

حذف یون کروم شش ظرفیتی از محلول آبی به کمک گل قرمز: یک مطالعه تجربی

مهرداد نوبخت و کیلی

کارشناس ارشد، گروه علوم پایه، رشته بیوشیمی، دانشگاه کردستان

vakilimehrdad777@gmail.com

چکیده

کروم شش ظرفیتی و ترکیباتش از مهمترین آلاینده های زیست محیطی می باشد که وجودشان در آب ها و پساب ها به مشکلی عمده تبدیل شده است که به دلیل اثرات مخرب این فلز سنگین و مشتقاتش بر سلامتی انسان ها و بهداشت محیط، لزوم یافتن راه های جدید و فناوری های نوین برای حذف آن احساس می شود. و بر این اساس در این تحقیق حذف کروم شش ظرفیتی از محلول آبی، به روش جذب سطحی توسط جاذب گل سرخ مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق سه نمونه گل سرخ، خام و اصلاح شده با اسید هیدرو کلریک و اصلاح شده با نیتریک اسید مورد مطالعه قرار گرفتند طبق نتایج بدست آمده برای گل اصلاح شده با هیدرو کلریک اسید مشاهده شد با افزایش غلظت اولیه یون کروم، درصد حذف کاهش یافت و برای گل اصلاح شده با نیتریک اسید مشاهده شد درصد حذف با افزایش غلظت اولیه یون کروم افزایش یافت. همچنین زمان تعادل برای هر دو نمونه اصلاح شده، ۳۰ دقیقه به دست آمد. در بررسی مدل نفوذ درون ذره ای برای گل قرمز اصلاح شده با هیدروکلریک اسید و نیتریک اسید، نتایج نشان داد مدل نفوذ درون ذره ای پدیده غالب در کنترل جاذب می باشد همچنین به منظور تعیین ثابت سرعت فرآیند جذب، داده های آزمایشگاهی با مدل های سینتیکی شبه درجه اول و شبه درجه دوم مقایسه شد و مشاهده شد جذب کروم توسط جاذب گل سرخ اصلاح شده با هیدرو کلریک اسید، از سینتیک شبه درجه دوم و همچنین گل قرمز اصلاح شده با نیتریک اسید از مدل سینتیکی شبه درجه اول پیروی می کند. همچنین نتایج حاصل از محاسبه پارامتر های ترمودینامیکی نشان داد واکنش جذب گرما گیر است و همچنین با افزایش بی نظمی در طی واکنش همراه است اما مقادیر مثبت انرژی آزاد گیبس نشان دهنده غیر خود به خودی بودن واکنش است. ایزوترم لانگمویر و فروندلیچ برای هر نوع گل اصلاح شده بررسی شد که نشان دهنده پیروی هر دو نمونه از این ایزوترم ها بود. همچنین جهت بررسی ویژگی های جاذب آنالیزها FTIR، BET، SEM، XRD بر روی گل قرمز خام و اصلاح شده با هیدروکلریک اسید و نیتریک اسید انجام شد که نتایج آن در ادامه توضیح داده خواهد شد.

کلیدواژه: کروم شش ظرفیتی، جذب سطحی، گل قرمز

مقدمه

پیشرفت دانش بشری و افزایش توانایی او در استفاده از منابع طبیعی و ساخت و تهیه مواد و ابزارهای گوناگون، منجر به پیدایش واحد های صنعتی و تولیدی بسیاری شده است. بر اساس آمار و ارقام ارائه شده، در همه این صنایع کوچک و بزرگ مصرف آب رقم بالایی دارد. و در عین حال عمده آب مصرفی به صورت فاضلاب و پساب خارج می گردد. این پساب ها عمدتاً به رودخانه ها و بعضاً به مخازن زیر زمینی سرازیر می شود و بدین طریق در چرخه طبیعت قرار می گیرند [۱]

عدم توجه به ماهیت این فاضلاب ها و پساب ها، اثرات زیان باری در پی خواهد داشت. بیشترین اثرات سوء مربوط به یون های فلزات سنگین موجود در پساب ها می باشد. فلزات سنگین و مشتقاتشان به دلیل پایداری، از عوامل اصلی آلوده کننده محیط زیست می باشد. از جمله این عناصر، فلز کروم است. کروم حالت های اکسایش فراوانی دارد که از آن میان به حالت های اکسایش ۳+ و ۶+، بیش تر از سایر حالت مشاهده شده اند. ترکیبات کروم III، معمولاً برای سلامتی خطرناک نیستند اما ترکیبات کروم VI، از عمده عوامل تهدید کننده سلامتی انسان ها و بهداشت محیط می باشد. منابع انتشار آن ها اکثراً، پساب صنایع چرمسازی، نساجی، صنایع رنگ و آبکاری فلزات می باشد. به دلیل اثرات مخرب آن بر سلامت انسان و بهداشت محیط، لزوم یافتن راه های جدید و فناوری های نوین برای حذف آن احساس می شود [۲]

یکی از روش های جامع و موثر برای حذف کروم، روش جذب سطحی می باشد. امروزه با پیشرفت تکنولوژی، جاذب های متنوع و جدیدی به وجود آمده اند [۳] با انتخاب یک جاذب مناسب پدیده جذب می تواند تکنیکی مناسب برای جذب فلزات سنگین از فاضلاب باشد، اما پر هزینه بودن تهیه و تولید این جاذب ها و همچنین مشکل بودن جداسازی آن ها بعد از تصفیه از مهمترین علل استفاده محدود از آن هاست.

استفاده از مواد زائد طبیعی که توانایی جذب آلاینده هایی نظیر فلزات سنگین را دارند در دهه های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. دلیل این امر آن است که این مواد ارزان قیمت بوده و در طبیعت به وفور یافت می شوند و نیز هزینه بالای مربوط به احیا استفاده کرد که در استفاده از بسیاری از جاذب ها مطرح است را ندارند و با توجه به کم هزینه بودن می توان آن ها را پس از مصرف دفع نهایی نمود [۳] به همین جهت در طی دو دهه گذشته تحقیقات فراوانی بر روی جاذب های کم هزینه مختلف صورت گرفته

و محققان بسیاری جاذب های کم هزینه متنوعی را به جای کربن فعال تجاری برای حذف فلزات سنگین N بررسی کرده اند که از آن جمله به انواع رس ها، زئولیت های طبیعی، خاکستر فرار (خاکستر حاصل از سوختن سوخت فسیلی در نیروگاه های حرارتی)، اکسید های طبیعی (اکسید آلومینیوم و فری هیدریت) سلیکاژل، لیگنین، کیانیت، پوست درختان (کاج و گردو) پوست بوته کالوا، خاک اره، پوسته برنج، پوسته دانه های کتان و سویا، تفاله نیشکر، چغندر، کاه و پوشال، گندم، پوسته سخت نارگیل، گردو، فندق، بلوط، حصیر و نی، هسته های هلو و زرد آلو و خرما، دانه های انگور، زائدات برگ، چای، زائدات صنایع فراوری میوه جات، موی و استخوان حیوانات، پوست خرچنگ، کیتوزان اشاره کرد [۴]

در این پژوهش از جاذب گل قرمز اصلاح شده با اسید جهت حذف یون فلز کروم از پساب با استفاده از روش جذب سطحی استفاده شد و مدل سینتیکی شبه درجه اول و دوم، ایزوترم های جذب لانگمویر و فرنرندلیچ، پارامتر های ترمودینامیکی و مکانیزم جذب مورد مطالعه قرار گرفت که به تفصیل توضیح داده خواهد شد.

مبانی نظری

فلزات سنگین اصولاً به دسته ای از عناصر اطلاق می شود که دارای وزن مخصوص بزرگتر از ۵ گرم بر سانتی متر مکعب و وزن اتمی بالا باشد که از جمله آن ها می توان جیوه، سرب، کروم، کادمیم، نیکل را نام برد. این عناصر از اجزاء تشکیل دهنده بیوسفر (Biosphere) هستند و به طور طبیعی در خاک و گیاهان نیز یافت می شوند. بعضی از آن ها در مقادیر جزئی به عنوان عناصر ضروری (Essential Elements) تلقی شده و وجود آن ها در جیره غذایی انسان و سایر موجودات زنده لازم است به همین دلیل به آن ها عناصر ضروری گفته می شود. حضور این عناصر در غلظت های بیش تر از حد مجاز، عوارض سوء متعددی هم برای انسان و هم برای سایر موجودات زنده ایجاد کرده. ضمن آن که آلودگی و خطرات زیست محیطی را نیز به

همراه دارد به عنوان مثال از میان این فلزات آهن، منگنز، روی، مولیبدن، مس برای رشد گیاهان لازم است. ولی در عین حال تراکم زیاد این فلزات، برای انسان خطراتی را به همراه دارد [۶۵]. فلزات سنگین و مشتقاتشان به دلیل پایداریشان از عوامل اصلی آلوده کننده محیط زیست می باشد و اغلب توسط فاضلاب ها و پساب های صنعتی به چرخه آب های طبیعی وارد می شوند [۱]. از جمله منابع آلاینده محیط زیست در ارتباط با فلزات سنگین عبارتند از صنایع فلزی، ریخته گری، آبکاری، رنگسازی، باطری سازی، دباغی، نساجی، کاغذ سازی و سایر صنایع مشابه که با دفع و انتشار عناصری همچون کروم، کادمیم، جیوه، نیکل، سرب، مس، نقره در محیط باعث آلودگی می شوند. این فاضلاب ها اثرات زیان آور زیادی برای حیات زیستی ایجاد می کند و نیز موجب تجمع و افزایش غلظت در سطوح بالاتر و زنجیره غذایی شده و می توان تا چندین برابر آن را در بدن موجودات زنده مشاهده نمود. بنابراین حذف این فلزات از پساب ها قبل از تخلیه آن ها به سیستم فاضلاب شهری و یا صنعتی، یک ضرورت اجتناب پذیر است [۷].

کروم

کروم از عناصر انتقالی گروه ششم جدول تناوبی با علامت اختصاری Cr، عدد اتمی ۲۴، وزن اتمی متوسط ۵۱،۹۹۶ و بیست و یکمین عناصر فراوان در طبیعت است. این عنصر به عنوان یک فلز واسطه در تمام حالت های اکسیداسیون ۲ تا ۶ ظرفیتی وجود دارد که از میان این دو حالت ۳+ و ۶+ بیش ترین فراوانی را دارا می باشند کروم نام خود را از کلمه ی یونانی کروما (Chroma) به معنی رنگ گرفته زیرا اغلب اصلاح آن رنگین می باشد. [۱۱]

کاربردهای کروم و منابع انتشار آن ها

ترکیبات کروم بصورت گسترده ای در صنایع مورد استفاده قرار می گیرند. در کشورهای صنعتی بیش ترین مقدار مصرف کروم در صنعت محافظ و مقاوم سازی چوب می باشد. ترکیبات کروم که جزء عمده همه آن ها (CrO_2) است، با تشکیل ترکیبات کم محلول با عصاره و شیرابه چوب باعث افزایش مقاومت چوب شده و همچنین مانع رشد قارچ ها و باکتری ها در روی چوب می شود [۱۲]. از دیگر کاربردهای مهم کروم آبکاری و پوشش فلزات به منظور استحکام بخشیدن به فلز و حفاظت آن از خوردگی می باشد آبکاری فلزات در صنایع بسیاری کاربرد دارد که از جمله این صنایع می توان به صنایع خودرو سازی و صنایع نظامی اشاره کرد. ترکیبات کروم در صنایع رنگ و ضد رنگ نیز کاربرد های فراوانی دارند. این رنگ ها و ضد رنگ ها از واکنش کرومات ها و دی کرومات ها با عوامل کاهنده و یا اکسید فلزات دو ظرفیتی تهیه می شوند. [۱۳]

کروم این توانایی را دارد که با پروتئین ها، مواد سلولزی و پلیمرهای سنتزی مختلف کمپلکس های پایدار تشکیل می دهد و این قابلیت موجب شده کروم در صنایع نساجی و دباغی کاربرد داشته باشد و در همین راستا در تهیه پوشش های ضد آب و ضد روغن بر روی الیاف مصنوعی نیز از کروم استفاده می شود [۱۴].

استفاده از سدیم کرومات و سایر ترکیبات کروم در فرمول گل حفاری برای مقابله با فرسایش و خوردگی از کاربردهای کروم در صنایع نفت و گاز است. ترکیبات کروم دار دیگری که در گل حفاری مورد استفاده قرار می گیرند، کرومیوم لیگنوسولفونات است. [۱۵]

تعداد زیادی از ترکیبات کروم در مقادیر کم برای استفاده های متنوع به کار می روند. تعدادی از این کاربردها عبارتند از استفاده به عنوان کاتالیزور تهیه مواد حساس به نور در صنعت چاپ، صنعت باطری سازی و استفاده به عنوان واکنش گر شیمیایی [۱۶]. در پساب و فاضلاب تمامی صنایع فوق الذکر، مقادیر و اثراتی از کروم و ترکیباتش موجود می باشد. این پساب ها معمولاً به آب های سطحی یا زیرزمینی تخلیه شده و وارد محیط زیست و چرخه طبیعت می شوند.

تأثیر کروم بر سلامتی انسان و محیط زیست :

از آنجایی که کروم در دو حالت اکسایش ۳+ و ۶+ بیش ترین فراوانی را دارا می باشد. اغلب پژوهش ها و بررسی ها که در مورد سمیت کروم انجام شده است مربوط به این دو حالت اکسایشی می باشد. تحقیقات نشان می دهد که کروم در حالت اکسایش ۶+ بسیار سمی است. کروم در این حالت اکسایش در

گستره وسیعی از PH در آب محلول است. و از طریق تنفس، بلع، و تماس با پوست می تواند به بدن نفوذ کند و در صنعت خطر جذب کروم از طریق پوست از بالاترین درجه اهمیت برخوردار است. نقش کروم ۶ ظرفیتی در ایجاد سرطان ریه به اثبات رسیده است. همچنین ترکیبات شامل این فلز باعث آسیب جدی در کلیه ها می شوند. کرومات ها در ایجاد بیماری های هیپاتیت و برونشیت، آسیب های معده می تواند موثر باشد. یکی از بیماری هایی که گریبانگیر کارگران صنعت آبکاری می شود و علت بروز آن کروم ۶ ظرفیتی می باشد، تحریک مخاط و سرطان تیغه بینی است [۱۷].

کروم ۶ ظرفیتی می تواند از غشای پلاسمایی سلول به داخل آن نفوذ کند. در سلول آنزیم ها و سایر سیستم ها موجب کاهش کروم شش ظرفیتی به حالت های پنج، چهار و سه ظرفیتی می شوند. این کاهش در داخل سلول یک فرآیند مضر می باشد. زیرا در نهایت کروم ۳ ظرفیتی در داخل سلول تجمع می یابد و موجب تغییر ساختار DNA می شود. این فرآیند یکی از علل سرطان زایی کروم می باشد. در مورد گیاهان و سایر موجودات زنده نیز این تجمع و تغییر ساختار DNA موجب تغییرات ژنتیکی مضر و ایجاد بیماری ها و عوارض ناشناخته می شود. ترکیبات کروم سه ظرفیتی نسبت به کروم شش ظرفیتی سمیت کمتری دارد زیرا انحلال پذیری ترکیباتش در PH های مختلف بسیار کمتر از کروم شش ظرفیتی است همچنین تحرک و جابه جایی کروم در حالت اکسایش (+۳) کمتر می باشد. [۱۸]

سازمان بهداشت جهانی حد مجاز کروم شش ظرفیتی در پسابی که قرار است به محیط یا آب های زیرزمینی تخلیه شود را حداکثر ۰/۱ میلی گرم در لیتر و برای آب آشامیدنی ۰/۰۵ میلی گرم در لیتر تعیین کرده است. [۱۹]

روش های تصفیه فلزات سنگین از محلول های آبی :

تصفیه محلول های آبی به صورت شیمیایی، بیولوژیکی و فیزیکی می توان انجام داد. تصفیه محلول های آبی کروم نیز از این قاعده مستثنی نیست. در ادامه توضیح مختصری از این روش ها ارائه خواهد شد

روش های شیمیایی :

در تصفیه شیمیایی محلول های آبی که بر مبنای واکنش های شیمیایی می باشند، روش های زیر به کار گرفته می شوند

رسوب دهی شیمیایی:

رسوب دهی یک فرایند شیمیایی است که به موجب آن، برخی و یا تمام موادی که به حالت محلول هستند، به فاز جامد تبدیل شده و حذف می گردند. میزان موادی که به صورت محلول باقی می ماند تا حدود زیادی به حلالیت رسوب مربوطه و وضعیت تعادل شیمیایی موجود بستگی دارد. بسته به ماده ای که قرار است رسوب داده شود، از رسوب دهنده های متنوعی می توان استفاده نمود که عمده ترین آن ها عبارتند از: -ترسیب هیدروکسید -ترسیب سولفید -ترسیب فرو -ترسیب گزانتات -ترسیب پرو هیدرات سدیم، گرچه این روش ها جهت حذف اغلب فلزات مانند کروم، روی، کادمیم، مس، سرب، منگنز، جیوه به طور موثر و کارا به کار گرفته می شود. علاوه بر مزایایی که دارند، دارای معایب و محدودیت هایی نیز هستند. به عنوان مثال، در برخی از شرایط ترکیبات آلی سبب ایجاد کمپلکس های آلی فلزی می گردند که این ترکیبات از ته نشینی جلوگیری به عمل می آورد. سیانید ها و سایر یون های موجود در پساب نیز ممکن است با فلزات ایجاد کمپلکس نموده و کارایی فرایند رسوب دهی را کاهش دهند.

الکترولیز:

روش الکتروشیمیایی بر اساس عبور جریان مستقیم الکتریسیته از محلول که قطب های مثبت و منفی در آن قرار گرفته اند، می باشد. الکتروده ها می توانند از جنس آهن و آلومینیوم انتخاب گردند. با عبور جریان در کاتد، فلز احیا می شود و در همان زمان محصولات گازی شکل مانند گاز اکسیژن و هیدروژن و یا نیتروژن در آند متصاعد می شود. گاز های به دست آمده به ترکیب شیمیایی محلول بستگی دارند. در این فرایند لایه فلزی در کاتد به تدریج ضخیم می شود و می توان از آن مجدداً استفاده نمود. از جمله عواملی که در بازیابی فلزات توسط این روش موثر است، غلظت اولیه فلز، مقدار انرژی، و خصوصیات الکتروده است

گل قرمز:

گل قرمز به عنوان یک پسماند در طی فرآیند بوکسیت سنگ معدن رایج آلومینیوم بوجود می آید بوکسیت حاوی درصد بالایی هیدروکسید آلومینیوم است و به منظور تولید آلومینا توسط فرایند شیمیایی بایر استفاده می شود. در فرایند بایر بوکسیت بعد از خرد شدن جهت حذف ناخالصی ها مورد شستشو قرار گرفته و پودر آن همراه سدیم-هیدروکسید در دماهای بالا تحت واکنش قرار می گیرد تا هضم شود و آلومینیوم هیدروکسید تشکیل شود و اما باقی مانده بوکسیت که در محلول سدیم هیدروکسید حل نمی شود (گل قرمز) رسوب گل قرمز از محلول جدا و پس از بازیابی و صاف شدن به عنوان پسماند دفع می شود. هر ساله ۹۰ میلیون تن گل قرمز در جهان تولید می شود که ترکیب آن بسته به نوع کانی و فرایند بوکسیت متفاوت است. به ازای هر تن آلومینای تولیدی فرایند بایر، یک تا بیش از دو تن گل قرمز تولید می شود. گل قرمز به شدت قلیایی (PH=10-13) می باشد که به علت درصد بالای سدیم هیدروکسید مورد استفاده در فرایند است. این محصول حاصل از فرایند بوکسیت در حین استخراج آلومینا به عنوان محصول ضایعاتی از نظر انبار داری و نگهداری در محیط زیست، مشکل بزرگی در صنایع آلومیناست گل قرمز برای نگهداری به محل های رو باز بزرگی موسوم به دریاچه گل منتقل می شود روش های مختلفی در دنیا برای ذخیره و نگهداری گل قرمز مورد استفاده قرار گرفته اما هیچ یک از آن ها از دیدگاه زیست محیطی مطلوب نیست نظیر ریختن آن ها در دریا ها و پمپاژ آن ها در حوضچه های بزرگ برای کاهش خطرات زیست محیطی گل قرمز، مطالعات زیادی روی آن صورت گرفته مانند بکار گیری در جاذب و دفع سولفید هیدروژن از پسماند های صنعتی، صنایع رنگ سازی و بکار گیری در مصالح ساختمانی مثل ساخت انواع آجر ها، سرامیک استفاده شده از گل قرمز به عنوان جاذب در حذف آلودگی های فلزی نیز از جمله کاربرد گل قرمز است. گزارشات زیادی درباره استفاده از گل قرمز به عنوان یک جاذب ارزان قیمت برای حذف فلزات سنگین ارائه شده است [۳۷]: این تحقیق به بررسی استفاده از گل قرمز در تصفیه فلزات سنگین آلوده کننده و حذف یون کروم شش ظرفیتی پرداخته و برای مطالعه جذب فلز، گل قرمز به عنوان جاذب در محلول کروم در شرایط مختلف اضافه شد. از میان روش های مختلف فیزیکی و شیمیایی برای حذف فلزات سنگین، فرایند جذب سطحی دارای مزایایی از قبیل قیمت پایین جاذب، دسترسی آسان، استفاده از ماده ی باطله به عنوان جاذب استفاده مجدد از جاذب پس از بازیابی ظرفیت حذف یون های فلزات سنگین در محدوده ی وسیع PH و در سطح غلظتی پایین و سازگار با محیط زیست است. در این تحقیق از گل قرمز جهت حذف فلز کروم از محلول های آبی استفاده شد.

بررسی مکانیزم واکنش

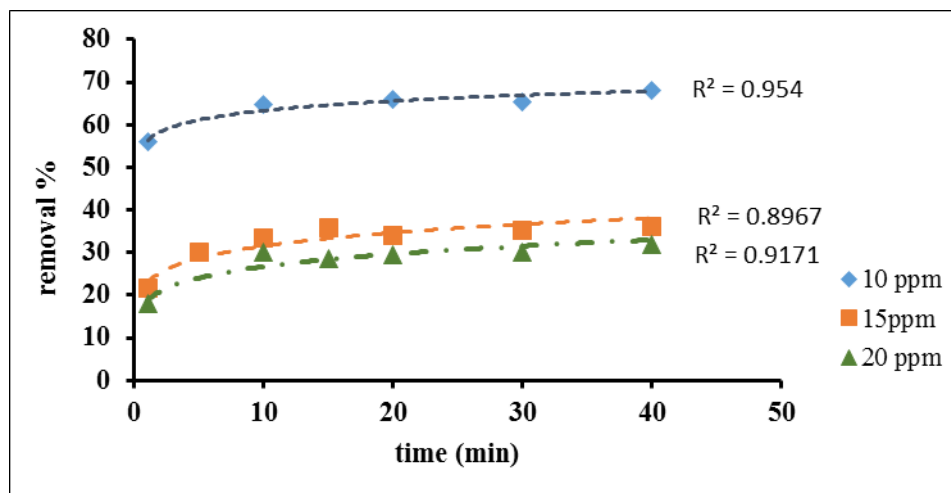
آزمایش های مربوط به مکانیزم جذب انجام شد که نتایج آن به شرح زیر است. با استفاده از این آزمایش ها در غلظت های مختلف آلاینده و در زمان های مختلف، مقدار جذب بر روی جاذب اصلاح شده تعیین گردید.

زمان تعادل برای گل اصلاح شده با هیدروکلریک اسید

آزمایشات مربوط به زمان تعادل انجام شد که نتایج آن به شرح زیر است، بعد از بررسی نمودار ۴-۱ زمان تعادل ۳۰ دقیقه بدست آمد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش غلظت درصد حذف کروم کاهش پیدا کرده است که نشان دهنده اشباع شدن جاذب می باشد.

جدول ۱- داده های مربوط به زمان تعادل گل قرمز اصلاح شده با هیدروکلریک اسید

Time (min)	% removal		
	C ₀ = 10 ppm	C ₀ = 15 ppm	C ₀ = 20 ppm
1	50.96	21.6	18.1
5	-	30.17	-
10	64.75	33.4	30
15	-	35.8	28.5
20	65.92	34.06	29.5
30	65.47	35.07	30.1
40	68.03	36	32



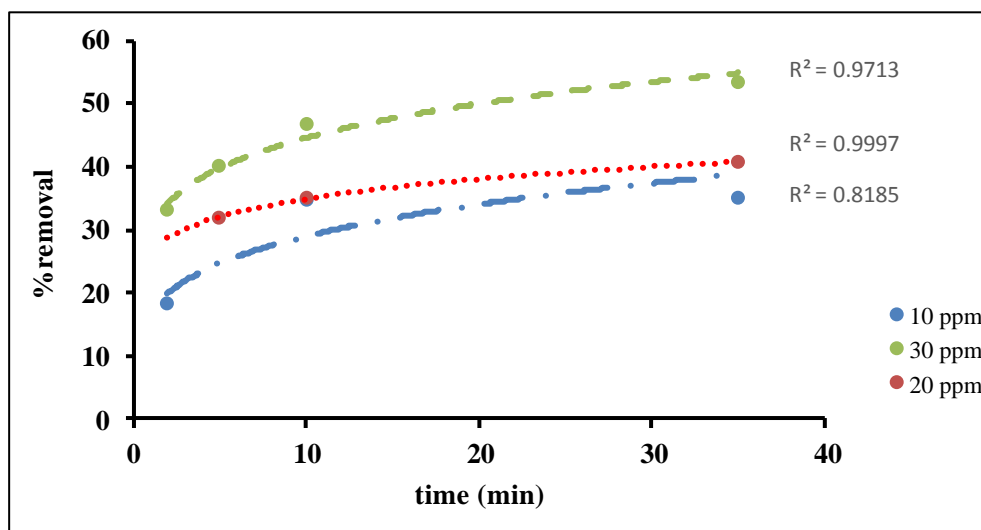
نمودار ۱- زمان تعادل جذب برای گل قرمز اصلاح شده با هیدروکلریک اسید

زمان تعادل برای گل اصلاح شده با نیتریک اسید

نتایج زمان تعادل مربوط به جذب برای جاذب اصلاح شده با نیتریک به شرح زیر است، زمان تعادل برای این جاذب بعد از ۳۰ دقیقه بدست آمد، مشاهده می شود درصد حذف با افزایش غلظت اولیه یون کروم افزایش پیدا کرده است.

جدول ۲- داده های مربوط به زمان تعادل برای گل قرمز اصلاح شده با نیتریک اسید

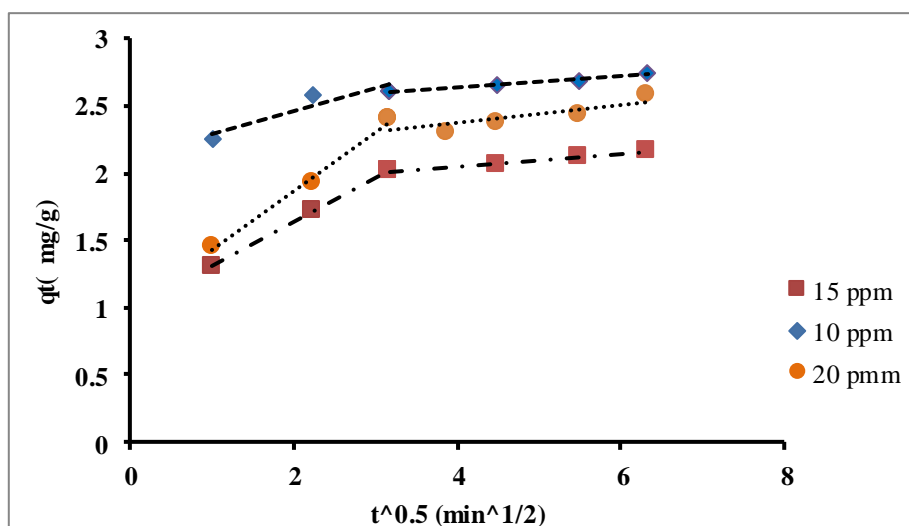
Time (min)	% removal		
	C ₀ = 10 ppm	C ₀ = 20 ppm	C ₀ = 30 ppm
2	18.4	-	33.33
5	-	32	40
10	34.7	35	46.67
35	35	40.7	53.33



نمودار ۲- زمان تعادل برای واکنش جذب مربوط به گل قرمز اصلاح شده با نیتریک اسید

بررسی مدل نفوذ درون ذره برای گل قرمز اصلاح شده با هیدروکلریک اسید جهت بررسی مدل، نمودار q_t بر حسب $t^{0.5}$ برای سه غلظت تعادلی رسم شد که داده های آن به شرح زیر است. جدول ۳- داده های مربوط به مکانیزم درون ذره ای برای گل قرمز اصلاح شده با هیدروکلریک اسید

Time(min)	$t^{0.5}(\text{min}^{0.5})$	q_t (mg/gr)		
		$C_0=10$ ppm	$C_0=15$ ppm	$C_0=20$ ppm
1	1	2.25	1.3	1.45
5	2.23	2.58	1.72	1.93
10	3.16	2.61	2.02	2.41
15	3.87	-	-	2.30
20	4.47	2.66	2.06	2.38
30	5.47	2.68	2.12	2.43
40	6.32	2.75	2.17	2.58



۳-۴ نمودار مکانیزم درون ذره ای برای گل قرمز اصلاح شده با هیدروکلریک اسید

جدول ۴- نتایج مکانیزم نفوذ درون ذره ای برای گل قرمز اصلاح شده با هیدروکلریک اسید تا دقیقه ۱۰

C_t (ppm)	R^2	معادله طبق رابطه ۱-۷	شیب خط ($\text{mg.gr}^{-1}.\text{min}^{-1/2}$)	عرض از مبدا (mm)
10	0.87	$y_1=0.1719x+2.1133$	0.1719	2.1133
15	0.99	$y_1=0.4410x+0.9895$	0.3334	0.9690
20	0.99	$y_1=0.3334x+0.9690$	0.4410	0.9895

جدول ۵- نتایج مکانیزم نفوذ درون ذره ای برای گل قرمز اصلاح شده با هیدروکلریک اسید بعد از دقیقه ۱۰

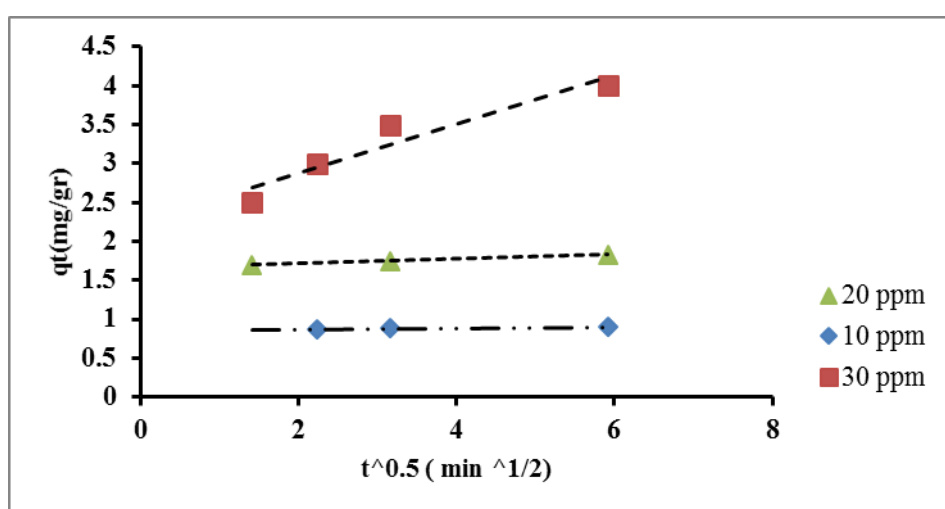
C_t (ppm)	R^2	معادله طبق رابطه ۱-۷	شیب خط ($\text{mg.gr}^{-1}.\text{min}^{-1/2}$)	عرض از مبدا (mm)
10	0.93	$y_2 = 0.0412x+2.4747$	0.0412	2.4747
15	0.97	$y_2 = 0.0479x+1.8598$	0.0479	1.8598
20	0.97	$y_2 = 0.06180x+2.1320$	0.0618	2.1320

همانطور که مشاهده می شود با گذشت زمان ثابت نفوذ افزایش پیدا کرده است اما شیب خط در ۱۰ دقیقه اول بیشتر است که نشان دهنده غالب بودن نفوذ درون ذره ای در ۱۰ دقیقه اول جذب است. در تمامی غلظت ها با گذشت زمان ضخامت لایه مرزی افزایش پیدا کرده است.

بررسی مدل نفوذ درون ذره برای گل قرمز اصلاح شده با نیتریک اسید

جدو ۶- داده های مربوط به مکانیزم درون ذره ای برای گل قرمز اصلاح شده با نیتریک اسید

Time(min)	$t^{0.5}(\text{min}^{0.5})$	$q_t (\text{mg/gr})$		
		$C_0= 10 \text{ ppm}$	$C_0=20 \text{ ppm}$	$C_0=30 \text{ ppm}$
2	1.41	-	1.7	2.5
5	2.23	0.87	-	3
10	3.16	0.88	1.75	3.5
35	5.91	0.90	1.83	4



نمودار ۴- نمودار مکانیزم درون ذره ای برای گل قرمز اصلاح شده با نیتریک اسید

جدول ۷- نتایج مکانیزم نفوذ درون ذره ای برای گل قرمز اصلاح شده با نیتریک اسید

C_t (ppm)	R^2	معادله طبق رابطه ۱-۷	شیب خط ($\text{Mg.gr}^{-1}.\text{min}^{-1/2}$)	عرض از مبدا (mm)
10	0.99	$y = 0.0079x + 0.8534$	0.0079	0.8534
20	1	$y = 0.0289x + 1.6589$	0.0289	1.6589
30	0.91	$y = 0.3139x + 2.2512$	0.0618	2.2512

همانطور که مشاهده می شود با توجه به رگرسیون خط و عرض از مبدا مثبت می توان گفت در گل قرمز اصلاح شده با نیتریک اسید، مدل نفوذ درون ذره ای پدیده غالب در کنترل جذب می باشد و با افزایش غلظت، افزایش ثابت نفوذ جذب و افزایش ضخامت لایه مرزی مشهود است.

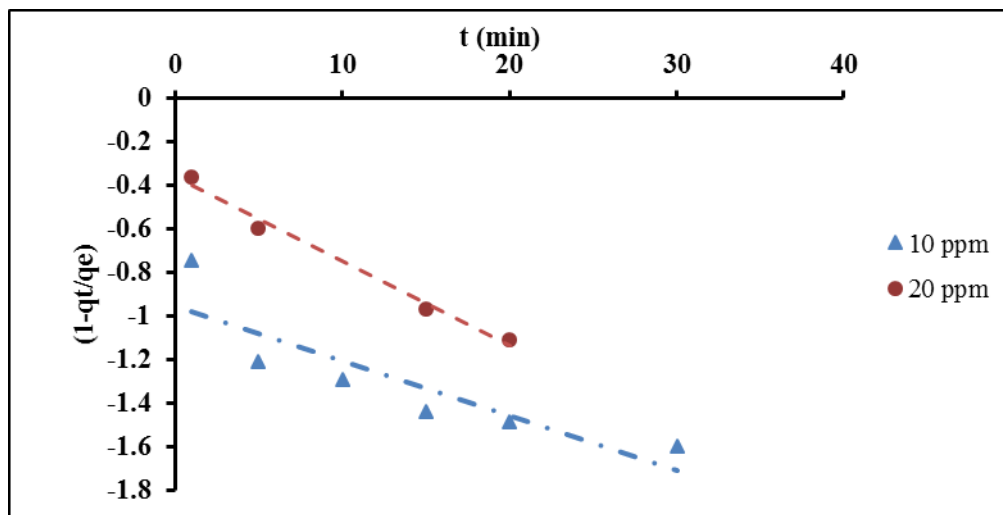
بررسی مدل تئوری فیلمی برای گل قرمز اصلاح شده با هیدروکلریک اسید

جهت بررسی تئوری فیلمی نمودار $\log(1-qt/q_e)$ بر حسب t رسم شد و ضریب نفوذ با استفاده از شیب خط و عرض از مبدا معادله محاسبه شد که نتایج آن به شرح زیر است، با توجه به اینکه تغییرات ضریب نفوذ در محدوده 10^{-6} to $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ بیانگر کنترل شدن واکنش توسط تئوری فیلمی است، همانطور که مشاهده می شود در مورد این پژوهش نمی توان گفت که تئوری فیلمی کنترل کننده فرآیند جذب است.

جدول ۸- نتایج مربوط به تئوری فیلمی برای گل قرمز اصلاح شده با هیدروکلریک اسید

$C_t(\text{mg/L})$	معادله بر حسب ۱-۹	$D_i(\text{cm}^2/\text{s})$	R^2
10	$y = -0.0252x - 0.953$	9.7×10^{-3}	0.77
20	$y = -0.0388x - 0.361$	2.7×10^{-2}	0.99

۵۷



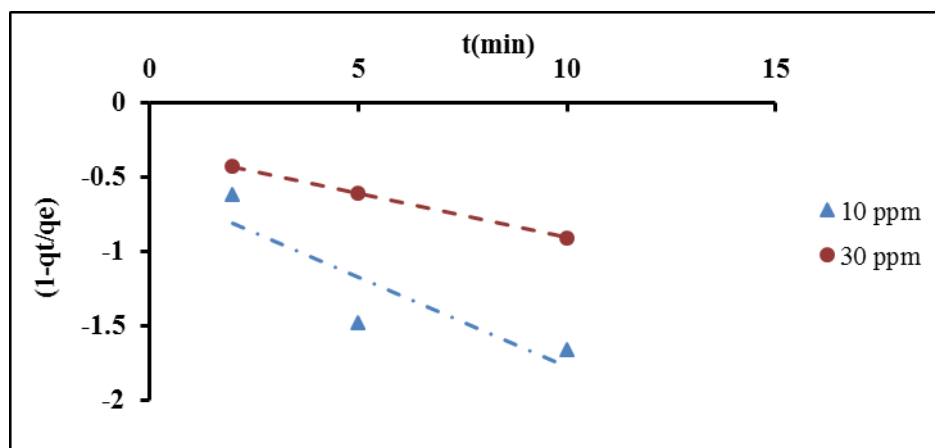
نمودار ۵- نمودار تئوری فیلمی برای گل قرمز اصلاح شده با هیدروکلریک اسید

بررسی مدل تئوری فیلمی برای گل قرمز اصلاح شده با نیتریک اسید

جهت بررسی تئوری فیلمی نمودار $\log(1-qt/qe)$ بر حسب t رسم شد و ضریب نفوذ با استفاده از شیب خط و عرض از مبدا معادله محاسبه شد که نتایج آن به شرح زیر است، با توجه به اینکه تغییرات ضریب نفوذ در محدوده $Di = 10^{-6}$ to 10^{-8} cm^2/s بیانگر کنترل شدن واکنش توسط تئوری فیلمی است، همانطور که مشاهده می شود در مورد این پژوهش نمی توان گفت که تئوری فیلمی کنترل کننده فرآیند جذب است.

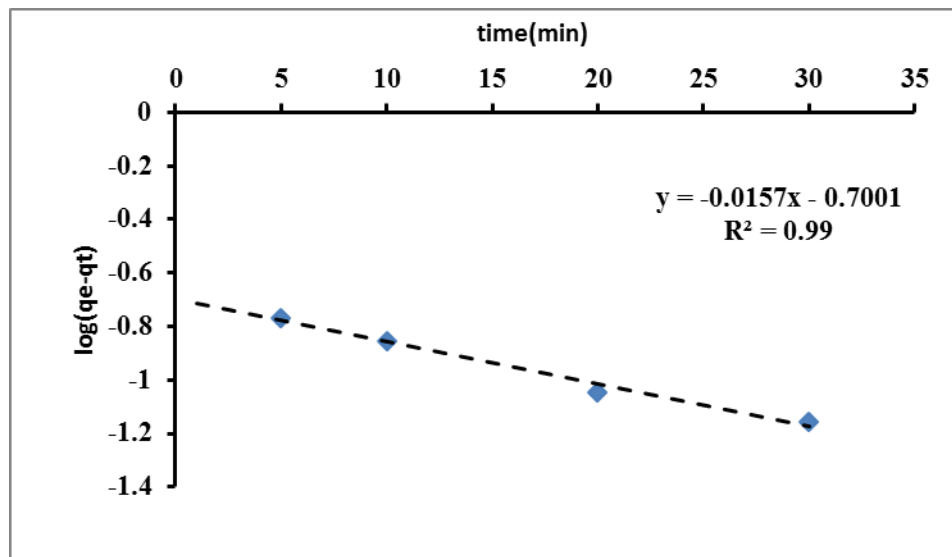
جدول ۹- نتایج مربوط به تئوری فیلمی برای گل قرمز اصلاح شده با نیتریک اسید

$C_t(\text{mg/L})$	معادله بر حسب ۱-۹	$D_i(\text{cm}^2/\text{s})$	R^2
10	$y = -0.0597x - 0.3054$	4.39×10^{-2}	1
30	$y = -0.1205x - 0.5646$	6.85×10^{-2}	0.76



نمودار ۶- نمودار تئوری فیلمی مربوط به گل قرمز اصلاح شده با نیتریک اسید

بررسی مدل سینتیکی شبه درجه اول برای جاذب اصلاح شده با هیدروکلریک اسید با توجه به روابط مربوط به سینتیک واکنش (۵) و (۶) و روش انجام واکنش که در فصل سوم بیان شد، ثابت های مربوط به سینتیک واکنش محاسبه شد که در ادامه به آن پرداخته می شود. پس از محاسبه شیب خط و عرض از مبدا ثابت جذب و ظرفیت کلی جذب بدست آمد.



نمودار ۷- نمودار سینتیک شبه درجه اول

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{K_{ad}}{2.303} t$$

$$-\frac{K_{ad}}{2.303} = -0.0157 \rightarrow K_{ad} = 0.036 \text{ (1/min)}$$

$$\log q_e = -0.7001 \rightarrow q_e \text{ (تئوری)} = 0.20 \text{ mg/g}$$

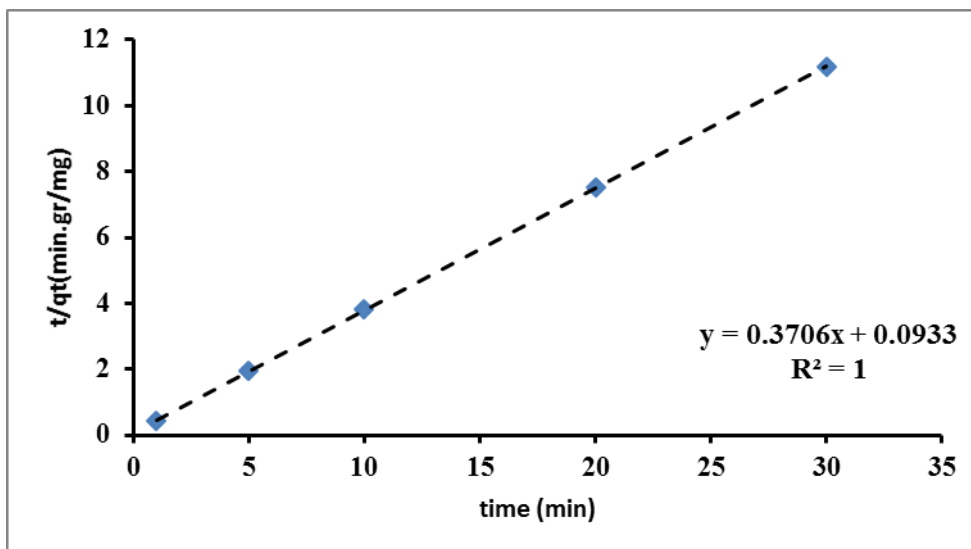
$$R^2 = 0.99$$

برای محاسبه ظرفیت جذب تجربی ۲۵۰ میلی لیتر از نمونه با غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر و با دوز جاذب ۰/۶۱ گرم بر ۲۵۰ میلی لیتر، مورد آزمایش قرار گرفت و غلظت آن در حالت تعادل توسط دستگاه جذب اتمی مشخص شد. محاسبه مقدار تجربی ظرفیت جذب به شرح زیر است:

$$q_e \text{ (تجربی)} = \left(\frac{C_0 - C_e}{m} \right) V = \left(\frac{10 - 4.404}{0.61} \right) \times 0.25 = 2.29 \text{ mg/g}$$

در رابطه بالا، C_0 غلظت اولیه فلز در محلول، C_e غلظت نهایی فلز بعد از تعادل، V حجم نمونه بر حسب لیتر و m جرم جاذب بر حسب گرم می باشد. با مقایسه ظرفیت جذب تجربی و تئوری می توان نتیجه گرفت گل قرمز اصلاح شده با هیدروکلریک اسید از مدل سینتیکی شبه درجه اول پیروی نمی کند.

بررسی مدل سینتیکی شبه درجه دوم برای جاذب اصلاح شده با هیدروکلریک اسید جهت بررسی مدل سینتیکی شبه درجه دوم، خط t/q بر حسب t رسم شد و با استفاده از شیب خط و عرض از مبدا ثابت جذب و ظرفیت جاذب محاسبه شد. که نتایج آن به شرح زیر است:



نمودار ۸- نمودار سینتیک شبه درجه دوم

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_{sp} q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$$

$$\frac{1}{q_e} = 0.3706 \rightarrow q_e = 2.7 \text{ (mg/g)}$$

$$\frac{1}{K_{sp} q_e^2} = 0.0933 \rightarrow K_{sp} = 1.47 \text{ (g/mg.min)}$$

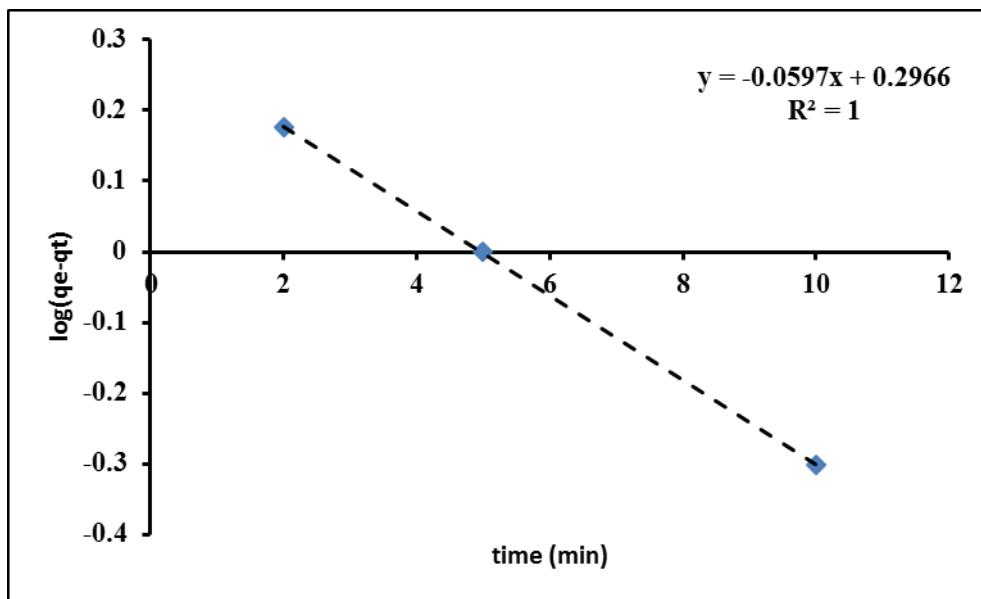
$$R^2 = 1$$

$$q_e (\text{تجربی}) = \left(\frac{C_0 - C_e}{m} \right) V = \left(\frac{10 - 4.404}{0.61} \right) \times 0.25 = 2.29 \text{ mg/g}$$

با مقایسه مقادیر تجربی و تئوری ظرفیت جذب می توان نتیجه گرفت که گل قرمز اصلاح شده با هیدروکلریک اسید از سینتیک شبه درجه دوم پیروی می کند.

۹-۱-۴ بررسی مدل سینتیکی شبه درجه اول برای جاذب اصلاح شده با نیتریک اسید

با توجه به روابط مربوط به سینتیک واکنش (۵-۱ و ۶-۱) و روش انجام واکنش که در فصل سوم بیان شد، ثابت های مربوط به سینتیک واکنش محاسبه شد که در ادامه به آن پرداخته می شود. پس از محاسبه شیب خط و عرض از مبدا ثابت جذب و ظرفیت کلی جذب بدست آمد.



نمودار ۹- نمودار سینتیک شبه درجه اول

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{K_{ad}}{2.303} t$$

$$-\frac{K_{ad}}{2.303} = -0.0597 \rightarrow K_{ad} = 0.14 \text{ (1/min)}$$

$$\log q_e = 0.2966 \rightarrow q_e \text{ (تئوری)} = 1.98 \text{ mg/g}$$

$$R^2 = 1$$

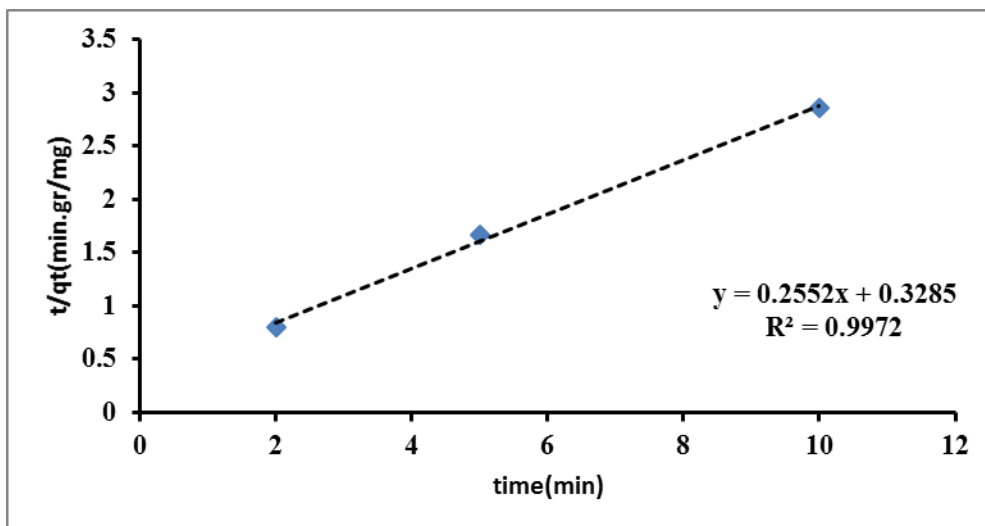
برای محاسبه ظرفیت جذب تجربی ۱۰۰ میلی لیتر از نمونه با غلظت ۳۰ میلی گرم بر لیتر و با دوز جاذب ۱ گرم بر ۲۵۰ میلی لیتر، مورد آزمایش قرار گرفت و غلظت آن در حالت تعادل توسط دستگاه جذب اتمی مشخص شد. محاسبه مقدار تجربی ظرفیت جذب به شرح زیر است:

$$q_e \text{ (تجربی)} = \left(\frac{C_0 - C_e}{m} \right) V = \left(\frac{30 - 14}{1} \right) \times 0.1 = 1.60 \text{ mg/g}$$

در رابطه بالا، C_0 غلظت اولیه فلز در محلول، C_e غلظت نهایی فلز بعد از تعادل، V حجم نمونه بر حسب لیتر و m جرم جاذب بر حسب گرم می باشد. با مقایسه ظرفیت جذب تجربی و تئوری می توان نتیجه گرفت گل قرمز اصلاح شده با نیتریک اسید از مدل سینتیکی شبه درجه اول پیروی می کند.

۴-۱۰ بررسی مدل سینتیکی شبه درجه دوم برای جاذب اصلاح شده با نیتریک اسید

جهت بررسی مدل سینتیکی شبه درجه دوم، خط t/q بر حسب t رسم شد و با استفاده از شیب خط و عرض از مبدا ثابت جذب و ظرفیت جاذب محاسبه شد. که نتایج آن به شرح زیر است:



نمودار ۱۰- نمودار سینتیک شبه درجه دوم

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_{sp} q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$$

$$\frac{1}{q_e} = 0.2552 \rightarrow q_e = 3.91 \text{ (mg/g)}$$

$$\frac{1}{K_{sp} q_e^2} = 0.3285 \rightarrow K_{sp} = 0.20 \text{ (g/mg.min)}$$

$$R^2 = 0.99$$

$$q_e (\text{تجربی}) = \left(\frac{C_0 - C_e}{m} \right) v = \left(\frac{30 - 14}{1} \right) \times 0.1 = 1.60 \text{ mg/g}$$

در رابطه بالا، C_0 غلظت اولیه فلز در محلول، C_e غلظت نهایی فلز بعد از تعادل، V حجم نمونه بر حسب لیتر و m جرم جاذب بر حسب گرم می باشد. با بررسی ظرفیت جذب تئوری و تجربی مشخص شد گل اصلاح شده با نیتریک اسید از مدل سینتیک شبه درجه اول پیروی می کند.

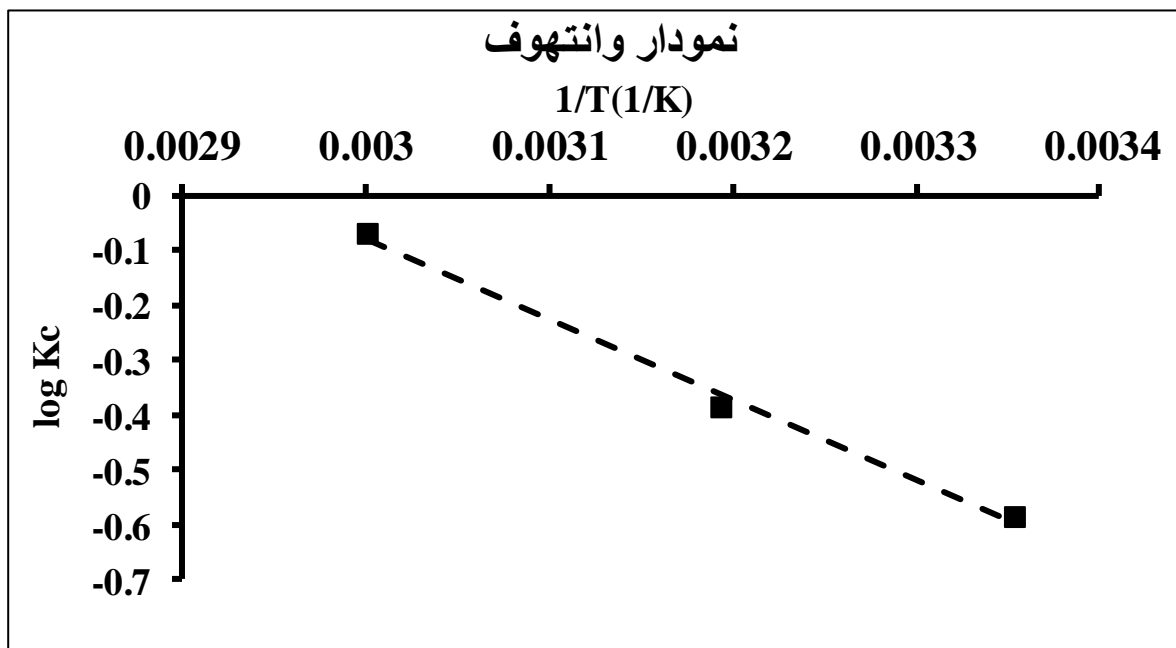
۴-۲ پارامتر ترمودینامیکی

با استفاده از معادلات ۱-۱۱ تا ۱-۱۴ پارامترهای ترمودینامیکی محاسبه شد که نتایج آن به شرح زیر است:

جدول ۱۰- داده های مربوط به آزمایش پارامترهای ترمودینامیکی

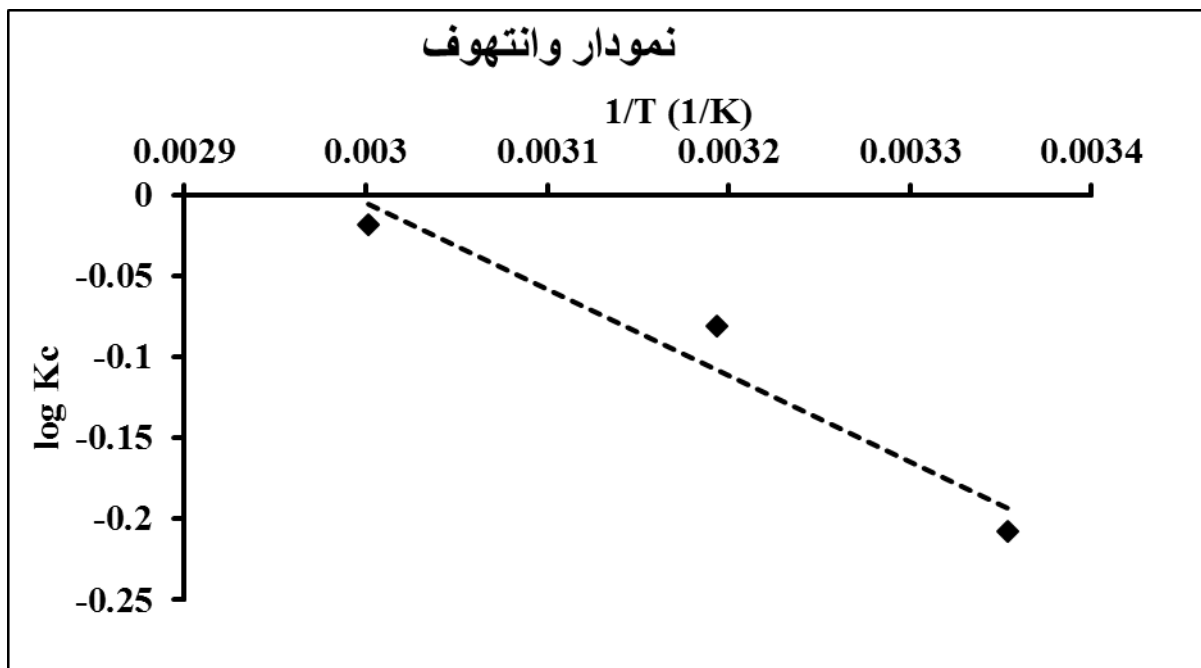
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	D.A(g/100mL)	pH	T(°C)	K_c (بی بعد)
20	12.34	1	4.5	25	0.63
20	10.92	1	4.5	40	0.83
20	8.67	1	4.5	60	1.31

نمودار ۱۱- نمودار وانتهوف برای هیدرو کلریک اسید



جدول ۱۱- نتایج مربوط به پارامترهای ترمودینامیکی گل قرمز اصلاح شده با نیتریک اسید

$T(^{\circ}C)$	K_c (ثابت تعادل بدون بعد)	$\Delta G(kJ/mol)$	$\Delta S(kJ/mol.K)$	$\Delta H(kJ/mol)$
25	0.62	11.85	0.31	101.90
40	0.83	4.85	0.31	
60	1.31	1.13	0.31	



نمودار ۱۲- نمودار وانتهف برای نیتریک اسید

با توجه به نتایج حاصله از پارامترهای ترمودینامیکی مثبت بودن مقدار آنتالپی به معنای گرماگیر بودن واکنش و انرژی گیبس منفی به معنی خودبه خود بودن واکنش جذب می باشد. مقادیر آنتروپی مثبت و به معنای افزایش بی نظمی در حین واکنش است و در طی واکنش ثابت باقی می ماند.

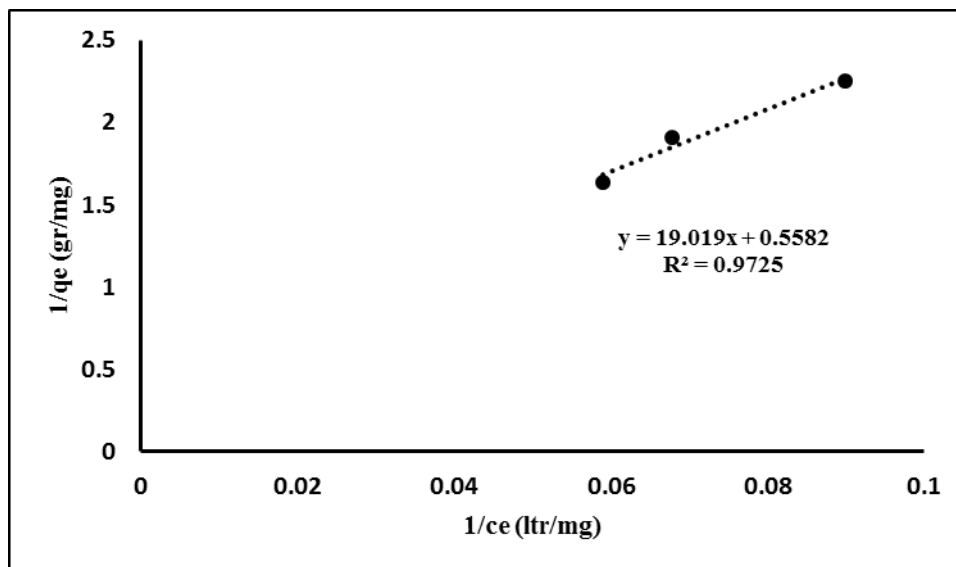
بررسی ایزوترم واکنش

ایزوترم لانگمویر برای گل قرمز اصلاح شده با هیدروکلریک اسید

جهت بررسی ایزوترم لانگمویر نمودار $1/q_e$ بر حسب $1/C_e$ رسم شد و با استفاده از شیب خط و عرض از مبدا پارامترهای ایزوترم لانگمویر محاسبه شد که نتایج آن به شرح زیر است:

جدول ۱۲- داده های مربوط به ایزوترم های واکنش

C_0 (mg/gr)	C_e (mg/g)	q_e (mg/g)	A.D(g/L)	pH	$T(^{\circ}C)$
20	16.95	0.61	0.5	4.5	25
20	14.75	0.525	1	4.5	25
20	11.12	0.444	2	4.5	25



نمودار ۱۳- ایزوترم لانگمویر مربوط به گل قرمز اصلاح شده با هیدروکلریک اسید

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{a} + \frac{1}{abC_e}$$

$$\frac{1}{q_e} = 0.5582 + 19.019 \frac{1}{C_e}$$

$$\frac{1}{a} = 0.5582 \rightarrow a = 1.79 \left(\frac{\text{mg}}{\text{g}} \right)$$

$$\frac{1}{ab} = 19.019 \rightarrow b = 0.029 \left(\frac{\text{L}}{\text{mg}} \right)$$

ویژگی های اساسی لانگمویر توسط عامل جداسازی بدون بعد، R_L توصیف می شود.

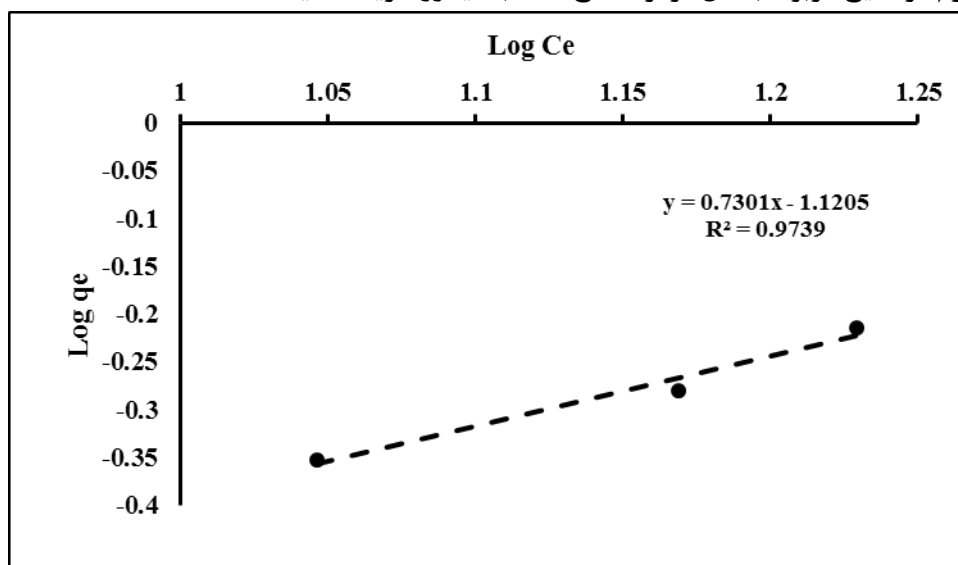
$$R_L = \frac{1}{1 + bC_0} \rightarrow R_L = 0.63$$

مقدار R_L محاسبه شده، نشان دهنده جذب سطحی مطلوب در مدل لانگمویر می باشد

جدول ۱۲- ثابت های ایزوترم لانگمویر

a(mg/g)	b(L/mg)	R^2	R_L
45.25	0.91	0.99	0.52

بررسی ایزوترم فرندلیچ مربوط به گل قرمز اصلاح شده با هیدروکلریک اسید



نمودار ۱۴- ایزوترم فرندلیچ مربوط به گل قرمز اصلاح شده با هیدروکلریک اسید

$$\log(q_e) = \log(K_f) + 1/n \log(C_e)$$

$$(\text{mg.g}^{-1}). (\text{L.mg}^{-1})^{1/n} \log(K_f) = -1.1205 \rightarrow K_f = 0.076$$

$$\frac{1}{n} = 0.7301 \rightarrow n = 1.37$$

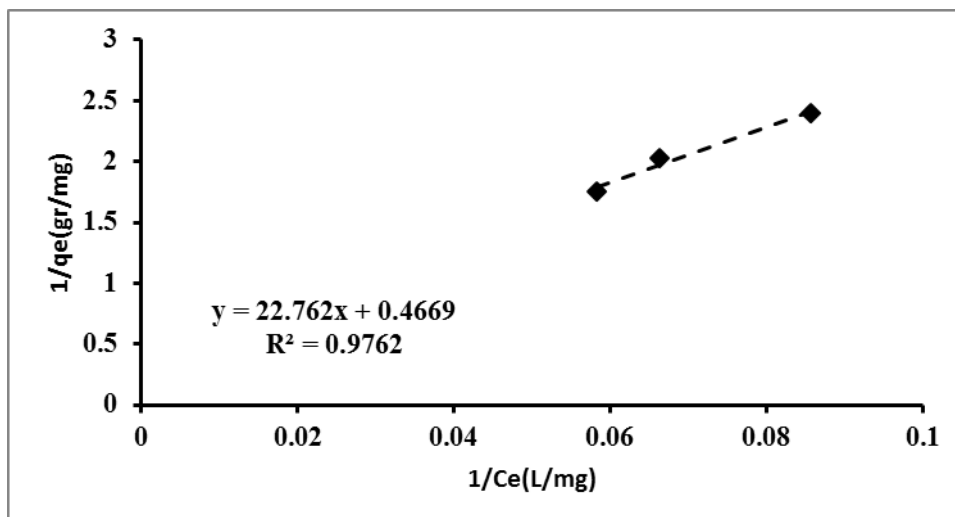
اگر n بزرگتر از یک باشد، جذی سطحی مطلوب، اگر صفر شود، جذب سطحی خطی و اگر کوچکتر از یک شود، جذب سطحی نامطلوب خواهد بود.

ایزوترم لانگمویر برای گل قرمز اصلاح شده با نیتریک اسید

جهت بررسی ایزوترم لانگمویر نمودار $1/q_e$ بر حسب $1/C_e$ رسم شد و با استفاده از شیب خط و عرض از مبدا پارامترهای ایزوترم لانگمویر محاسبه شد که نتایج آن به شرح زیر است:

جدول ۱۳- داده های مربوط به ایزوترم های واکنش

$C_0(\text{mg/gr})$	$C_e(\text{mg/g})$	$q_e(\text{mg/g})$	A.D(g/L)	pH	$T(^{\circ}\text{C})$
20	17.15	0.57	0.5	4.5	25
20	15.08	0.492	1	4.5	25
20	11.67	0.42	2	4.5	25



نمودار ۱۵- نمودار ایزوترم لانگمویر مزبوط به گل قرمز اصلاح شده با نیتریک اسید

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{a} + \frac{1}{abC_e}$$

$$\frac{1}{q_e} = 0.4669 + 22.762 \frac{1}{C_e}$$

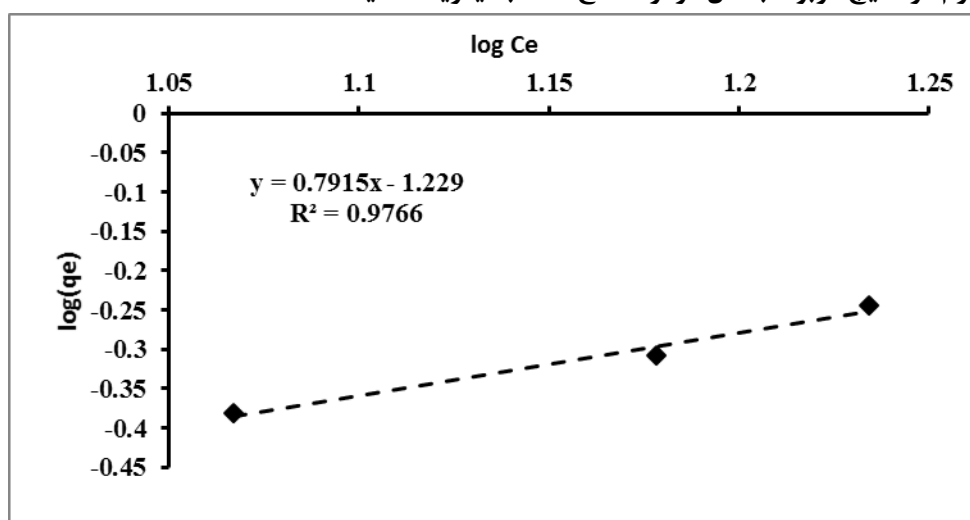
$$\frac{1}{a} = 0.4669 \rightarrow a = 2.14 \left(\frac{\text{mg}}{\text{g}}\right)$$

$$\frac{1}{ab} = 22.762 \rightarrow b = 0.021 \left(\frac{\text{L}}{\text{mg}}\right)$$

ویژگی های اساسی لانگمویر توسط عامل جداسازی بدون بعد، R_L توصیف می شود.

$$R_L = \frac{1}{1+bc_0} \rightarrow R_L = 0.70$$

مقدار R_L محاسبه شده، نشان دهنده جذب سطحی مطلوب در مدل لانگمویر می باشد
بررسی ایزوترم فرندلیچ مربوط به گل قرمز اصلاح شده با نیتریک اسید



نمودار ۱۶- نمودار ایزوترم فرندلیچ

$$\log(q_e) = \log(K_f) + 1/n \log(C_e)$$

$$(\text{mg.g}^{-1}). (\text{L.mg}^{-1})^{1/n} \log(K_f) = -1.229 \rightarrow K_f = 0.059$$

$$\frac{1}{n} = 0.7915 \rightarrow n = 1.26$$

اگر n بزرگتر از یک باشد، جذی سطحی مطلوب، اگر صفر شود، جذب سطحی خطی و اگر کوچکتر از یک شود، جذب سطحی نا مطلوب خواهد بود.

نتیجه گیری

فلزات سنگین باعث آلودگی آب و خاک و محیط زیست می شوند که پس از آلوده شدن آب و خاک، چرخه زیست نیز می تواند آلوده شود و باعث بیماری در انسان و حیوان و گیاهان شود. فرآیند های مختلفی برای تصفیه وجود دارد که عبارتند از لخته سازی، شناور سازی، کف، فیلتراسیون، تعویض یونی، تصفیه هوازی و بی هوازی، استخراج حلال، جذب سطحی، الکترولیز، کاهش میکروبی و رسوب فعال شده هستند.

این تکنولوژی ها مقدار قابل توجهی نامطلوبی که شامل حذف نا مناسب آلودگی ها، قیمت بالا و یا الزامات انرژی و تولید رسوب سمی یا دیگر محصولات زائد هستند را نشان دادند. در میان چندین تکنولوژی تصفیه آب و فاضلاب، جذب سطحی به عنوان فرآیندی ساده مورد توجه است. اگر ضایعات جامد را بتوان به عنوان جاذب های ارزان قیمت مورد استفاده قرار داد. آن ها دو مزیت برای کنترل آلودگی محیطی دارند اولاً مقدار مواد زائد می تواند نسبتاً کم بشود و ثانیاً جاذب های ارزان قیمت توسعه می یابد و می تواند به اندازه قیمت تصفیه آلودگی فاضلاب را کاهش دهد.

گل قرمز که پسماند فرآیند بایر بر روی سنگ معدن بوکسیت است، برای محیط زیست مضر بوده زیرا Ph آن قلیایی (-۱۲) است. و روش دفع آن یکی از معضلات زیست محیطی دنیا محسوب می شود. از گل قرمز می توان به عنوان جاذب برای حذف فلزات سنگین، رنگ ها، مواد آروماتیک و آلی در تولید و ساخت مواد سرامیکی و همچنین منبع ثانویه بازیافت فلزات، استفاده نمود.

در این تحقیق، برای انجام حذف فلز سنگین کروم از نمونه آبی از گل قرمز به عنوان جاذب استفاده شد. در این تحقیق سه نمونه گل سرخ، شامل گل قرمز خام و گل قرمز اصلاح شده با اسید هیدرو کلریک و گل قرمز اصلاح شده با اسید نیتریک مورد بررسی قرار گرفتند.

جهت بررسی ویژگی های جاذب آنالیز های SEM, XRD, BET, FTIR بر روی گل قرمز خام و اصلاح شده با نیتریک اسید و هیدروکلریک انجام شد که نتایج آن به شرح زیر است:

در آنالیز FTIR، مشاهده شد پیک های نمودار بعد از جذب به مقادیر ناچیز جابجا شده است که نشان دهنده جذب شیمیایی کمی در جاذب است

در آنالیز SEM، اینگونه بدست آمد که پس از شست و شو توسط اسید ساختار متخلخل گل گسترش یافته و صافتر شد که این به خاطر حل شدن نمک های موجود در گل در اسید و تبدیل اکسید آهن، کلسیم، سدیم و آلومینیوم به حالت کلرید یا نیتریک آن بود. ساختار کریستالی گل نشان می دهد که این جاذب می تواند جاذب موثری در حذف فلز سنگین باشد. همچنین آنالیز XRD برای گل قرمز خام وجود، Katoite، cancrinite، Fe₂O₃، Al₂O₃، SiO₂ و CaO را تایید کرد

به منظور تعیین مکانیسم جذب داده های سینتیکی با مدل نفوذ درون ذره ای مطابقت داده شدند همانطور که مشاهده شد با توجه به رگرسیون خط و عرض از مبدا مثبت می توان گفت در گل قرمز اصلاح شده با نیتریک اسید و هیدرو کلریک اسید، مدل نفوذ درون ذره ای پدیده غالب در کنترل جذب می باشد و با افزایش غلظت، افزایش ثابت نفوذ جذب و افزایش ضخامت لایه مرزی مشهود است.

همچنین داده های آزمایشگاهی با ایزوترم های لانگمویر و فروندلیچ تطبیق داده شد و نتایج نشان داد که جذب تعادلی برای هر دو نوع گل اصلاح شده با اسید نیتریک و هیدروکلریک اسید منطبق بر ایزوترم های لانگمویر و فروندلیچ بود و مطلوب بدست آمد و بررسی ها نشان داد هیچ کدام از دو نمونه گل اصلاح شده از تئوری فیلمی پیروی نکرد در آزمایش های تعادل

نیز مشاهده شد برای گل اصلاح شده با هیدروکلریک اسید مشاهده شد با افزایش غلظت در صد حذف کروم کاهش یافت که نشان دهنده اشباع شدن جاذب است و برای گل اصلاح شده با نیتریک اسید مشاهده شد در صد حذف با افزایش غلظت اولیه، افزایش پیدا کرد زمان تعادل نیز برای هر دو نمونه گل اصلاح شده ۳۰ دقیقه به دست آمد در بررسی مدل سینتیکی نیز نشان داده شد گل قرمز اصلاح شده با هیدروکلریک اسید از سینتیک درجه دوم پیروی کرد و برای گل قرمز اصلاح شده با نیتریک اسید مشاهده شد از مدل سینتیکی درجه اول پیروی می کند بررسی نتایج حاصل از پارامترهای ترمودینامیکی، مثبت بودن مقدار آنتالپی به معنای گرماگیر بودن و انرژی گیبس منفی به معنای خود به خودی بودن واکنش جذب را نشان داد همچنین مقدار آنتروپی مثبت بدست آمد که به معنای افزایش بی نظمی در حین واکنش است
منابع و مراجع:

- 1-Nemerow N.L.,Agardy F.J.,Sullivan P.,Salvalo J.A.,Environmental Engineering . Water ,Wastewater,Soil and Groundwater Treatment and Remediation,6th F.d.(Agardy F.J.& Sullivan P .),John Wiley & Sons,Lnc.,New York,2009
- 2-Weiner F.R.,Application of Environmental Chemistry .A Practical Guide for Environmental Professionals ,Lewis Publishers.Lnc .,Boca Raton _London _USA,2000.
- 3-Roque –Malherbe R.M.A.,Adsorption and Diffusion in Nanoporous Materials ,CRC Press /Taylor & Francis Group .Boca Raton ,2007
- 5-Thornion I .,Metals in Global Environment-Facts and Misconceptions ,ICME Ottawa ,1995
- 6-Alloway B.J.,Heavy Metals in Soils,2th Ed,Blackie Academic & professional,Inc.,New York,1995.
- 7-Nordberg G. F.,Flower B.,Nordberg M.,Friberg I.,Handbook on the Toxicology of Metals,3th Ed.,Academic Press,New York,2007.
- 11-Vincent J.B.,Encyclopedia of Inorganic Chemistry,John Wiley & Sons,Lnc,New York,2006
- 12-Hartford W.H.,Chemical .,and Physical Propertics of Wood Preservatives Ln:Wood Deterioration and its Prevention by Preservative Treatment(D.D.Nicholas,ed.),Syracuse University Press,Syracuse New York,1973
- 13-Lyubenova T.S.,Ocaña M,Carda J .,Brown ceramic pigments based on chromium(III) doped titanite obtained by spray pyrolysis,J.Dye and pigments.79(2008)265-269
- 14-Çetin D.,Dönmez S., Dönmez G.,The treatment of textile wastewater including chromium(VI) and reactive dye by sulfate-reducing bacterial enrichment ,J.,Environmental Management.88(2008) 76-82
- 15-Conklin P.J.,Drysdale D.,Doughtie D.G.,Rao K.R.,Kakareka J.P.,Gilbert T.R.,Shokes R.F.,Comparative toxicity of drilling muds:role of chromium and petroleum hydrocarbons ,J.Marine Environmental Research,10(1983)105-125
- 16-Singh V.P.,Toxic Metals and Environmental Issues ,Sarup & Sons ,Inc.,New Delhi,2005
- 17-Nriagu J.O.,Nieboer E.,Chromium in the Natural and Human Environments, John Wiley & Sons,Inc,New York,1988
- 18-Kobya M.,Removal of Cr(VI) From aqueous solutions by adsorption onto hazelnut shell activated carbon :kinetic and equilibrium studies ,J.Bioresour Technol,91(2004)317-321
- 19-Fawcett,Eric (1988).”spin-density-wave antiferromagnetism in chromium”.Reviews of Modern physics.60:209