

اندازه‌گیری پارامترهای ترمودینامیکی و بررسی تغییر ریزساختار در فرآیند جذب سرب توسط نانو تری کلسیم فسفات سنتز شده به روش هم‌رسوبی

داوود قهرمانی^{۱*}، ایمان مباشرپور^۲ و صدیقه جوقه‌دوست^۳

۱- گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی، واحد میبد، دانشگاه آزاد اسلامی، میبد، ایران

۲- پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

۳- گروه مهندسی پزشکی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۶/۰۷/۱۶، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۶/۱۰/۲۱، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۶/۱۲/۰۳

چکیده

حذف فلز سنگین سرب بوسیله فرآیند جذب و رسوب‌دهی به عنوان سازوکارهای عمومی کاهش آسیب ناشی از این فلز مورد توجه است. در این پژوهش ارزیابی ترمودینامیکی حذف یون Pb^{2+} از محلول‌های آبی بوسیله نانو بلورک‌های تری کلسیم فسفات بررسی شد. تاثیر غلظت اولیه یون سرب، دما، و تغییرات ساختاری در اثر فرآیند جذب مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی‌های فازی از دستگاه پراش اشعه ایکس و جهت بررسی تغییرات ساختاری از میکروسکوپ الکترونی عبوری استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اولیه یون مورد بررسی و دما ظرفیت جذب افزایش می‌یابد. بیشینه ظرفیت جذب بدست آمده در غلظت اولیه ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر و جرم جاذب ۰/۰۱ گرم در دما و pH محیط برابر با ۴۳۰۰ میلی‌گرم بر گرم است. مقادیر ۴۱۴۰ ژول بر مول و ۹۲/۹۸ ژول بر مول درجه کلین به ترتیب برای تغییرات استاندارد آنتالپی و تغییرات استاندارد آنتروپی جذب محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: جذب، سرب، نانو تری کلسیم فسفات، ترمودینامیک.

۱- مقدمه

بستگی به نوع و مقدار ماده سمی وارد شده به بدن دارد. یکی از موارد مسمومیت سرب است. این فلز در آب‌های طبیعی به مقدار بسیار کم وجود دارد ولی بر اثر تخلیه فاضلاب‌های صنعتی یا کشاورزی حاوی سرب و ترکیبات آن، ممکن است به مقدار قابل توجهی وارد آب شود. آلوده شدن به سرب از راه‌های گوناگون صورت می‌پذیرد. مثلاً تترا اتیل

بر اثر فعالیت‌های انسان مواد شیمیایی زیان‌آور و سمی وارد آب می‌شود. چنانچه تعداد این مواد در آب بیشتر از حد مجاز باشد، آشامیدن چنین آبی ممکن است عوارض و اختلالات گوناگونی در بدن ایجاد کند. شدت این اختلالات

* **عهده‌دار مکاتبات:** داوود قهرمانی

نشانی: میبد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد میبد، گروه مهندسی مواد و سرامیک

تلفن: ۱۹۱-۳۲۳۷۰۰۳۵، دورنگار: ۱۹۱-۳۲۳۷۰۰۳۵، پست الکترونیکی: davod.ghahremani@gmail.com

اولیه صفر تا ۸۰۰۰ mg/L برای سه نوع مختلف پودر هیدروکسی آپاتیت توسط Sandrine و همکارانش بررسی شد. نتایج نشان دهنده آن است که سازوکار جذب سرب بر اساس تشکیل محلول جامد $Pb_xCa_{10-x}(PO_4)_6(OH)_2$ بوده و نسبت Ca/P به صورت پیوسته کاهش می‌یابد. مدل تک‌دما جذب کلاسیک لانگمیر-فرندلیش برای بررسی اطلاعات جذب مورد استفاده قرار گرفت. ظرفیت‌های جذب از این مدل از ۳۳۰ تا ۴۵۰ mgPb/g برای پودرهای گوناگون هیدروکسی آپاتیت مورد محاسبه قرار گرفت [۹].

هدف از انجام این پژوهش اندازه‌گیری پارامترهای ترمودینامیکی فرآیند جذب سرب بر روی نانوذرات تری کلسیم فسفات به منظور شناخت تغییرات آنتالپی و آنتروپی این فرآیند به منظور امکان استفاده از نانو ذرات تری کلسیم فسفات به عنوان یک جاذب موثر بوده و تغییرات ساختاری در اثر این فرآیند جذب نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- فعالیت‌های تجربی

در ابتدا محلول‌های حاوی کلسیم و فسفر به‌طور جداگانه و با استفاده از نترات کلسیم چهار آبه (Analar No.10305) با فرمول $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ و دی آمونیم هیدروژن فسفات (Merck No.1205) با فرمول $(NH_4)_2HPO_4$ جهت سنتز تری کلسیم فسفات تهیه شدند [۱۰].

برای تهیه محلول‌های آبی دارای سرب، از نمک نترات سرب استفاده شد. برای آماده‌سازی محلول جذب شونده، غلظت مشخصی از نترات سرب، در آب مقطر حل شده و با توجه به غلظت مشخص این نمک، میزان سرب در محلول تعیین می‌شود. برای ساخت محلول‌های آبی دارای یون دو ظرفیتی سرب، از نترات سرب $(Pb(NO_3)_2)$ از شرکت Merck Art No.7397 استفاده شد. باید توجه کرد که برای بررسی میزان فرآیند جذب توسط ماده جاذب، غلظت‌های اولیه متفاوتی از یون فلزی به ترتیب برابر با ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر در نظر گرفته شد. برای بررسی پدیده

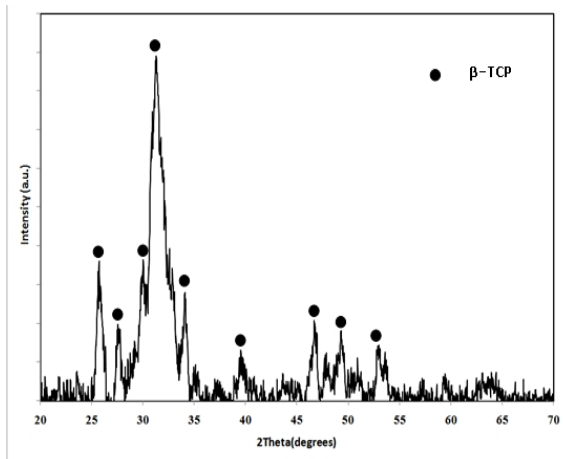
سرب که به عنوان ماده کمکی احتراق به بنزین افزوده می‌شود پس از احتراق در موتور وسایل نقلیه و پخش شدن در هوا، ممکن است روی منابع آب سطحی بنشیند و آنها را تدریجاً به سرب آلوده کند. این فلز سمی اختلالات گوناگونی در اعضای حساس بدن مانند اعضای سازنده خون و آنزیم‌ها و همچنین استخوان‌ها و اعصاب ایجاد می‌کند [۵-۱].

در این میان، تکنیک‌های گوناگونی برای کاهش غلظت فلزات سنگین وجود دارد که می‌توان به هم‌رسوبی شیمیایی، پدیده اسمز معکوس، تبخیر، تعویض یونی و جذب اشاره کرد. استفاده از تکنیک جذب، یکی از تکنیک‌های موثر و کاربردی است. بنابراین نیاز به پیدا کردن جاذب‌های موثر و اقتصادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۶].

توسعه محصولات جدیدی که جاذب موثری بوده، کمترین اثر مضر بر محیط زیست را داشته و ارزان قیمت باشند و برای حذف و کاهش غلظت فلزات سنگین در پساب‌های صنعتی به کار روند، یکی از مهمترین موضوعات مطرح در علم مواد است. با توجه به تحقیقات انجام شده در خصوص جذب فلزات سنگین توسط ترکیبات کلسیم فسفات در سال‌های اخیر، این واقعیت آشکار می‌شود که دو کلسیم فسفات با نام‌های هیدروکسی آپاتیت و بتا-تری کلسیم فسفات (ویت لوکیت) به دلیل داشتن بار سطحی منفی و قابلیت تعویض کاتیونی بیش از سایر ترکیبات مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۷].

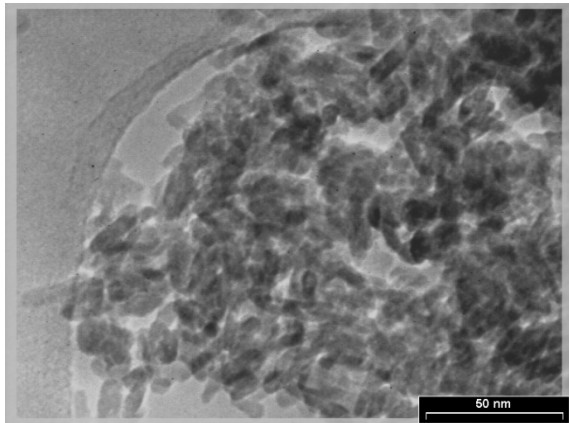
در پژوهشی توسط Chaturvedi و همکارانش بررسی سرعت جذب فلزات سنگین از خاک اصلاح شده با خاک برگ و هیدروکسی آپاتیت به صورت درجا صورت گرفت. تک‌دمای جذب لانگمیر استفاده شده برای مطالعه جذب نشان داد که مقدار فلز سنگین جذب شده بر روی خاک اصلاح شده به ترتیب زیر کاهش می‌یابد: $Pb^{2+} > Zn^{2+} > Cd^{2+}$. بررسی‌های سینتیکی فرآیند جذب نشان داد که مدل مرتبه دوم مناسب‌تر از مدل مرتبه اول است [۸]. در تلاش دیگری حذف سرب از محلول‌های آبی با غلظت

پراش قابل شناسایی نیست و تنها فازی که قابلیت شناسایی دارد فاز تری کلسیم فسفات (TCP) می‌باشد.



شکل ۱: الگوی پراش اشعه X پودر تری کلسیم فسفات بعد از سنتز و خشک شدن در دمای ۹۰°C.

برای بررسی اندازه بلورک‌ها و مشاهده دانه‌ها، پودر تری کلسیم فسفات سنتز شده پس از خشک شدن در دمای ۹۰°C توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری بررسی شد. نتایج این بررسی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری پودر نانو تری کلسیم فسفات خشک شده در دمای ۹۰°C جهت حذف سرب.

با توجه به تصاویر بدست آمده و تخمین اندازه بلورک‌ها از روی تصاویر باید توجه کرد که پودر تری کلسیم فسفات سنتز شده دارای ساختار نانومتری با اندازه دانه‌هایی در حدود ۳۰ تا ۴۰ nm با ساختار میله‌ای شکل نامنظم است.

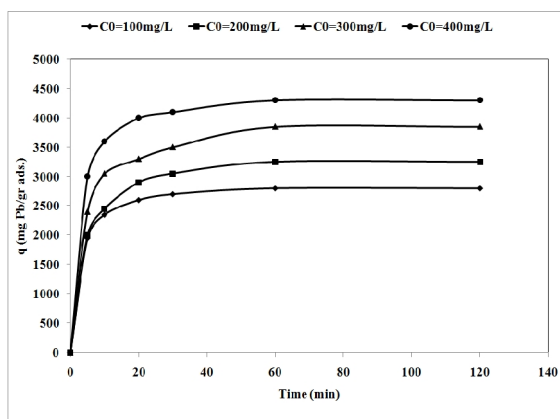
جذب، ۵۰۰ میلی لیتر از محلول با غلظت‌های اولیه اشاره شده در بالا، با مقدار ۰/۰۱ گرم از تری کلسیم فسفات نانو بلورین، در شرایط معین با هم مخلوط شدند. عملیات مخلوط شدن در درون یک بشر شیشه‌ای تمیز و بر روی یک همزن در دما و pH مشخص محیط انحلال (دمای ۲۵°C و pH=۶) با دور ثابت ۳۰۰ دور در دقیقه صورت گرفت. برای اندازه‌گیری میزان غلظت سرب باقیمانده در محلول، در زمان‌های مشخص ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه، محلول خارج گشته و پس از سانتریفیوژ و عبور از کاغذ صافی Whatman Grade6 غلظت سرب سنجیده شد. برای اندازه‌گیری غلظت، از طیف‌سنجی جذب اتمی مدل AAS:GBC 932 plus استفاده شد. اندازه‌گیری pH با استفاده از دستگاه Metrohm691 صورت گرفت.

برای تعیین فازهای بدست آمده بعد از سنتز و مطالعه ساختار آنها از روش‌های پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد. الگوهای پراش پرتو ایکس با دستگاه پراش پرتو ایکس Siemens تحت ولتاژ ۳۰ kV و جریان ۲۵ mA صورت گرفت. در تمام آزمایش‌ها از اشعه ایکس CuK α با طول موج ۱/۵۴۰۴ Å استفاده شد. زمان اقامت در هر گام یک ثانیه، اندازه گام ۰/۰۲ درجه و محدوده روبش بین ۲۰ تا ۷۰ درجه انتخاب گردید. برای بررسی اندازه و مورفولوژی ذرات تهیه شده، پس از سنتز و همچنین بررسی مورفولوژی و ریزساختار پس از جذب از دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری Philips استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

الگوی پراش اشعه ایکس پودر تری کلسیم فسفات بعد از سنتز و خشک شدن تا دمای ۹۰°C در شکل ۱ نشان داده شده است. الگوی پراش این پودر مشابه با الگوی استاندارد تفرق اشعه ایکس تری کلسیم فسفات استوکیومتری است، اما پهن و نامشخص بودن پیک‌ها نشانه آشکاری از میزان بلورینگی کمتر این ترکیب است. از طرف دیگر باید توجه نمود که هیچ پیک فاز کلسیم فسفات دیگری در الگوی

۲۸۰۰، ۳۲۵۰، ۳۸۵۰ و ۴۳۰۰ میلی گرم سرب به ازای یک گرم نانو تری کلسیم فسفات است. با استفاده از نتایج بدست آمده دیده شد که حذف یون سرب با استفاده از نانوذرات تری کلسیم فسفات با افزایش میزان غلظت یون سرب میزان جذب به ازای واحد جرم ماده جاذب افزایش می یابد. در حقیقت با داشتن یک غلظت اولیه بالاتر، یک نیروی محرک برای غلبه بر همه موانع انتقال جرم از آلوده کننده یون فلز سنگین، بین محلول و فاز جامد پدید می آید [۱۱،۱۲].



شکل ۳: تاثیر غلظت اولیه یون سرب (II) بر میزان جذب به ازای واحد جرم نانو تری کلسیم فسفات (دما ۲۵ °C، pH=۶ و rpm=۳۰۰).

برای بررسی تاثیر عامل دما بر حذف یون های دو ظرفیتی فلز سنگین سرب به وسیله نانو تری کلسیم فسفات، سه دمای ۲۵ (دمای محیط)، ۴۵ و ۶۵ درجه سانتیگراد (۲۹۸، ۳۱۸ و ۳۳۸ درجه کلوین) انتخاب و فرآیند جذب برای این عنصر در شرایط تعادلی انجام شد. در مورد سرب دیده شد که مقدار جذب یون سرب دو ظرفیتی بر نانو تری کلسیم فسفات با افزایش دما از ۲۵ به ۶۵ °C از ۴۳۰۰ میلی گرم به ازای یک گرم نانو تری کلسیم فسفات به ۵۰۰۰ میلی گرم به ازای یک گرم تری کلسیم فسفات با غلظت اولیه ۴۰۰ میلی گرم در لیتر در شرایط تعادلی افزایش یافته است. نتایج بدست آمده در شکل ۴ ارائه شده است.

در حقیقت با افزایش دما، افزایشی در مقدار جذب تعادلی یون های فلز سنگین سرب مورد بررسی، دیده شد. دلیل این امر ممکن است در نتیجه افزایش قابلیت تحرک (موبیلیته)

در بررسی فرآیند جذب، در ابتدا عامل اساسی و اثرگذار بر این فرآیند معرفی می شوند. عامل اساسی مقدار فلز سنگین جذب شده بر روی ماده جاذب به ازای واحد جرم ماده جاذب است که با نماد q نشان داده شده و با رابطه (۱) تعریف می شود [۱۱،۱۲].

$$q = \frac{(C_i - C_f) \times V}{m} \quad (1)$$

در این رابطه C_i و C_f غلظت اولیه و نهایی عنصر فلز سنگین، V حجم محلول دارای یون فلز سنگین بر حسب لیتر و m جرم ماده جاذب (در این پژوهش نانو تری کلسیم فسفات) بر حسب گرم است. پس از رسیدن به زمان تعادل یعنی هنگامی که سرعت جذب با سرعت واجذب بر روی ماده جاذب برابر شده و تغییر چشمگیری در غلظت یون فلز سنگین با گذشت زمان دیده نشود، عامل q_e موسوم به میزان فلز سنگین جذب شده بر روی ماده جاذب، به ازای واحد جرم جاذب، در حالت تعادل تعریف می شوند.

در شکل ۳ نمودار میزان جذب فلز سرب به ازای واحد جرم در چهار غلظت اولیه ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی گرم در لیتر از عنصر سرب با زمان نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود پس از گذشت ۱۲۰ دقیقه، میزان جذب تقریباً ثابت شده و تغییر در ظرفیت جذب محلول ناچیز است، پس می توان نتیجه گرفت که پس از این زمان، فرآیند جذب به حالت تعادلی رسیده و سرعت فرآیند جذب سرب توسط تری کلسیم فسفات نانو بلورین با سرعت واجذب آن برابر شده است. از زمان ۲۰ دقیقه به بعد، این تغییرات ظرفیت جذب ناچیز بوده ولی برای اطمینان از رسیدن به شرایط تعادلی، اندازه گیری ها تا زمان ۱۲۰ دقیقه ادامه پیدا کرده و این زمان به عنوان زمان رسیدن به حالت تعادل در نظر گرفته شد.

با توجه به شکل ۳ دیده شد که میزان جذب به ازای واحد جرم جاذب برای غلظت های اولیه ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی گرم در لیتر از عنصر سرب در تعادل به ترتیب برابر با

$$Kd = \frac{\text{مقدار فلز سنگین جذب شده بر ماده جاذب}}{\text{مقدار فلز سنگین باقیمانده در محلول}} \times \frac{V}{m} \quad (۳)$$

که در آن V حجم محلول براساس میلی لیتر و m جرم ماده جاذب بر اساس گرم است. پس با تغییر دما و اندازه‌گیری و محاسبه ثابت تعادل می‌توان تغییرات انرژی آزاد استاندارد را با تغییرات دما بدست آورد. از طرف دیگر با رسم نمودار خطی تغییرات انرژی آزاد استاندارد با دما به کمک رابطه ۴ می‌توان تغییرات آنتروپی استاندارد جذب و تغییرات آنتالپی استاندارد جذب را حساب کرد [۱۳].

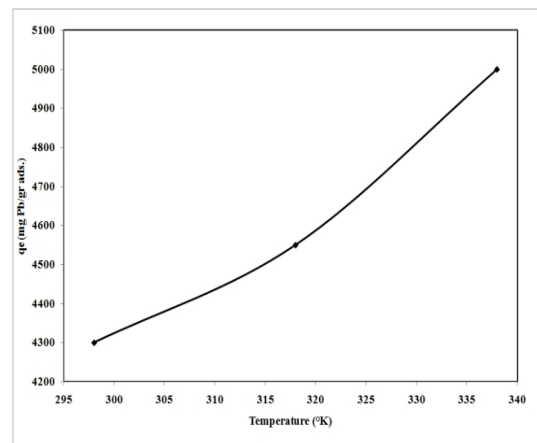
$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (۴)$$

با توجه به رابطه ۴، با رسم نمودار خطی تغییرات انرژی آزاد استاندارد گیبس فرآیند جذب با دما، با استفاده از شیب خط، تغییرات آنتروپی و عرض از مبدا، تغییرات آنتالپی فرآیند جذب محاسبه می‌شود.

شکل ۵ نمودار تغییرات انرژی آزاد استاندارد گیبس فرآیند جذب یون دو ظرفیتی سرب با دما را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار دیده می‌شود که با افزایش دما انرژی آزاد استاندارد گیبس سیستم کاهش می‌یابد. از طرف دیگر تغییرات انرژی آزاد استاندارد گیبس با دماهای گوناگون نشان می‌دهد که رفتار خطی با ضریب همبستگی مناسب ($R^2=0.999$) بین این دو عامل وجود دارد. تغییرات آنتالپی استاندارد و تغییرات آنتروپی استاندارد فرآیند جذب یون سرب توسط نانو بلورک‌های تری کلسیم فسفات، به ترتیب با اندازه‌گیری عرض از مبدا و شیب این نمودار خطی (شکل ۵) بدست آمده است.

محاسبات مربوط به این اندازه‌گیری در جدول ۱ دیده می‌شود. با توجه به این جدول، مقادیر ۴۱۴۰ ژول بر مول و ۹۲/۹۸ ژول بر مول درجه کلوین به ترتیب برای تغییرات استاندارد آنتالپی و تغییرات استاندارد آنتروپی به دست آمده

یون‌های نسبتاً بزرگ فلز سنگین مورد بررسی با دما دانست که در نتیجه باعث افزایش در تعداد مولکول‌هایی که ممکن است دارای انرژی کافی برای ایجاد یک برهمکنش با عوامل فعال سطحی ماده جاذب باشند، خواهد شد. همچنین افزایش دما ممکن است باعث پدید آمدن حالت انبساطی در سطوح داخلی نانو تری کلسیم فسفات به‌عنوان ماده جاذب شده و در نتیجه به‌وجود آمدن چنین قابلیت‌هایی یون‌های فلزات سنگین موجود دارای قابلیت نفوذ بیشتری در ساختار هستند که این امر نیز خود افزایش میزان جذب را به همراه دارد [۱۳].



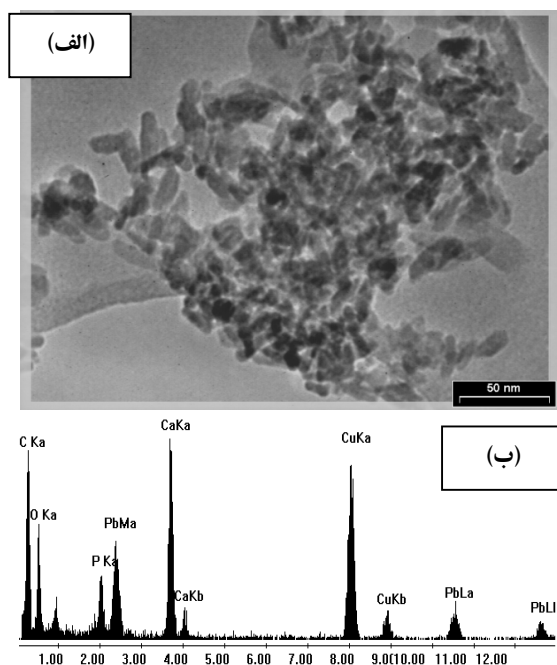
شکل ۴: تاثیر دما بر مقدار جذب سرب به ازای واحد جرم نانو تری کلسیم فسفات (pH=۶، rpm=۳۰۰، و غلظت اولیه ۴۰۰ mg/L از سرب)

عامل‌های ترمودینامیکی مانند انرژی آزاد گیبس، تغییرات آنتالپی و تغییرات آنتروپی را می‌توان با استفاده از تغییرات ثابت تعادل با دما در حالت تعادلی مورد بررسی و محاسبه قرار داد. تغییرات انرژی آزاد گیبس و اکشن جذب بوسیله معادله (۲) محاسبه می‌شود [۱۳].

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_d \quad (۲)$$

که این رابطه ΔG° تغییرات انرژی آزاد استاندارد با واحد ژول، R ثابت عمومی گازها با مقدار ۸/۳۱۴ ژول بر مول درجه کلوین و T دمای مطلق براساس درجه کلوین است. ثابت تعادل نیز با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۱۳].

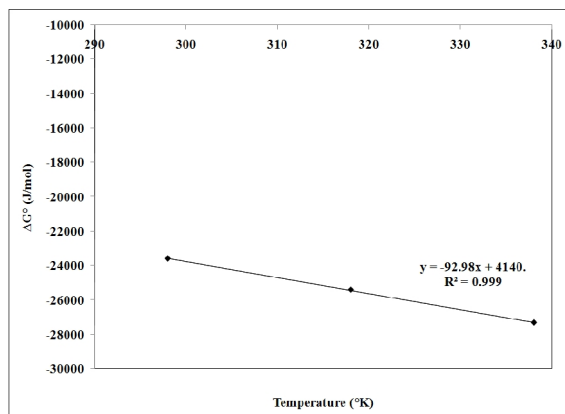
تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری پودر نانوبلورک تری کلسیم فسفات پس از حداکثر جذب یون سرب در شکل ۶ ارائه شده است. با توجه به تصویر ذراتی با شکل های نامنظم مانند تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری تری کلسیم اولیه اولیه (شکل ۲) و دارای اندازه ذراتی در حدود ۳۰-۴۰ نانومتر قابل تشخیص خواهد بود. جهت تعیین عناصر موجود در ساختار ذرات موجود با استفاده از امکانات جانبی دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری مورد آنالیز طیف سنجی تفکیک انرژی قرار گرفت.



شکل ۶: الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (ب) تصویر طیف سنجی تفکیک انرژی پودر نانو تری کلسیم فسفات پس از حداکثر جذب یون سرب (شرایط: غلظت اولیه ۴۰۰ میلی گرم در لیتر، جرم جاذب ۰/۰۱ گرم، دما و pH محیط).

در شکل ۶ (ب) تصویر طیف سنجی تفکیک انرژی ذرات میله ای شکل بی نظم دیده می شود. با توجه به این الگو مشخص است که ذرات میله ای شکل دارای عناصر کلسیم، فسفر، اکسیژن و سرب می باشند پس این ذرات را می توان همان ذرات نانو تری کلسیم فسفات دانست که دارای همان مورفولوژی اولیه بوده که فقط جذب Pb بر روی آنها صورت

است. منفی بودن انرژی آزاد استاندارد گیبس سیستم نشان دهنده آن است که این فرآیند جذب به صورت خودبخودی صورت می گیرد.



شکل ۵: تغییرات انرژی آزاد استاندارد گیبس سیستم جذب سرب دو ظرفیتی توسط نانو بلورک های تری کلسیم فسفات با دما.

جدول ۱: عامل های ترمودینامیکی جذب سرب دو ظرفیتی توسط نانو بلورک های تری کلسیم فسفات.

| T (K) | K_d | ΔG° (J/mol) | ΔH° (J/mol) | ΔS° (J/mol.K) |
|-------|---------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| ۲۹۸ | ۱۳۶۹۴/۳ | -۲۳۵۹۸/۲ | | |
| ۳۱۸ | ۱۴۷۲۴/۹ | -۲۵۳۷۳/۸ | ۴۱۴۰ | ۹۲/۹۸ |
| ۳۳۸ | ۱۶۶۶۶/۷ | -۲۷۳۱۷/۸ | | |

در ادامه باید اشاره کرد که مثبت بودن تغییرات آنتالپی استاندارد واکنش جذب، نشانه گرماگیر بودن فرآیند است. مثبت بودن تغییرات آنتروپی استاندارد سیستم نیز نشان دهنده افزایش بی نظمی در فصل مشترک فرآیند جذب جامد/محلول است. به عبارت دیگر مثبت بودن تغییرات آنتروپی استاندارد سیستم، نشان دهنده افزایش بی نظمی در نانوبلورک های تری کلسیم فسفات در فرآیند جذب یون سرب دو ظرفیتی نسبت به حالت اولیه قبل از فرآیند جذب است و با توجه به این موضوع می توان پیشنهاد کرد که تغییر و افزایش بی نظمی در ساختار تری کلسیم فسفات، در فرآیند جذب اتفاق افتاده است.

مثبت بودن تغییرات آنتالپی استاندارد واکنش جذب نشانه گرماگیر بودن فرآیند در سیستم جذب است. مثبت بودن تغییرات آنتروپی استاندارد سیستم نیز نشان دهنده افزایش بی‌نظمی در فصل مشترک فرآیند جذب جامد/محلول است.

گرفته است. در حقیقت فرآیند جذب سرب باعث تغییر در مورفولوژی و ماهیت شیمایی نانوذرات تری کلسیم فسفات شده و جذب فیزیکی اتفاق افتاده است.

۴- نتیجه‌گیری

بررسی‌های انجام شده در پژوهش حاضر نشان داد که تری کلسیم فسفات نانوبلورین از توانایی مناسبی برای حذف یون‌های دو ظرفیتی فلز سنگین سرب برخوردار است. عمده فرآیند حذف یون دو ظرفیت سرب در لحظه‌های اولیه و در زمان ۱۰ دقیقه ابتدایی شروع واکنش رخ داده است که این پدیده نشان دهنده سرعت سریع فرآیند جذب سرب توسط تری کلسیم فسفات نانو بلورین خواهد بود. با افزایش میزان غلظت یون فلز سنگین سرب میزان جذب به ازای واحد جرم ماده جاذب افزایش می‌یابد.

افزایش دما در محلول‌های آبی باعث افزایش فرآیند جذب شده و از این رو فرآیند جذب انواع یون‌های فلزات سنگین (Hard metals) را می‌توان یک فرآیند گرماگیر دانست. منفی بودن انرژی آزاد استاندارد گیبس در سیستم جذب نشان دهنده آن است که فرآیند جذب سرب به صورت خودبخودی صورت می‌گیرد.

مراجع

- [1] G. Wang, S. Zhang, P. Yao, Y. Chen, X. Xu, T. Li, G. Gong, *Arabian Journal of Chemistry*, **11**, 2018, 99.
- [2] C. Femina-Carolin, P. Senthil-Kumar, A. Saravanan, G. Janet-Joshiba, M. Naushad, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **5**, 2017, 2782.
- [3] M. Kashif, *Chemical Engineering Journal*, **308**, 2017, 438.
- [4] E. Malkoc, Y. Nuhoglu, *Separation and Purification Technology*, **54**, 2007, 291.
- [۵] فاطمه هاشمی، هوشنگ برهام، مجله مهندسی شیمی ایران، جلد ۵، شماره ۱۷، ۱۳۸۴، ۱۰-۱۷.
- [6] A. E. Burakov, E.V. Galunin, I.V. Burakova, A.E. Kucherova, S. Agarwal, A.G. Tkachev, V.K. Gupta, *Ecotoxicol Environ Safety*, **148**, 2018, 702.
- [۷] ایمان مباحشرپور، اسماعیل صلاحی، هودسا مجیدیان، مجله نانومواد، شماره ۵، ۱۳۹۲، ۳۵-۴۴.
- [8] P.K. Chaturvedi, C.S. Seth, *Chemosphere*, **64**, 2006, 1109.
- [9] B. Sandrine, N. Ange, B.A. Didier, C. Eric, S. Patrick, *Journal of Hazardous Materials*, **139**, 2007, 443.
- [10] I. Mobasherpour, E. Salahi, S.A. Manafi, R. Darvishi-Kamachali, *Materials Science-Poland*, **29**, 2011, 203.
- [11] I. Mobasherpour, E. Salahi, M. Pazouki, *Arabian Journal of Chemistry*, **5**, 2012, 439.
- [12] I. Mobasherpour, E. Salahi, M. Ebrahimi, *Research on Chemical Intermediates*, **38**, 2012, 2205.
- [13] I. Mobasherpour, E. Salahi, M. Pazouki, *Desalination*, **266**, 2011, 142.