

## بررسی مدل سازی سینتیکی و هم‌دماهای جذب فلز نیکل توسط جاذب کربن فعال گرانول اصلاح شده

شهاب الدین خدابخش، حسن پهلوانزاده\*

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

**چکیده:** در پژوهش حاضر، کربن فعال اصلاح شده به وسیله SDS به منظور حذف نیکل از محلول آبی مورد استفاده قرار گرفت. در این فرایند، جاذب پس از شستشوی اولیه با آب مقطر، خشک شده و آنگاه با ماده فعال سطحی سدیم دودسیل سولفات اصلاح شده شسته شد و پس از شستشو و خشک کردن پایانی، به منظور حذف فلز نیکل مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش های جذب نیکل به صورت ناپیوسته بررسی شد و تاثیر تغییر pH غلظت جاذب، غلظت اولیه نیکل در محلول و زمان تماس در سامانه تک جزئی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس آزمایش های انجام شده، pH بهینه جذب نیکل به کمک جاذب کربن فعال اصلاح شده با سدیم دودسیل سولفات در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، ۸ است. با افزایش زمان تماس میزان جذب افزایش می یابد و پس از گذشت ۵ ساعت به حالت تعادل می رسد. میزان راندمان حذف در شرایط بهینه و در غلظت اولیه ۵۰ میلی گرم بر لیتر ۹۵/۱۸٪ بود. اطلاعات تعادلی به دست آمده در بازه غلظت اولیه نیکل و دمای مطالعه شده با هم‌دماهای فرن‌دلیچ و ردلیش پترسون تطابق مناسبی دارد. ارزیابی اطلاعات تجربی به منظور بررسی سینتیک جذب سطحی نیکل به کمک جاذب کربن فعال اصلاح شده با سدیم دودسیل سولفات نشان می دهد که جذب سطحی نیکل از معادله شبه درجه دوم تبعیت می کند. مقادیر پارامترهای ترمودینامیکی نشان می دهد که جذب سطحی نیکل در بازه دمایی ۳۱۸-۲۹۸ کلوین امکان پذیر، خود به خودی و گرماگیر است.

**کلمات کلیدی:** کربن فعال، نیکل، ظرفیت جذب، محلول آبی

**KEYWORDS:** Activated carbon, Nickel, Sorption, Aqueous solution

### مقدمه

روی برخی از اعضای بدن مانند کلیه، کبد، مغز و قلب اثرهای بدی دارند [۳]. گسترش صنعت و مصرف هرچه بیش تر فلزها به صورت فراورده، وسیله ها و تجهیزهای تولید، ماده اولیه و حتی منابع طبیعی فلزها مانند معادن، باعث آلوده شدن بیش تر آب می شود. از سوی دیگر، برخی از این فلزها با ارزش هستند و برای کاربردهای گوناگون صنعتی استفاده می شوند بنابراین حذف و بازیابی فلزها از پساب های صنعتی

اصطلاح فلز سنگین به دسته ای از عنصرهای فلزی که وزن اتمی آنها بین ۶۳٫۵ و ۲۰۰٫۶ قرار داشته و وزن مخصوص آنها بالاتر از ۵ باشد اطلاق می شود [۱]. به عنوان عنصرها کمیاب، برخی فلزهای سنگین همانند مس، کبالت، آهن، منگنز، مولیبدن، وانادیم، روی و ... در غلظت های پایین برای حفظ متابولیسم بدن انسان حیاتی می باشند. اگرچه این فلزها در غلظت های بالا سمی می باشند [۲]. این عنصرها

\* عهده دار مکاتب

+E-mail: Pahlavzh@modares.ac.ir

### آماده‌سازی کربن فعال برای جذب نیکل از محلول‌های آبی

نخست مقداری از کربن فعال طی چند مرحله با آب مقطر شست و شو شد و سپس به وسیله‌ی صافی یا قیف بوختر آن را صاف و تصفیه شد. در ادامه کربن فعال صاف شده در طول شب به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس خشک شد. سپس از ۱ گرم از کربن فعال را به ۱۰۰ میلی لیتر محلول ۳۵ میلی مولار سدیم دودسیل سولفات (SDS)، افزوده و به مدت ۴۸ ساعت بر روی استیرر با سرعت ۸۰ دور بر دقیقه قرار گرفت و پس از صاف شدن و خشک شدن دوباره به مدت ۱۲ ساعت برای فرایند جذب آماده شد.

### آنالیزهای ساختاری کربن فعال اصلاح شده

ساختار و ریخت‌شناسی کربن فعال پیش و پس از پوشش با سدیم دودسیل سولفات در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود سورفکتانت پوشش داده شده بر روی سطح کربن فعال به خوبی نمایان می‌باشد. با توجه به تصویرهای به‌دست آمده از آنالیز SEM کاهش سطح ویژه کربن فعال پس از اصلاح با سدیم دودسیل سولفات قابل دیدن می‌باشد. در فرایند اصلاح کربن فعال توسط سورفکتانت‌ها این نکته شایان توجه می‌باشد که جذب سورفکتانت توسط کربن فعال با افزایش غلظت محلول دارای سورفکتانت (در برخی موردها تا ۱۰ برابر غلظت تشکیل میسل) افزایش یافته و سپس پس از غلظت معینی که برای سورفکتانت‌های گوناگون متفاوت می‌باشد ثابت می‌ماند. این پدیده به‌خاطر قطر میسل تشکیل شده توسط سورفکتانت‌های گوناگون در محلول آبی و اندازه روزنه‌های کربن فعال می‌باشد. در حقیقت این پدیده نشان می‌دهد قطر میسل‌های تشکیل شده از اندازه روزنه‌های کربن فعال بیش‌تر بوده و باعث می‌شود میسل تشکیل شده از سورفکتانت در غلظت‌های بالا بر روی روزنه‌های کربن فعال قرار گیرند و سطح ویژه جذب را به شدت کاهش دهند [۲۵].

ساختار کربن فعال پیش و پس از پوشش به وسیله سدیم دودسیل سولفات از طریق FT-IR بررسی شده است. طیف سنج FT-IR اطلاعات مهمی درباره شکل جذب تهیه شده اریه می‌دهد. طیف‌های FT-IR اریه شده در بازه  $4000-400 \text{ cm}^{-1}$  می‌باشد. طیف مربوط به کربن فعال و کربن فعال اصلاح شده در شکل‌های ۳ و ۴ نمایش داده شده است.

از اهمیت بسیاری برخوردار است [۳،۴]. شیوه‌های معمول برای جداسازی فلزهای سنگین از صنایع گوناگون که وارد پساب می‌شوند، شامل استخراج حلال [۵۶]، رسوب گذاری شیمیایی [۷۸]، فرایندهای غشایی فیلتراسیون و اسمز معکوس [۹]، تبادل یون [۱۰]، جذب [۱۱-۱۳]، تصفیه الکتروشیمیایی [۱۳] می‌باشند. از میان روش‌های گفته شده برای حذف فلزهای سنگین از محلول‌های آبی و پساب‌ها، فرایند جذب به خاطر قابلیت احیای جاذب و بازدهی بالا برتری دارد [۴]. جاذب‌های زیادی برای جذب یون‌های فلزی از محلول‌های آبی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. از جمله این جاذب‌ها می‌توان به کربن فعال اشاره نمود [۱۵]. جداسازی فلزهای سنگین با استفاده از کربن فعال بر مبنای ایجاد کمپلکس به دلیل وجود گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار روی سطح جاذب می‌باشد. البته مکانیسم‌های دیگری نیز از جمله وجود ساختار متخلخل و نیروی جاذبه‌ی الکترواستاتیکی آن نیز در این فرایند مؤثر است. این شرایط سبب شده است که کربن فعال با توجه به ساختار شیمیایی خود که در زمان تشکیل به دست آورده و بر اساس مقدارهای گوناگون فلزهای قابل تعویض در ساختار شیمیایی خود ظرفیت متفاوتی برای جذب آن‌ها نشان دهد [۱۵]. هرچند در کربن فعال‌های تجاری، گره‌های عاملی سطح کمی از جاذب را در بر می‌گیرند ولی با افزایش این گروه‌ها می‌توان توانایی جذب فلزها را توسط کربن فعال افزایش داد [۱۶]. به منظور افزایش ظرفیت جذب کاتیون‌ها روش‌های متفاوتی به منظور اصلاح جاذب از جمله فرایندهای شیمیایی و فیزیکی ارایه شده است [۲۴-۱۷]. در میان روش‌های ذکر شده، اصلاح کربن فعال تجاری با استفاده از سورفکتانت‌ها نتیجه‌های قابل پذیرشی در جذب فلزهای همچون روی، کادمیم و کروم از خود نشان داده است [۲۴-۲۰]. در پژوهش حاضر از سدیم دودسیل سولفات به منظور اصلاح کربن فعال به منظور جذب نیکل استفاده شده است که با توجه به ارزان بودن کربن فعال و همچنین سمی نبودن سورفکتانت مورد استفاده، استفاده از این روش مناسب می‌باشد.

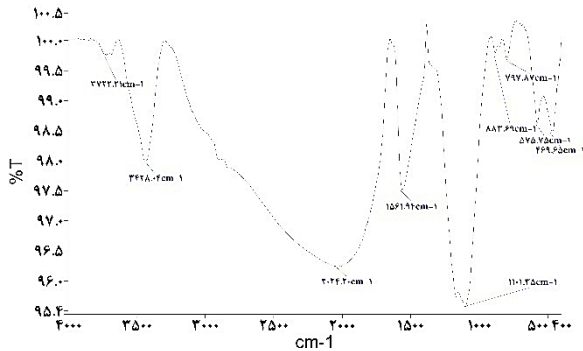
### بخش تجربی

#### مواد مورد نیاز

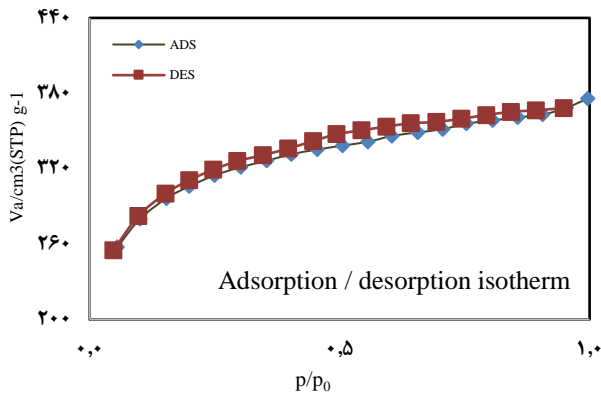
مواد مورد نیاز در این پژوهش شامل کربن فعال تجاری، سدیم دودسیل سولفات (SDS)، سدیم هیدروکسید (NaOH)، هیدروکلریک اسید (HCl) و آب مقطر می‌باشند. همچنین محلول‌های یون‌های فلزی نیکل با حل کردن مقدار مشخصی نیکل نیترات شش آبه، (که از شرکت مرک<sup>۲</sup> خریداری شده اند) در آب مقطر تهیه شده است.

(۱) Surfactants

(۲) Merck



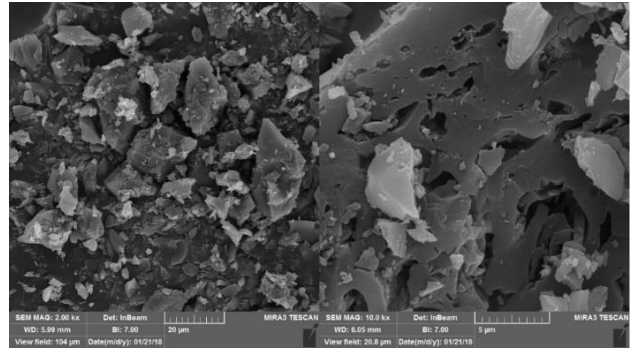
شکل ۴- طیف FT-IR از کربن فعال اصلاح شده



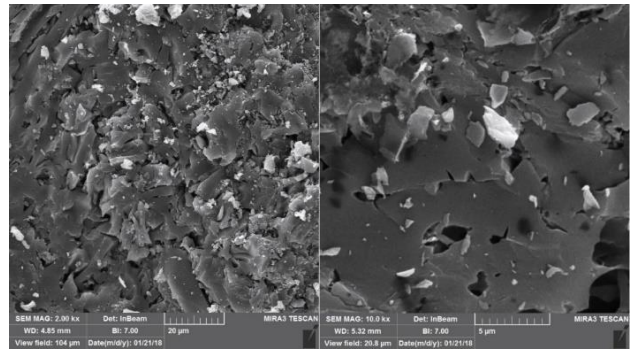
شکل ۵- همدمای جذب و دفع برای جاذب کربن فعال

در شکل ۴ به بررسی ساختار کربن فعال اصلاح شده با سدیم دودسیل سولفات پرداخته شده است. همان گونه که مشخص است پیک های موجود در کربن فعال پیش از اصلاح در این طیف نیز با کمی جایجایی حضور دارند و به دلیل جذب سدیم دودسیل سولفات و پوشش دادن کربن فعال با این ماده از شدت پیک ها کاسته شده است. همچنین پیک  $2024\text{ cm}^{-1}$  نشان دهنده گروه متیل و حضور  $\text{CH}_2$  می باشد [۲۸].

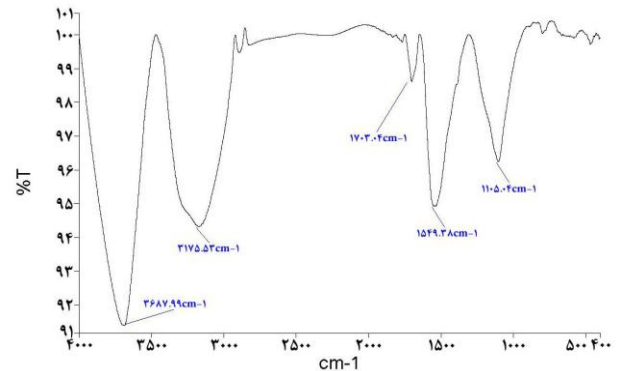
مقایسه همدمای جذب و دفع نیتروژن برای جاذب های کربن فعال و کربن فعال اصلاح شده با سدیم دودسیل سولفات با استفاده از آنالیز BET انجام شده است و نتیجه ها در شکل های ۵ و ۶ آورده شده است. اندازه روزنه ها، حجم روزنه های و سطح مقطع نمونه تهیه شده در جدول ۱ آورده شده است. رفتار همدمای جذب و دفع به دست آمده نشان می دهد آن ها همدمای نوع ۱ می باشند. همدمای نوع اول برای ترکیب هایی مناسب می باشند که دارای روزنه های بسیار ریز همانند کربن فعال و زئولیت می باشند. افزون بر این وجود هیستریسیس<sup>۱</sup> در شکل های ۵ و ۶ قابل دیدن است که نشان دهنده حضور مزوحفره<sup>۲</sup> در ماده می باشد.



شکل ۱- آنالیز SEM برای کربن فعال



شکل ۲- آنالیز SEM برای کربن فعال اصلاح شده



شکل ۳- طیف FT-IR از کربن فعال

در شکل ۳ به بررسی ساختار کربن فعال پرداخته شده است. پیک موجود در  $3688\text{ cm}^{-1}$  نشان دهنده -OH و گروه هیدروکسیل می باشد. پیک موجود در  $1703\text{ cm}^{-1}$  نشان دهنده پیوند  $\text{C=O}$  و گروه کربونیل می باشد. پیک موجود در  $1549\text{ cm}^{-1}$  نیز می تواند نشان دهنده وجود گروه های عاملی اکسیژن دار مانند گروه عاملی کربوکسیلیک و همچنین پیوند  $\text{C=C}$  در حلقه های کربنی می باشد. همچنین یک پیک موجود در  $1105\text{ cm}^{-1}$  نشان دهنده پیوند  $\text{C-O}$  می باشد [۲۶، ۲۷].

(۱) Hysteresis

(۲) Mesopore

نسبت به سطح ویژه جاذب مؤثرتر واقع شده است. همچنین براساس مطالعات انجام شده در دیگر پژوهش‌ها نشان می‌دهد انجام فرایندهای گوناگون از جمله اصلاح با سورفکتانت‌های گوناگون باعث فعال شدن گروه‌های عاملی اولیه جاذب می‌شود که نقش مهمی در افزایش میزان جذب توسط جاذب بازی می‌کند.

### آزمایش‌های جذب ناپیوسته

در سامانه تک جزئی، جذب یون نیکل توسط جاذب کربن فعال اصلاح شده، بر حسب تابعی از pH، غلظت سورفکتانت، غلظت اولیه محلول فلزی، غلظت جاذب مورد بررسی قرار گرفته است. افزون بر این موردها، اثر زمان انجام واکنش مورد ارزیابی ارزیابی قرار گرفته است. به منظور بررسی تنظیم pH اولیه محلول از هیدروکلریک اسید ۰/۱ مولار یا سدیم هیدروکسید ۰/۱ مولار استفاده شد. آزمایش‌های ناپیوسته در ارن‌های ۲۰۰ میلی لیتری دارای جاذب و ۱۰۰ میلی لیتر محلول فلزی مورد نظر با غلظت اولیه ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و ۳۰۰ دور بر دقیقه انجام شد. ظرفیت جذب فلزهای سنگین توسط جاذب کربن فعال اصلاح شده طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{M} \quad (1)$$

در این رابطه  $C_0$  و  $C_e$  غلظت اولیه و تعادلی محلول نمک‌های فلزسنگین بر حسب میلی گرم بر لیتر،  $V$  حجم محلول نمک فلزی بر حسب لیتر،  $M$  جرم جاذب خشک بر حسب گرم،  $q_e$  ظرفیت جذب فلزسنگین بر حسب میلی گرم بر گرم جاذب می‌باشد.

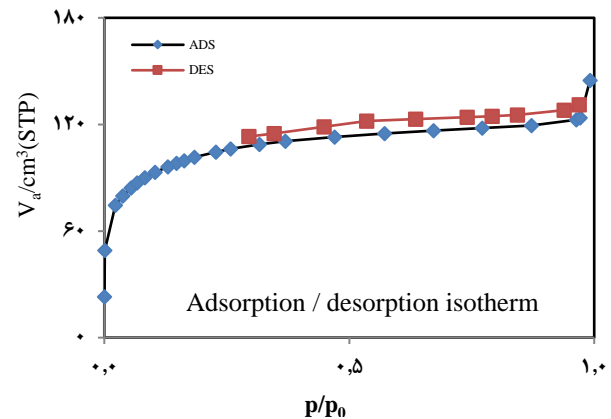
### نتیجه‌ها و بحث

#### اثر غلظت سورفکتانت بر جذب نیکل

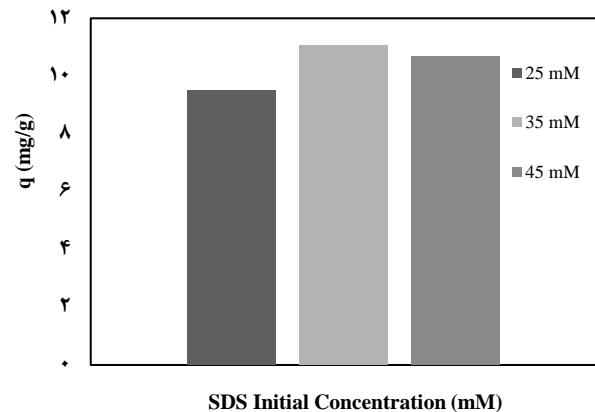
برای تعیین اثر سدیم دودسیل سولفات بر میان جذب فلز نیکل، کربن فعال با استفاده از محلول‌هایی با غلظت‌های اولیه ۲۵، ۳۵ و ۴۵ میلی مولار اصلاح شد و میزان جذب فلز نیکل توسط جاذب‌های تهیه شده بررسی شد که نتیجه‌ها در شکل ۷ آورده شده است. در این بخش محلول دارای غلظت ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر، حجم ۱۰۰ میلی لیتر و دمای آزمایش ۲۵ درجه سلسیوس و مدت ۵ ساعت در نظر گرفته شد. میزان جاذب مورد استفاده نیز ۱۰ گرم بر لیتر بوده است. همان‌گونه که دیده می‌شود میزان جذب نیکل با افزایش غلظت اولیه محلول سورفکتانت مورد استفاده برای اصلاح کربن فعال از ۲۵ به ۳۵ میلی مولار افزایش یافته ولی با افزایش آن از ۳۵ به ۴۵ میلی مولار نه تنها افزایش نمی‌یابد بلکه به میزان جزئی کاهش می‌یابد.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی جاذب‌های کربن فعال و کربن فعال اصلاح شده

نمونه	$S_{BET}$ ( $m^2/g$ )	Pore Volume ( $cm^3/g$ )	Average Pore Diameter (nm)
کربن فعال	۹۴۶/۵	۰/۵۸۱۴	۲/۴۵۷
کربن فعال اصلاح شده با سدیم دودسیل سولفات	۳۶۷/۹۱	۰/۲۲۱۷	۲/۴۱۰

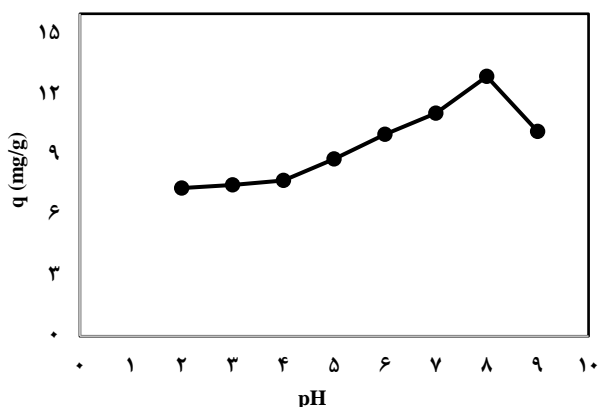


شکل ۶- همدمای جذب و دفع برای جاذب کربن فعال اصلاح شده

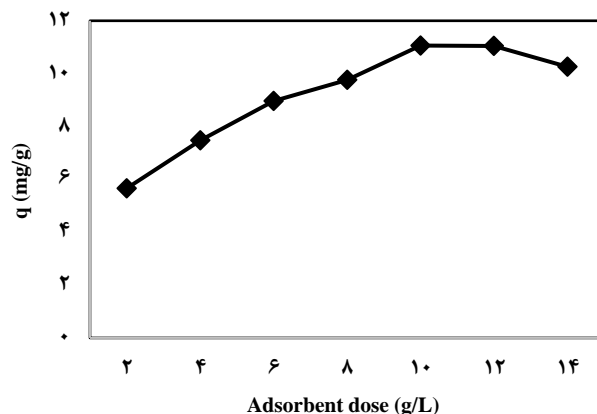


شکل ۷- تأثیر غلظت سورفکتانت بر روی میزان جذب فلز

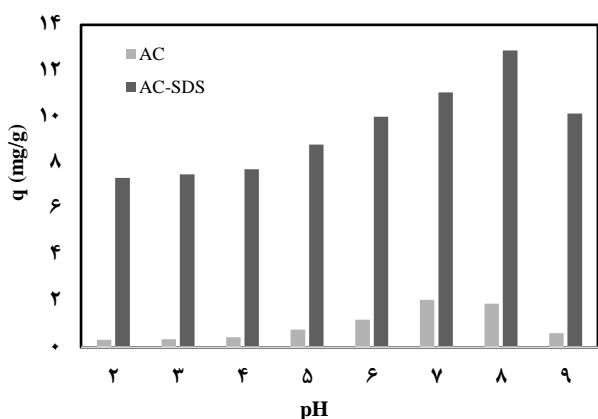
با مقایسه نتیجه‌های آنالیز BET جاذب کربن فعال و کربن فعال اصلاح شده دیده می‌شود که سطح ویژه جاذب کربن فعال پس از اصلاح با سدیم دودسیل سولفات کاهش یافته است ولی با توجه به نتیجه‌های به دست آمده که در ادامه مشاهده و بررسی می‌شود، میزان جذب فلز بوسیله کربن فعال اصلاح شده نسبت به کربن فعال اصلاح نشده افزایش یافته است. در حقیقت اگرچه سطح ویژه جاذب یکی از مهم‌ترین پارامترهای جاذب در فرایند جذب به حساب می‌آید کاهش یافته است ولی با توجه به نتیجه‌های به دست آمده نمایان می‌شود که افزایش گروه‌های عاملی پس از اصلاح جاذب با سدیم دودسیل سولفات



شکل ۹- اثر pH بر روی راندمان حذف نیکل توسط کربن فعال اصلاح شده



شکل ۸- اثر میزان جاذب بر روی راندمان حذف نیکل توسط کربن فعال اصلاح شده



شکل ۱۰- اثر اصلاح کربن فعال بر روی میزان جذب نیکل

همچنین میزان جاذب ۱ گرم در ۱۰۰ میلی لیتر محلول آبی نیکل بوده است. در pH برابر ۸ یون نیکل شروع به تغییر ماهیت داده و به شکل هیدروکسید نیکل می‌باشد که در این حالت نیکل در محلول آبی رسوب می‌کند [۳۰]. به همین علت از pH های بالاتر از ۹ برای بررسی اثر pH بر روی نیکل استفاده نشد. همان‌گونه که دیده می‌شود با افزایش pH، میزان جداسازی نیکل افزایش می‌یابد. برای استدلال این موضوع می‌توان بیان نمود در pH های پایین به دلیل وجود  $H_3O^+$ ، رقابتی برای جذب بین نیکل و  $H_3O^+$  صورت می‌گیرد که این رقابت جذب نیکل را کاهش داده است. همچنین افزایش میزان ظرفیت جذب نیکل در pH های بالا را می‌توان به دلیل افزایش بار منفی روی سطح جاذب تفسیر نمود. بیشترین ظرفیت جذب نیز در pH برابر ۸ صورت گرفته که میزان آن ۱۲/۸۹ میلی گرم بر گرم بوده است. همچنین در pH برابر ۹ به دلیل رسوب نیکل در محلول آبی میزان جذب کاهش یافته است.

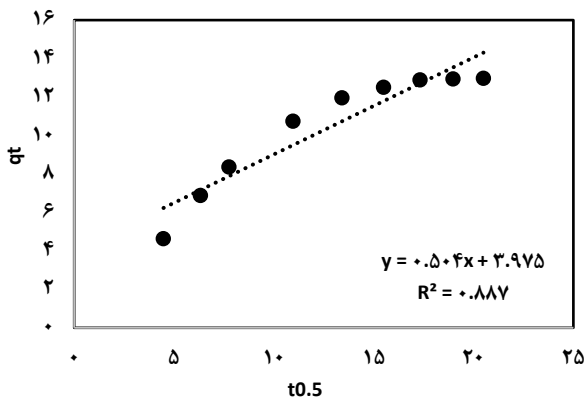
مطالعه‌هایی که بر روی میزان جذب سدیم دودسیل سولفات توسط کربن فعال صورت گرفته نشان می‌دهد بیشترین میزان جذب سدیم دودسیل سولفات توسط کربن فعال در بازه غلظت ۳۰ تا ۳۵ میلی مولار صورت می‌گیرد [۲۹] و در غلظت‌های بالاتر از ۳۵ میلی مولار جذب سورفکتانت توسط کربن فعال به شدت کاهش می‌یابد ولی همین میزان جذب نیز شاید باعث کاهش بیش از اندازه سطح ویژه جاذب شده و به همین علت میزان جذب فلز مقداری کاهش می‌یابد.

#### اثر غلظت جاذب بر ظرفیت جذب نیکل

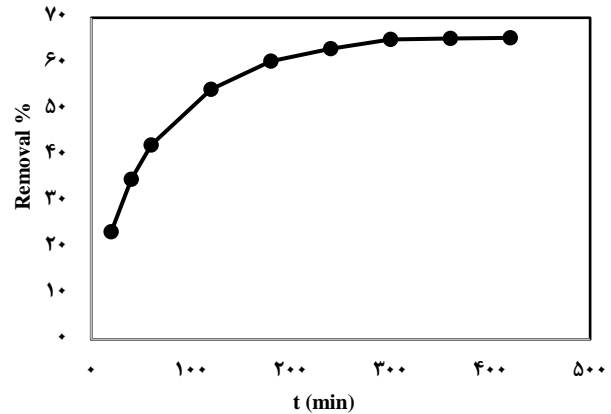
برای بررسی میزان جاذب بر روی ظرفیت جذب نیکل بر روی کربن فعال اصلاح شده، مقادیرهای گوناگون (۲/۴-۰/۱ گرم) در ۱۰۰ میلی لیتر محلول آبی در غلظت اولیه ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر نیکل در مدت ۵ ساعت استفاده شد. نتیجه‌ها در شکل ۸ و آورده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود با افزایش میزان جاذب از ۰/۲ تا ۱ گرم، ظرفیت جذب افزایش یافته و به مقدار ۱۱/۰۶ میلی گرم بر گرم می‌رسد و افزایش بیش از ۱ گرم برای جاذب تأثیر چندانی بر روی ظرفیت جذب ندارد و در ادامه میزان آن کاهش می‌یابد. بنابراین میزان جاذب ۱ گرم در ۱۰۰ میلی لیتر محلول آبی به عنوان میزان جاذب بهینه برای کربن فعال اصلاح شده در آزمایش‌های دیگر انتخاب شد.

#### اثر pH بر روی میزان ظرفیت جذب نیکل

اثر pH بر روی جذب نیکل از محلول آبی توسط کربن فعال اصلاح شده در بازه pH ۲ تا ۹ بررسی شد و نتیجه‌های آن در شکل ۹ نشان داده شده است. آزمایش‌ها در غلظت اولیه ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر، زمان تماس ۵ ساعت و دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام شد.



شکل ۱۲- نمودار معادله‌ی موریس - وبر برای جذب نیکل توسط کربن فعال اصلاح شده



شکل ۱۱- تأثیر زمان تماس بر روی راندمان حذف نیکل توسط کربن فعال اصلاح شده

اطلاع از سینتیک این فرایندها بسیار مهم می‌باشد. مدل‌های سینتیکی گوناگونی برای عمل جذب در فرایندهای ناپیوسته به کار می‌رود ولی به دلیل پیچیدگی ریاضی بسیار زیاد این مدل‌ها، آن‌ها را نمی‌توان به آسانی به کار برد. افزون بر این برخی مدل‌های سینتیکی برای فرایندهای جذب گازی مورد استفاده قرار می‌گیرند که با توجه فرایند جذب جامد مایع که در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار گرفته است از معادله‌های سینتیکی شبه درجه اول، شبه درجه دوم و موریس - وبر در این پژوهش استفاده شد [۳۱]. در معادله‌ی شبه درجه اول و دوم فرض بر آن است که تفاوت بین  $q_t$  و  $q_e$  نیروی اصلی برای عمل جذب می‌باشد که میزان جذب نیز متناسب با این نیرو می‌باشد. هر دو این معادله‌ها به صورت گسترده‌ای برای بررسی داده‌های تجربی به دست آمده از جذب رنگ، آنیون و فلزها از محلول آبی بر روی جاذب‌های گوناگون به کار می‌رود. برای بررسی اثر نفوذ در سینتیک فرایند از معادله موریس - وبر استفاده می‌شود فرایند جذب ذره‌های از محلول آبی بر روی جاذب در چندین مرحله اتفاق می‌افتد و فرایند کلی جذب ممکن است با یکی یا چند مورد از این مرحله‌ها کنترل شود اولین مرحله شامل نفوذ ماده‌ی جذب شونده از محلول به سطح خارجی جاذب می‌باشد. نفوذ در حفره که دومین مرحله می‌باشد که اگر این مرحله کنترل کننده باشد می‌توان با استفاده از معادله‌ی موریس - وبر این موضوع را مورد بررسی قرار داد. مرحله سوم نیز نفوذ در سطح جاذب می‌باشد. که به طور کلی مرحله‌ی سوم این موضوع را بیان می‌کند که تعادل نهایی بر اساس غلظت بسیار پایین ماده‌ی جذب شونده در محلول و کم شدن سایت‌های فعال در جاذب برای عمل جذب اتفاق می‌افتد. در معادله موریس - وبر  $q_t$  ظرفیت جذب در زمان‌های گوناگون ( $t$ ) می‌باشد.

$$q_t = K_{id}t^{0.5} + C$$

رسم  $q_t$  بر  $t^{0.5}$  در شکل ۱۲ آورده شده است. مقدار ثابت این معادله  $K_{id}$  را می‌توان با محاسبه شیب این خط به دست آورد.

در ادامه به منظور مقایسه میزان جذب نیکل توسط کربن فعال و کربن فعال اصلاح شده آزمایش‌های جذب در pH های گوناگون توسط کربن فعال با شرایط همسان صورت پذیرفت که نتایج آن در شکل ۱۰ قابل دیدن می‌باشد. همان‌گونه که از در شکل قابل دیدن می‌باشد بیش‌ترین میزان جذب نیکل توسط کربن فعال اصلاح نشده در pH های ۷ و ۸ صورت گرفته که به ترتیب برابر ۲/۰۶ و ۱/۹ میلی گرم بر گرم بوده است که نشان می‌دهد اصلاح کربن فعال منجر به افزایش چشمگیری در جذب نیکل شده است.

#### اثر زمان انجام واکنش بر روی جذب نیکل

شکل ۱۱ اثر زمان انجام واکنش را بر روی راندمان حذف نیکل توسط کربن فعال اصلاح شده نشان می‌دهد. برای انجام این آزمایش‌های غلظت اولیه فلز در محلول آبی ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر، pH محلول ۸ و میزان جاذب ۱ گرم در ۱۰۰ میلی لیتر بوده است. همان‌گونه که دیده می‌شود در زمان واکنش ۱۸۰ دقیقه راندمان حذف به میزان ۶۰٪ رسیده و پس از آن تغییر کمی در راندمان حذف روی داده است. در حقیقت این عددها به این معنی هستند که در حدود ۹۲٪ میزان جداسازی در همان ۱۸۰ دقیقه نخستین صورت پذیرفته است. همچنین نتیجه‌ها نشان می‌دهد فرایند جذب در زمان ۳۰۰ دقیقه به تعادل رسیده و پس آن میزان جذب تغییر محسوسی نمی‌کند. سیر افزایشی جذب در زمان‌های نخست به فراوانی سایت‌های جذب در سطح جاذب مربوط می‌شود و با گذشت زمان و به دلیل کاهش سایت‌های فعال روند صعودی کند و به یک مقدار ثابت می‌رسد.

#### بررسی سینتیک فرایند جذب نیکل

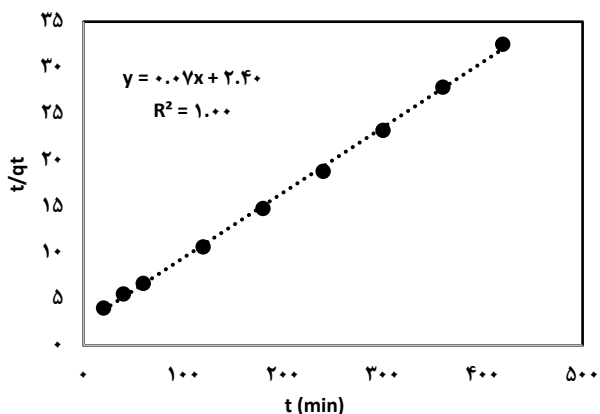
بسیاری از پدیده‌های جذب با جاذب‌های گوناگون به زمان وابسته است. برای درک دینامیک واکنش و پیش بینی وضعیت جذب با زمان،

جدول ۳- پارامترهای معادله شبه درجه اول برای جداسازی نیکل با استفاده از کربن فعال اصلاح شده

مدل شبه درجه اول	$r^2$	$K_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$q_e$ (mg/g)
	۰/۹۹	۰/۰۱	۹/۵۰

جدول ۴- پارامترهای معادله شبه درجه دوم برای جذب نیکل با استفاده از کربن فعال اصلاح شده

مدل شبه درجه دوم	$r^2$	$K_2$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$q_e$ (mg/g)
	۰/۹۹	۰/۰۱	۱۴/۴۵



شکل ۱۴- نمودار معادله ی شبه درجه دوم برای جذب نیکل توسط کربن فعال اصلاح شده

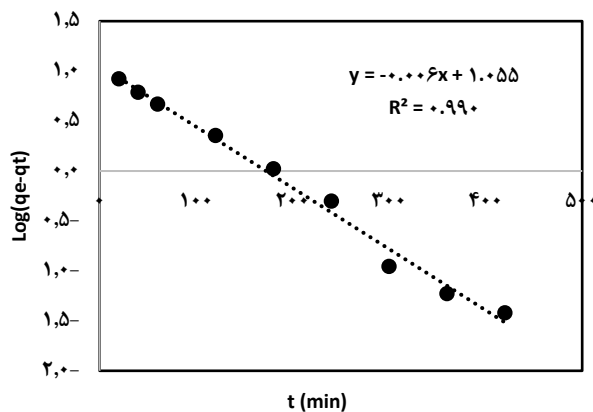
با توجه نتیجه های به دست آمده، ضریب همبستگی برای معادله شبه درجه اول و شبه درجه دوم از معادله موریس و بر بهتر بوده است. همچنین مقدار  $q_e$  به دست آمده از معادله شبه درجه دوم نیز نسبت به معادله شبه درجه اول به مقدار به دست آمده از آزمایش های نزدیک تر می باشد. تطابق نتیجه های به دست آمده از آزمایش های با مدل شبه درجه اول و شبه درجه دوم نشان دهنده آن می باشد که مرحله کنترل کننده سرعت فرایند جذب مرحله جذب شیمیایی، تبادل الکترون بین جاذب و جذب شونده و یا تبادل یون می باشد [۳۲].

#### اثر غلظت اولیه محلول های آبی و بررسی ایزوترم جذب

برای بررسی غلظت اولیه فلز بر روی فرایند جذب، غلظت نیکل در بازه ۵۰ تا ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر انتخاب شد. نتیجه های به دست آمده از آزمایش های در شکل های ۱۵ و ۱۶ قابل دیدن می باشد. همان گونه که دیده می شود با افزایش غلظت اولیه نیکل اگرچه ظرفیت جذب افزایش یافته ولی راندمان حذف نیکل از محلول آبی کاهش می یابد. این پدیده را می توان چنین توصیف کرد که در غلظت های پایین نیکل سایت های فعال موجود روی سطح جاذب به کل یون های فلزی در محلول بالا است بنابراین همه یون های فلزی با جاذب

جدول ۲- پارامترهای معادله موریس - وبر برای جداسازی نیکل با استفاده از کربن فعال اصلاح شده

مدل موریس - وبر	$r^2$	$K_{id}$ ( $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{min}^{0.5})$ )	C (mg/g)
	۰/۸۸	۰/۵۰	۳/۹۷



شکل ۱۳- نمودار معادله ی شبه درجه اول برای جذب نیکل توسط کربن فعال اصلاح شده

ثابت های معادله موریس - وبر و ضریب همبستگی آن در جدول ۲ قابل دیدن می باشد.

معادله خطی شبه درجه یک در ادامه آورده شده است که  $q_t$  و  $q_e$  بر اساس تعاریف قبلی می باشد  $K_1$  ثابت این معادله می باشد.

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_{eq} - q_t)$$

در این معادله نیز با رسم  $\log(q_e - q_t)$  بر اساس  $t$  می توان ثابت این معادله را ه آورد (شکل ۱۳). ثابت این معادله همان شیب خط می باشد. ثابت معادله شبه درجه اول و ضریب همبستگی آن در جدول ۳ قابل دیدن می باشد.

ثابت معادله شبه درجه اول و ضریب همبستگی آن در جدول ۳ قابل دیدن می باشد.

معادله خطی شده شبه درجه دوم نیز به صورت زیر می باشد.

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_{eq} - q_t)^2$$

همان گونه که در شکل ۱۴ دیده می شود با رسم  $t/q_t$  بر اساس  $t$ ، خطی سازی این معادله انجام شد. پس از آن با استفاده از شیب خط،  $q_e$  و در ادامه با محاسبه عرض از مبدا این خط و دانستن مقدار  $q_e$  به سادگی می توان ثابت این معادله را به دست آورد.

همچنین ثابت معادله شبه درجه دوم و ضریب همبستگی برای آن ها در جدول ۴ قابل دیدن می باشد.

که در این رابطه،  $q_m$  (mg/g) و  $K_L$  (L/mg) ثابت‌های لانگمویر می‌باشند که به ترتیب به بیش‌ترین میزان جذب تک لایه و انرژی جذب مرتبط می‌باشند. پارامتر  $K_L$  معرف میزان تمایل برقراری پیوند بین جاذب و جذب شونده به‌ویژه در غلظت‌های پائین می‌باشد و هرچه مقدار آن بیش‌تر باشد، جاذبه بین جزء جذب شونده و جاذب بیش‌تر است. همچنین در این رابطه  $q_e$  (mg/g) و  $C_e$  (mg/L) به ترتیب نشان‌دهنده میزان جذب تعادلی و غلظت تعادلی جزء جذب شونده هستند. برای بررسی دلخواه بودن فرایند جذب، پارامتر بدون بعد  $R_L$  مطابق معادله (۳) تعریف می‌شود که به آن پارامتر تعادلی نیز می‌گویند [۲ و ۳]:

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (3)$$

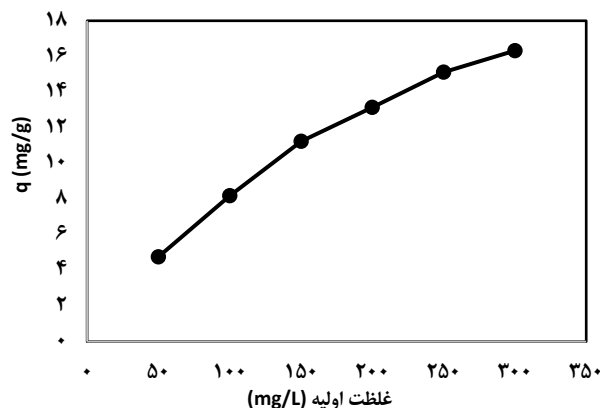
که در آن،  $C_0$  (mg/L) بیش‌ترین غلظت اولیه جزء جذب شونده می‌باشد. مقدار  $R_L$  نوع هم‌دما را مشخص می‌کند. اگر  $R_L$  از یک بزرگ‌تر باشد، جذب غیردلخواه است؛ درحالی‌که  $R_L$  برابر با یک نشان‌دهنده هم‌دمای خطی،  $0 < R_L < 1$  نشان‌دهنده جذب دلخواه و  $R_L$  برابر صفر نشان‌دهنده جذب برگشت ناپذیر می‌باشد [۲، ۳]. هم‌دمای فرندلیج جذب بر روی سطوح ناهمگن را توصیف می‌کند. در این مدل فرض بر این است که سطح جاذب دارای مرکزهای جذب با میزان تمایل متفاوت است و در نخست مرکزهای جذب مستحکم‌تر پر شده و بقیه به ترتیب استحکامشان پر می‌شوند. مدل هم‌دمای غیرخطی فرندلیج به صورت زیر توصیف می‌شود [۲]:

$$q_e = \frac{x}{m} = K_F C_e^{1/n} \quad (4)$$

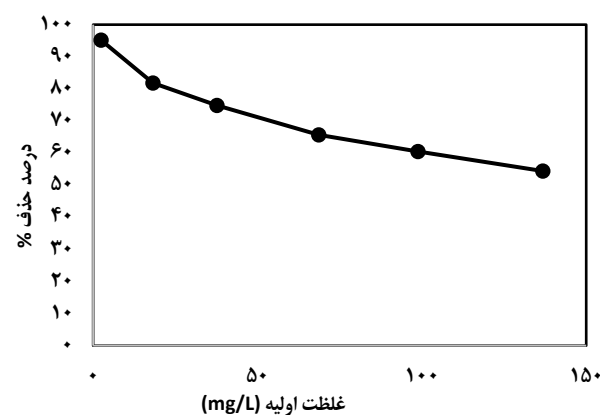
که در این رابطه،  $K_F$  ثابت فرندلیج برحسب  $\text{mg/g} \times (\text{L/mg})^{1/n}$  است که مرتبط با ظرفیت جذب می‌باشد و  $1/n$  ثابت بدون بعد فرندلیج است و هرچه  $n$  بیش‌تر باشد نیروی جاذبه بین جاذب و جذب شونده قوی‌تر خواهد بود [۲، ۳].

مدل ردلیش پترسون برای هر دو سطح همگن و ناهمگن استفاده می‌شود ولی بیش‌تر به منظور بررسی داده‌های تعادلی برای سطوح ناهمگن استفاده می‌شود و  $\beta$  فاکتور ناهمگنی نامیده می‌شود. هرچه میزان  $\beta$  به یک نزدیک‌تر شود این معادله به معادله لانگمویر نزدیک‌تر می‌شود به طوری که در  $\beta$  برابر ۱ این معادله تبدیل به معادله لانگمویر می‌شود و هرچه میزان آن به صفر نزدیک‌تر شود نشان‌دهنده ناهمگن بودن سطح جاذب می‌باشد [۳۳، ۳۴]. معادله این مدل به صورت زیر می‌باشد:

$$q_e = \frac{K_R C_e}{1 + a_R C_e^\beta}$$



شکل ۱۵- اثر غلظت اولیه محلول آبی نیکل بر ظرفیت جذب توسط کربن فعال اصلاح شده



شکل ۱۶- اثر غلظت اولیه محلول آبی نیکل بر راندمان حذف توسط کربن فعال اصلاح شده

ممکن است برهم کنش کنند و از محلول حذف شوند. این درحالی است که در غلظت‌های بالاتر سایت‌های فعال موجود برای جذب بر روی سطح جاذب به تدریج کم‌تر می‌شوند و بنابراین درصد حذف یون‌های فلزی به تدریج کاهش می‌یابد.

### هم‌دماهای تعادلی جذب نیکل

در مدل هم‌دمای لانگمویر فرض بر این است که یک مولکول جذب شونده تنها یک مرکز جذب را اشغال می‌کند و مولکول‌های جذب شده هیچ برهم کنشی با یکدیگر ندارند. بدین ترتیب جذب مولکول اول هیچ اثری بر جذب مولکول‌های بعد نخواهد گذاشت. این مدل یک معادله دو پارامتری است که نشان‌دهنده سطح همگن با انرژی‌های یکنواخت از جایگاه‌های فعال می‌باشد. مدل هم‌دمای غیر خطی لانگمویر به صورت زیر توصیف می‌شود [۳]:

$$q_e = \frac{K_L q_{max} C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2)$$



جدول ۵- ثابت های همدمای جذب برای جذب نیکل به وسیله کربن فعال اصلاح شده

ایزوترم لانگمویر			
$q_{max}$ (mg/g)	$K_L$ (L/mg)	$r^2$	
۱۷/۵۶	۰/۰۵۴۸۶	۰/۹۰۲۰	
ایزوترم فرندلیچ			
$K_f$	$n$	$r^2$	
۳/۴۳۸	۳/۱۳	۰/۹۹۵۲	
ایزوترم ردلیش پترسون			
$K_R$ (L/g)	$a_R$ (L/mg)	$\beta$	$r^2$
$۴/۸۱ \times 10^4$	$۱/۳۹۹ \times 10^4$	۰/۶۶۱۴	۰/۹۹۵۲

ثابت های این معادله ها و ضریب همبستگی برای هر کدام در جدول ۵ قابل دیدن می باشد.

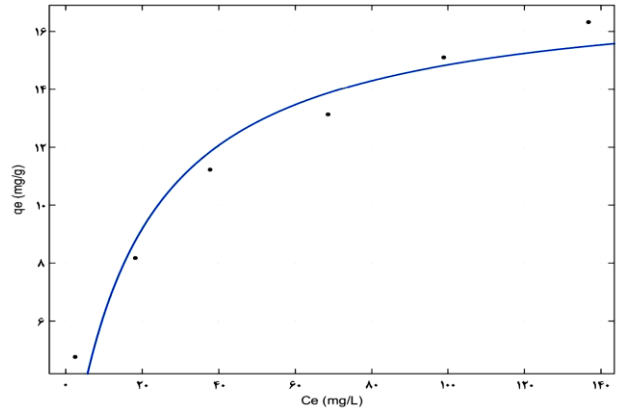
بر اساس نتیجه های به دست آمده بهترین تطبیق با همدمای فرندلیچ و ردلیش پترسون به دست آمده است. تطابق نتیجه های به دست آمده از آزمایش های با همدمای فرندلیچ و ردلیش پترسون نشان دهنده آن است که سطح جاذب ناهمگن بوده و سایت های فعال به صورت یکنواخت روی سطح جاذب پخش نشده دارای انرژی یکسان نمی باشند ولی این دو معادله نمی توانند اشباع سطح جاذب توسط مادهی جذب شونده را پیش بینی کنند.

#### اثر دما و بررسی ترمودینامیک فرایند نیکل

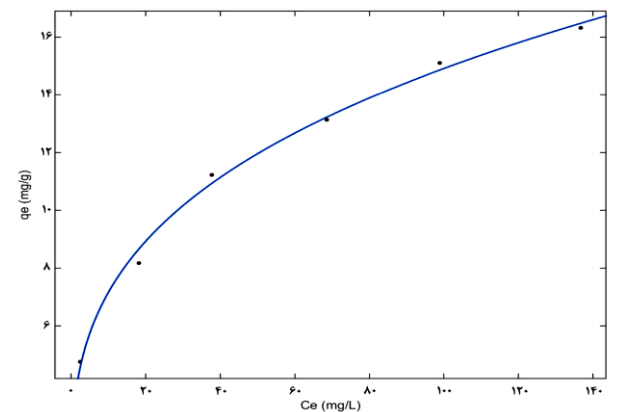
اثر دما بر روی راندمان جذب در بازه دمایی ۲۵ تا ۴۵ درجه سلسیوس بررسی شد. برای جذب نیکل توسط کربن فعال اصلاح شده با سدیم دودسیل سولفات، زمان تماس ۵ ساعت، میزان جاذب ۱ گرم در ۱۰۰ میلی لیتر محلول، غلظت اولیه نیکل ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر انتخاب شد.

نتیجه ها در جدول ۶ نشان داده شده است. همان گونه که قابل دیدن است با افزایش دما، راندمان حذف به طور چشمگیری افزایش می یابد و با توجه به مقدار مثبت آنتالپی یک فرایند گرماگیر را نشان می دهد و این بیانگر شیمیایی بودن فرایند است.

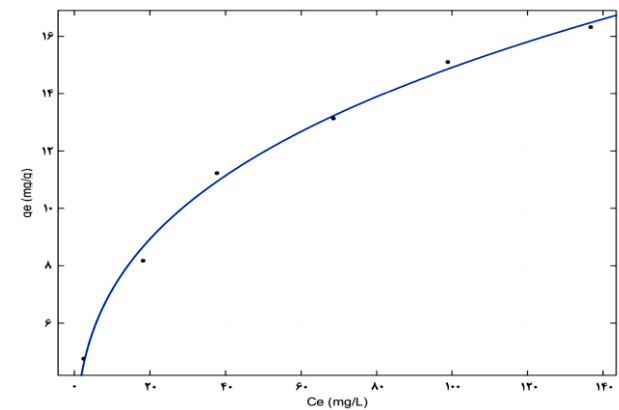
مقدارهای منفی پارامتر  $\Delta G^\circ$  نشان می دهد که فرایند حذف نیکل توسط جاذب مورد استفاده امکان پذیر و خودبخودی انجام خواهد گرفت. مقدارهای مثبت  $\Delta S^\circ$  نیز نشان می دهد که درجه بی نظمی در طول فرایند جذب افزایش می یابد. میزان پارامتر  $\Delta H^\circ$  نیز با توجه به آن که بزرگ تر از ۲۱ کیلوژول بر مول می باشد نشان دهنده آن است که غالب جذب نیکل توسط جاذب جذب شیمیایی می باشد [۳۵، ۳۶].



شکل ۱۷- برازش داده های تعادلی جذب نیکل با همدمای جذب لانگمویر



شکل ۱۸- برازش داده های تعادلی جذب نیکل با همدمای جذب فرندلیچ



شکل ۱۹- برازش داده های تعادلی جذب نیکل با همدمای جذب ردلیش پترسون

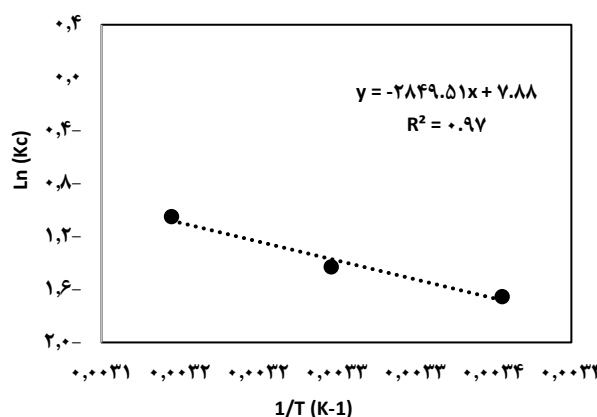
در این بخش جذب تعادلی نیکل با استفاده از سه مدل همدمای شامل لانگمویر، فرندلیچ و ردلیش پترسون بررسی شد. نمودارهای مربوط به همدمای جذب نیکل در شکل های ۱۷ تا ۱۹ ارائه شده است. ثابت های این معادله ها و ضریب همبستگی برای هر کدام در جدول ۲ قابل دیدن باشد.

ظرفیت جذب افزایش پیدا می‌کند و در pH برابر ۸ به بیش‌ترین میزان خود در یک غلظت ثابت می‌رسد. بررسی تأثیر غلظت سورفکتانت نشان می‌دهد با افزایش غلظت اولیه محلول سورفکتانت مورد استفاده برای اصلاح کربن فعال از ۲۵ به ۳۵ میلی مولار افزایش یافته یول با افزایش آن از ۳۵ به ۴۵ میلی مولار به میزان جزئی کاهش می‌یابد. تأثیر غلظت جاذب بروی میزان جذب نیز افزایشی بوده و در غلظت ۱۰ گرم بر لیتر به بالاترین حد خود می‌رسد. بررسی تأثیر زمان واکنش نشان دهنده سیر فزاینده جذب در لحظه‌های اولیه فرایند بوده و در حدود ۹۲٪ میزان جداسازی در ۱۸۰ دقیقه نخستین صورت می‌پذیرد و واکنش در زمان ۳۰۰ دقیقه به تعادل می‌رسد. بررسی میزان ظرفیت جذب نیکل در غلظت‌های اولیه‌ی گوناگون نشان می‌دهد که با افزایش غلظت اولیه‌ی محلول، ظرفیت جذب افزایش پیدا می‌کند و بیش‌ترین میزان جذب بر اساس مدل لانگمویر برابر ۱۷/۵۶ میلی گرم بر گرم جاذب می‌باشد. افزون بر این براساس مدل فرنرندلیچ پارامتر 1/n کوچک‌تر از ۱ به‌دست آمده که نشان دهنده آن است که مکانیسم غالب جذب شیمیایی بوده است. همچنین نتیجه‌های به‌دست‌آمده از مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهد که فرایند جذب دلخواه و سطح جاذب ناهمگن و با انرژی‌های غیریکنواخت از سایت‌های فعال می‌باشد که نخست مرکزهای جذب مستحکم‌تر پر شده و بقیه به ترتیب استحکامشان پر می‌شوند.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۸

جدول ۶- پارامترهای ترمودینامیکی جذب نیکل توسط کربن فعال اصلاح شده

$\Delta H^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta S^\circ$ (kJ/molK)	T (K)	$\Delta G^\circ$ (kJ/mol)	$r^2$
۲۳/۶۹	۰/۰۶۵	۲۹۸	-۱/۶۰	۰/۹۷۳
		۳۰۸	-۲/۲۳	
		۳۱۸	-۳/۳۱	



شکل ۲۰- برازش منحنی ثابت تعادل در فرایند جذب نیکل توسط کربن فعال اصلاح شده

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، جاذب کربن فعال سه بار با آب مقطر شست و شو داده شد و سپس به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس خشک شد. سپس ۱ گرم از کربن فعال را به ۱۰۰ میلی لیتر محلول ۳۵ میلی مولار سدیم دودسیل سولفات (SDS) افزوده و به مدت ۴۸ ساعت بر روی هم‌زن با سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه قرار داده و پس از صاف نمودن و به مدت ۱۲ ساعت خشک شد تا برای فرایند جذب سطحی آماده شود. نتیجه‌های آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در یک محلول با غلظت اولیه ثابت با افزایش pH،

## مراجع

- [1] Fu, F., Wang, Q., *Removal of Heavy Metal Ions from Wastewaters: A Review. J. Environ. Manag.*, **92**: 407- 418 (2011).
- [2] Subbaiah, M.V., Vijaya, Y., Kumar, N.S.Reddy, A.S., Krishnaiah, A., *Biosorption of Nickel from Aqueous Solutions by Acacia Leucocephala Bark: Kinetics and Equilibrium Studies, Colloids Surf. B Biointerfaces*, **74**: 260-265 (2009).

- [3] Abbasizadeh S., R. Keshtkar A., Mousavian M. A., Sorption of Heavy Metal Ions II from Aqueous Solution by a Novel Cast PVA/TiO<sub>2</sub> Nanohybrid Adsorbent Functionalized with Amine Groups, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **20**: 1656-1664 (2014).
- [4] Wu Sh., Li F., Wang H., Fu L., Zhang B., Li G., Effects of Poly (Vinyl Alcohol) (PVA) Content on Preparation of Novel Thiol-Functionalized Mesoporous PVA/SiO<sub>2</sub> Composite Nanofiber Membranes and Their Application for Adsorption of Heavy Metal Ions from Aqueous Solution, *Polymer*, **51**: 6203-621 (2010).
- [5] Resterna A. B., Cierpiszewski R., Prochaska K., Kinetic and Equilibrium studies of the Removal of Cadmium Ions from Acidic Chloride Solutions Byhydrophobicpyridinecarboxamideextractants, *J. Hazard.Mater*, **179**: 828-833 (2010).
- [6] Aydin F.A., Soylak M., Solid Phase Extraction and Preconcentration of Uranium (VI) and Thorium (IV) on Duolite XAD761 Prior to Their Inductively Coupledplasma Spectrometric Determination" *Talanta*, **72**: 187-192 (2007)
- [7] Soylak M., Erdogan N.D., Copper(II)-Rubeanic Acid Coprecipitation System Forseparation-Preconcentration of Trace Metal Ions in Environmental Samples for Their Flame Atomic Absorption Spectrometric Determinations, *J. Hazard. Mater*, **137**: 1035-1041 (2006).
- [8] Uluzozlu O.D., Tuzen M., Mendil D., Soylak M., Coprecipitation of Trace Elements with Ni<sup>2+</sup>/2-Nitroso-1-Naphthol-4-Sulfonic Acid and Their Determination by Flame Atomic Absorption Spectrometry, *J. Hazard. Mater*, **176**: 1032-1037 (2010).
- [9] Kornilovich B.Yu., Kovalchuk I.A., Pshinko G.N., Tsapyuk E.A., Krivoruchko A.P., Water Purification of Uranium by the Method of Ultrafiltration, *J. Water Chem. Technol*, **22**: 43-47 (2000).
- [10] Shoushtari A.M., Zargaran M., Abdouss M., Preparation and Characterization of High Efficiency Ion-Exchange Crosslinked Acrylic Fibers, *J. Appl. Polym. Sci*, **101**: 2202-2209 (2006).
- [11] Chang H.S., Korshin G.V., Wang Z., Zachara J.M., "Adsorption of Uranyl on Gibbsitea Time-Resolved Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy Study, *EnvironSci. Technol*, **40**: 1244-1249 (2006).
- [12] Aytas S., Akyil S., Eral M., Adsorption and Thermodynamic Behavior of Uranium Zeolite, *J. Radioanal.Nucl. Chem*, **260**: 119-125 (2004).
- [13] Abbasizadeh S., R.Keshtkar A., Mousavian M. A., Preparation of a Novel Electrospun Polyvinyl Alcohol/Titanium Oxide Nanofiber Adsorbent Modified with Mercapto Groups for Uranium(VI)and Thorium(IV) Removal from Aqueous Solution, *Chemical Engineering Journal*, **220**: 161-171 (2013).
- [14] Aydin F.A., Soylak M., Separation, Preconcentration and Inductively Coupledplasma-Mass Spectrometric (ICP-MS) Determination of Thorium(IV), Titanium(IV), Iron(III), Lead(II) and Chromium(III) on 2-Nitroso-1-Naphtholimpregnated MCI GEL CHP20P Resin, *J. Hazard. Mater*, **173**: 669-674 (2010).

- [15] Chi K. Ahn, Donghee Park, Seung H. Woo, Jong M. Park. [Removal of Cationic Heavy Metal from Aqueous Solution by Activated Carbon Impregnated with Anionic Surfactants](#), *J. of Hazardous Materials*, **164**: 1130-1136 (2009)
- [16] Sato S., Yoshihara K., Moriyama K., [Influence of Activated Carbon Surface Acidity on Adsorption of Heavy Metal Ion and Aromatics from Aqueous Solution](#), *Appl. Surf. Sci.*, **253**: 8554-8559 (2007).
- [17] Amuda O.S., Giwa A.A., Bello I.A., [Removal of Heavy Metal from Industrial Wastewater Using Modified Activated Coconut Shell Carbon](#), *Biochem. Eng. J.*, **36**: 174-181 (2007).
- [18] Yang L., Wu S., Chen J.P., [Modification of Activated Carbon by Polyaniline for Enhanced Adsorption of Aqueous Arsenate](#), *Ind. Eng. Chem. Res.*, **46**: 2133-2140 (2007).
- [19] Afkhami A., Madrakian T., Amini A., Karimi Z., [Effect of the Impregnation of Carbon Cloth with Ethylene diamine tetraacetic Acid on Its Adsorption Capacity for the Adsorption of Several Metal Ions](#), *J. Hazard. Mater.*, **150**: 408-412 (2008).
- [20] Monser L., Amor M.B., Ksibi M., [Purification of Wet Phosphoric Acid Using Modified Activated Carbon](#), *Chem. ng. Process*, **38**: 267-271 (1999).
- [21] Monser L., Adhoum N., [Modified Activated Carbon for the Removal of Copper, Zinc, Chromium and Cyanide from Wastewater](#), *Sep. Purif. Technol.*, **26**: 137-146 (2002).
- [22] Bas C.A., Karagunduz A., Keskinler B., Cakici A., [Effect of Presence of Ions on Surface Characteristics of Surfactant Modified Powdered Activated Carbon \(PAC\)](#), *Appl. Surf. Sci.* **218**: 169-174 (2003).
- [23] Choi H.-D., Cho J.-M., Baek K., Yang J.-S., Lee J.-Y., [Influence of Cationic Surfactant on Adsorption of Cr\(VI\) Onto Activated Carbon](#), *J. Hazard. Mater.*, **161**: 1565-1568 (2009).
- [24] Hong H.-J., Kim H., Baek K., Yang J.-W., [Removal of Arsenate, Chromate and Ferricyanide by Cationic Surfactant Modified Powdered Activated Carbon](#), *Desalination*, **223**: 221-228 (2008).
- [25] Lin, S.Y., Chen, W. F., Cheng, M., Li, Q., [Investigation of Factor that Affects Cationic Surfactant Loading on Activated Carbon and Perchlorate Adsorption](#), *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **434**: 236-242 (2013).
- [26] Chen, L., Wilson, R.H., McCann, M.C., [Infra-Red Microscopy of Hydrated Biological Systems: Design and Construction of a New Cell with Atmospheric Control for the Study of Plant Cell Walls](#), *Journal of Microscopy*, **188**: 62-71 (1997).
- [27] Sharma, G., Pathania, D., Naushad, M., [Preparation, Characterization and ion Exchange Behavior of Nanocomposite Polyaniline Zirconium\(IV\) Selenotungstophosphate for the Separation of Toxic Metal Ions](#), *Ionics*, **21**: 1045-1055 (2015).
- [28] Sudhasree, S., Shakila Banu, A., Brindha, P., Kurian, G., [Synthesis of Nickel Nanoparticles by Chemical and Green Route and Their Comparison in Respect to Biological Effect and Toxicity](#), *Toxicological & Environmental Chemistry*, **96**: 743-754 (2014).

- [29] González-García, Gonzalez-Martin M.L., Denoyel, R., Gallardo-Moreno A.M., Labajos-Broncano, L., Bruque, J.M., [Ionic Surfactant Adsorption Onto Activated Carbons](#), *Journal of colloid and interface science*, **278**(2): 257-264 (2004).
- [30] Byeon S., Kavitha D., Ponvel K.M., Kim K., Lee C., [Surface Modified Granular Activated Carbon for Enhancement of Nickel Adsorption from Aqueous Solution](#), *Korean Journal of Chemical Engineering*, **26**: 1748-1753 (2009).
- [31] Duong D., D., "[Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics](#)". Imperial College Press, Queensland, Australia (1998).
- [32] Ozacar M., Sengil I.A., Turkmenler H., [Equilibrium and Kinetic Data, and Adsorption Mechanism for Adsorption of Lead Onto Valonia Tannin Resin](#), *Chemical Engineering Journal*, **143**: 32-42 (2008).
- [33] Allen S.J., Mckay G. Porter J.F., [Adsorption Isotherm Models for Basic Dye Adsorption by Peat in Single and Binary Component Systems](#), *Journal of Colloid and Interface Science*, **280**: 322-333 (2004).
- [34] Sirvastava V.C., Mall I.D., Mishra I.M., [Equilibrium Modeling of Single and Binary Adsorption of Cadmium and Nickel Onto Bagasse Fly Ash](#), *Chemical Engineering Journal*, **117**: 79-91 (2006).
- [35] Dastbaz A., Keshtkar A.R., [Adsorption of Th<sup>4+</sup>, U<sup>6+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, and Ni<sup>2+</sup> from Aqueous Solution by a Novel Modified Polyacrylonitrile Composite Nanofiber Adsorbent Prepared by Electrospinning](#), *Applied Surface Science*, **293**: 336-344 (2014).
- [36] Karimi P., Rafizadeh M., Afshar Taromi F., [Preparation of Animated-Polyacrylonitrile Membranes for the Adsorption of Metal Ions: Comparison with Microfibers](#), *Journal of Hazardous Materials*, **186**: 182-189 (2011).