز با افزایش دما کاهش یافته، و ارتفاع آنها حالت خوابیدگی پیدا کرده است. مقایسه الگوهای XRD مربوط به تیمارهای اشباعی کبات و کادمیم در 25°C و 200°C تقریباً مشابه بوده، ولی الگوی XRD برای تیمار اشباعی کبات در 400°C نسبت به کادمیم در همین دما، خوابیدگی بیشتری در نقاط فراز مربوط به چهار کانی موجود در نمونه خاک نشان می‌دهد، که این با کاهش میزان بار الکتریکی کانی‌های نمونه هماهنگی دارد.

خاک داراب

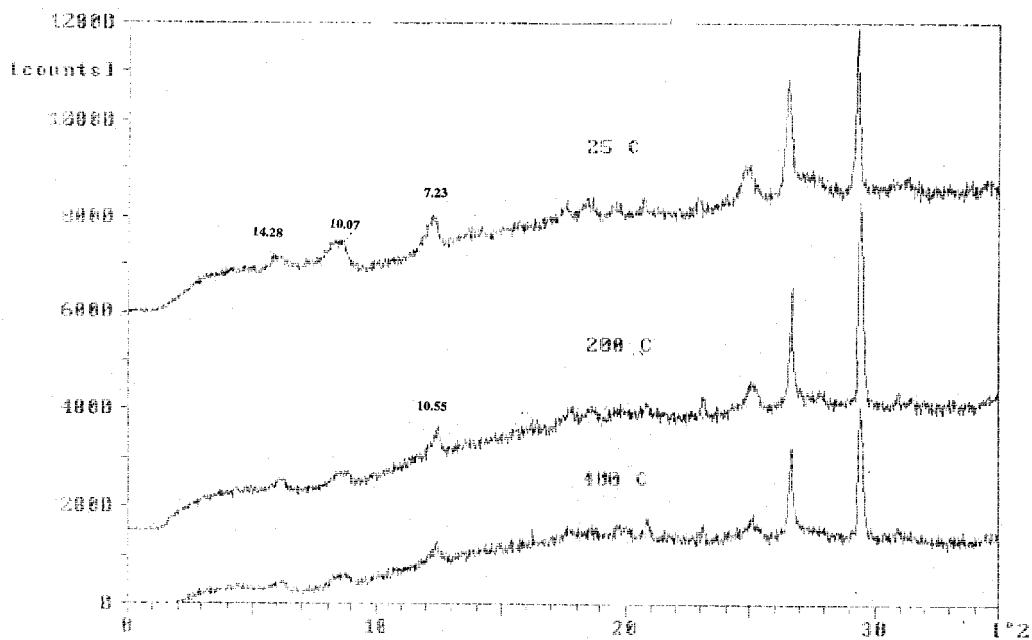
جدول ۸ نتایج تجزیه‌های شیمیایی و کانی‌شناسنامه‌های رس خاک داراب اشباع شده با کادمیم را نشان می‌دهد. تغییرات

جدول ۷. نتایج مربوط به خاک اهواز اشباع شده با کادمیم در دماهای مختلف

دما (°C)	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH ۱:۱۰	CEC (cmol _{c+} /kg)	کلریت	پالیگورسکیت	ایلیت	d001 (Å)	کاثولینیت
۲۵	۳۵/۱	۷/۶	۳۴/۳	۱۴/۲۸	۱۰/۰۵	۱۰/۰۷	۷/۲۳	۷/۲۳
۲۰۰	۳۴/۷	۷/۶	۳۳/۸	۱۴/۲۸	۱۰/۰۵	۱۰/۰۷	۷/۲۳	۷/۲۳
۴۰۰	۳۳/۹	۶/۷	۳۲/۰	۱۴	۹/۲۵	۱۰/۰۶	۷/۱	۷/۱

جدول ۸. نتایج مربوط به خاک داراب اشباع شده با کادمیم در دماهای مختلف

دما (°C)	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH ۱:۱۰	CEC (cmol _{c+} /kg)	مونت‌موریلونیت	ایلیت	کلریت	پالیگورسکیت	d001 (Å)
۲۵	۴۳/۲	۷/۹	۵۱/۲	۱۴/۶	۱۰/۰۷	۱۴/۳۵	—	—
۲۰۰	۴۲/۳	۷	۴۹/۸	۱۴/۳	۱۰/۰۷	۱۴/۳۵	—	—
۴۰۰	۴۱/۱	۷/۲	۴۷/۷	۹/۶	۱۰	۱۴	—	—

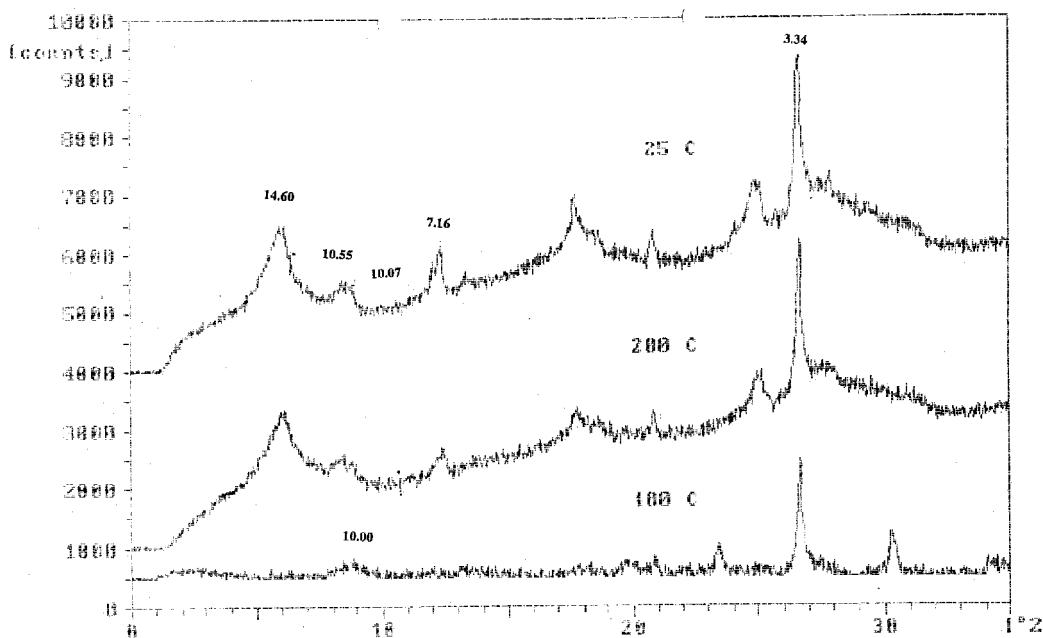


شکل ۳. الگوهای XRD خاک اهواز اشباع شده با کادمیم در دماهای مختلف

هستند، که ممکن است به دلیل ثبت یون‌های کبالت و ساختار کانی‌های رس باشد.

از سوی دیگر، کاهش بار الکتریکی به میزان زیاد در رس اشباع با کبالت در دمای 400°C نسبت به رس اشباع با کادمیم،

به نمونه‌های رس خاک داراب در حالت‌های اشباع با کبالت و کادمیم در 25°C نشان می‌دهد که ارتفاع نقاط فراز نمونه کبالت‌دار بلندتر از نقاط فراز نمونه کادمیم‌دار است. در دمای 400°C ، نقاط فراز نمونه کبالتی خواهد تراز نمونه کادمیمی



شکل ۴. الگوهای XRD خاک داراب اشباع شده با کادمیم در دماهای مختلف

نتیجه گیری

خاک مهم‌ترین مکان برای دفن فضولات هسته‌ای است، و در میان اجزای خاک جزء رس بیشترین نقش را در نگهداری ضایعات هسته‌ای دارد. پایداری ساختمان رس‌ها دارای زمان طولانی‌تری نسبت به نیمه عمر اغلب عناصر رادیواکتیو است. بنابراین، با ثبت این عناصر در رس‌ها، می‌توان از انتشار آنها در محیط جلوگیری کرد.

نتایج حاصل از اشباع‌سازی رس‌های خاک اهواز و داراب با کیالت و کادمیم به همراه حرارت دهی تا 400°C نشان داد که ثبت کاتیون در ساختمان رس بستگی به نوع کاتیون و نوع رس دارد. کاهش در بار الکتریکی رس‌های اشباع شده با کیالت و کادمیم با افزایش دما از 25°C به 400°C یکسان نبود. در رس‌های اشباع شده با کیالت، کاهش در بار الکتریکی به طور محسوسی دیده شد، به طوری که پس از حرارت دادن در 400°C ، CEC به ترتیب برای خاک اهواز و داراب از $35/6$ و $50/1$ به $28/8$ و $14/5 \text{ cmol}_{\text{c},+}/\text{kg}$ کاهش یافت. در صورتی که در رس‌های اشباع شده با کادمیم، کاهش در بار الکتریکی زیاد نیست، زیرا پس از حرارت دهی تا 400°C ، CEC به ترتیب از

گویای تغییر در ساختمان کانی رس است. این تغییر در الگوهای XRD رس اشباع با کیالت و کادمیم پس از حرارت دادن در 400°C دیده نمی‌شود. پژوهش انجام شده در مورد ثبت کاتیون‌ها در ساختمان رس‌ها نشان داده است که در اثر حرارت دادن، کاتیون‌های با شعاع یونی کمتر از 0.7 \AA را می‌توان در فضاهای خالی ساختمان رس‌های اسمکتیت محبوب کرد، به طوری که پیوند کووالانت حاصله بین کاتیون و رس، باعث ثبت کاتیون در ساختمان رس شود (۱۱). بنابراین، با توجه به این که بیشتر مواد زاید از عناصر شیمیایی و رادیواکتیو در خاک به شکل کاتیونی وجود دارند، می‌توان فرض کرد که رس‌های گروه اسمکتیت با حرارت دادن می‌توانند در ثبت عناصر آلوده کننده مؤثر واقع شوند.

با توجه به نتایج جدول ۹، اثر نوع عنصر، تیمار حرارتی، و نوع رس در ثبت عناصر آلوده کننده در سطح یک درصد معنی‌دار است. بیشترین ثبت مربوط به نمونه‌های رس خاک داراب می‌باشد. در مقایسه نوع عنصر نیز بیشترین ثبت مربوط به عنصر کیالت است. در تیمارهای حرارتی نیز بیشترین میزان ثبت را تیمار حرارت دهی تا 400°C دارد.

جدول ۹. تجزیه آماری نتایج حاصل از حرارت دهی رس‌ها با کاتیون‌های کپالت و کادمیم

F	میانگین مربعات MS	مجموع مربعات SS	درجه آزادی df	منبع تغییرات
۱۱۸۲/۰۸**	۴۳۴/۰۲۷۷	۴۳۴/۰۲۷۷	۱	عنصر × رس
۷۳۰/۵۴**	۲۶۸/۲۳۳۶	۵۳۶/۴۶۷۲	۲	عنصر × حرارت
۴۹۷/۷۶**	۱۸۲/۷۶۳۶	۳۶۵/۵۲۵۲	۲	رس × حرارت
۴۰۷/۳۵**	۱۴۹/۵۶۸۶	۲۹۹/۱۳۷۲	۲	رس × حرارت × عنصر
	۰/۳۶۷۱	۸/۰۷۷۷	۲۲	خطا

**: در سطح آماری یک درصد میان تیمارها اختلاف معنی‌دار وجود دارد، و ضریب تغییرات $F=1/641$ است.

می‌باشد (۳). از این رو، نتایج پژوهش فوق را، که برای عناصر غیر ایزوتوب صورت گرفته است، می‌توان به عناصر ایزوتوب نیز تعمیم داد.

کاربرد روز افزون سوخت‌های اتمی و استفاده از مواد رادیواکتیو در صنعت، پزشکی و کشاورزی، سبب بر جای گذاشتن مقادیر بسیاری از فضولات هسته‌ای می‌شود، که بشر ناگزیر به یافتن راهی برای دفن آنهاست. بنابراین، از نتایج پژوهش حاضر می‌توان برای دفن فضولات هسته‌ای و یا فلزات سنگین، که پراکندگی آنها سبب آلودگی محیط می‌شود، بهره جست. مواد رادیواکتیو نیز در اثر تابش پرتوهای آلفا، گاما و بتا، باعث تولید انرژی گرمایی در اجسام اطرافشان می‌شوند. پس بدیهی است در صورتی که نمونه‌های فضولات هسته‌ای قادر به افزایش دمای محیط‌های دفن این مواد زاید باشند، نیاز به حرارت دادن آنها با رس نیست، و می‌توان پس از مخلوط کردن آنها با رس، آنها را در مکان‌های مناسب دفن کرد و با دمای تولید شده در اثر تابش، این عمل خود به خود انجام خواهد گرفت.

۳۴/۳ و ۵۲/۲ به ۳۲/۵ و $\text{cmol}_{\text{c}}/\text{kg}$ ۴۷/۷ کاهش پیدا کرد. بنابراین، دو عامل نوع رس و نوع کاتیون در کاهش بار الکتریکی نقش عمده دارند. رس‌های غالب در خاک اهواز، ایلیت، کلریت و کائولینیت، و در خاک داراب، مونت‌موریلوبونیت، ایلیت و کلریت هستند.

تغییرات مشاهده شده در بار الکتریکی و فضاهای بین لایه‌ای در رس‌های اشباع با کپالت پس از حرارت دادن، دلیلی بر تغییرات نوع پیوند بین کاتیون و رس، و نیز تغییراتی در ساختمان رس است. با توجه به شعاع یونی کپالت، که 0.68 \AA است، می‌توان تغییرات انجام شده را به انتقال عنصر کپالت به داخل ساختمان رس نسبت داد. در صورتی که عنصر کادمیم با شعاع یونی بزرگ‌تر (0.97 \AA)، نمی‌تواند به ساختمان رس داخل شود. کمی تغییر در بار الکتریکی و فضای بین لایه‌ای دلیلی بر این مدعاست.

چون رفتار شیمیابی عناصر به الکترون‌های مدار آخر آنها بستگی دارد و در ایزوتوب‌ها تنها شمار نوترنون‌ها با یکدیگر متفاوت است، پس رفتار شیمیابی ایزوتوب‌ها با همدیگر یکسان

منابع مورد استفاده

۱. محمدی، ه. و س. مهدی‌زاده. ۱۳۶۸. تشعشع و حیات. انتشارات دانشگاه شیراز.
۲. ملکوتی، م. و م. همایی. ۱۳۷۳. حاصلخیزی خاک‌های مناطق خشک. انتشارات دانشگاه تربیت مدرس.
۳. نیلوفری، پ. و ق. نیلوفری. ۱۳۶۳. اتم در خدمت کشاورزی. انتشارات دفتر مرکزی جهاد دانشگاهی.
4. Bukka, K. and J. D. Miller. 1992. Ftir study of Deuterated montmorillonites: structural features relevant to pillared clay stability. Clays and Clay Min. 40(1): 92-102.
5. Cairney, T. 1993. Contaminated Land: Problems and Solutions. Lewis Pub., USA.

6. Camobreco, V. J., B. K. Richards, T. S. Steenhuis, J. H. Peverly and M. B. McBride. 1996. Movement of heavy metals through undisturbed and homogenized soil columns. *Soil Sci.* 161(11): 740-750.
7. Chorom, M. and P. Rengasamy. 1996. Effect of heating on swelling and dispersion of different cationic forms of smectite. *Clays and Clay Min.* 44(6): 783-790.
8. Churchman, G. J., P. G. Slade, P. G. Self, J. L. Keeling, M. D. Raven and R. W. L. Kimber. 1996. Australian clays for the uptake of pollutants. In: *Contaminants and the Soil Environment. Australasia-Pacific Region, First International Conference, Adelaide.*
9. Dixon, J. B. and S. B. Weed. 1995. Minerals in Soil Environments. Second Edition, *Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin.*
10. Gee, G. W. and J. W. Bauder. 1986. Particle size analysis. PP. 383-411. In: A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1, 2nd ed., Agron. Monogr. 9, ASA and SSSA, Madison, WI.*
11. Jaynes, W. F. and J. M. Bigham. 1987. Charge reduction, octahedral charge, and lithium retention in heated, Li-saturated smectites. *Clays and Clay Min.* 35(6): 440-448.
12. Lee, B. D., N. T. Carter, N. T. Basta and B. Weaver. 1997. Factors influencing heavy metal distribution in six Oklahoma benchmark soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 218-223.
13. Lee, S. Y. and R. W. Tank. 1985. Role of clays in the disposal of nuclear waste: a review. *Appl. Clay Sci.* 1: 145-162.
14. Li , Z. and L. M. Shuman. 1996. Heavy metal movement in metal-contaminated soil profiles. *Soil Sci.* 161(10): 656-666.
15. Tan, K. H. 1996. *Soil Sampling, Preparation, and Analysis.* Marcel Dekker, Inc., New York.
16. Whitton, J. S. and G. J. Churchman. 1987. Standard methods for mineral analysis of soil survey samples for characterisation and classification in NZ Soil Bureau. NZ Soil Bureau Scientific Report 79.
17. Whittig, L. D. and W. R. Allardice. 1992. X-Ray diffraction techniques. PP. 331-362. In: A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods. Agron. Monogr. 9, ASA and SSSA, Madison, WI.*