



تعیین شرایط بهینه ظرفیت جذب و درصد جذب یون‌های سیانید با استفاده از گل قرمز فعال شده

نازنین دیهیمی، مهدی ایران‌نژاد*، بهرام رضایی

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۹ آبان ماه ۱۳۹۶
بازنگری: ۱۰ دی ماه ۱۳۹۶
پذیرش: ۱۳ دی ماه ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۷ دی ماه ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

جذب
سیانید
گل قرمز
CTAB
طراحی آزمایش
ترمودینامیک

چکیده: در این تحقیق حذف یون‌های فرو سیانید و فری سیانید از پساب سنتزی با گل قرمز فعال شده مورد مطالعه قرار گرفت. از دو روش فعال‌سازی با استفاده از آمونیاک (ABA) و سورفکتانت کاتیونی ستیل تری متیل آمونیوم برماید (ABC) استفاده شد. برای بررسی فرایند جذب یون‌های سیانید و پارامترهای مؤثر در آن، ۴۴ آزمایش با هفت عامل متغیر با به‌کارگیری نرم‌افزار DX۸ و بر اساس روش طراحی آزمایش سطح- پاسخ طراحی و انجام شد. نتایج تحلیل آزمایش‌ها نشان داد که شرایط بهینه فرایند برای دست‌یابی به بیشترین ظرفیت جذب با جاذب ABC در شرایط pH محلول ۷/۱، با غلظت اولیه ppm126، مقدار جاذب ۵۷/۰ گرم، زمان ۹۶/۷۸ دقیقه، سرعت هم‌زدن rpm120 و قدرت یونی ۲۴/۰ مولار است. در حالت بهینه ظرفیت جذب معادل ۱۹/۵ میلی‌گرم بر گرم و درصد جذب معادل ۹۹/۳٪ به دست آمد. نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از گل فعال شده ABC در حذف یون‌های سیانید از محلول کار آیی بالاتری دارد. مطالعات ترمودینامیکی در شرایط بهینه انجام شد. نتایج نشان داد که مقدار منفی پارامترهای $\Delta^{\circ}G$ در دماهای مختلف نشان‌دهنده خود به خودی بودن فرآیند جذب کمپلکس سیانیدی بر جاذب‌های ABA و ABC است. به طوری که با افزایش دما فرآیند خود به خودی جذب افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

سیانور در صنایع مختلف از جمله تولید مواد شیمیایی آلی (آکریلیک، نایلون، آبکاری، فرآوری فلزات، سخت‌گردانی استیل، روکش فلزات، سموم کشاورزی، عکاسی، داروسازی و تولید لاستیک)، صنایع معدنی (استخراج طلا و نقره)، تهیه کک و زغال سنگ کاربرد دارد [۷-]. پساب‌های این صنایع حاوی غلظت‌های مختلفی از سیانید آزاد و ترکیبات فلزی سیانید هستند که قبل از ورود به محیط زیست باید تا محدوده مجاز زیست‌محیطی حذف شوند [۸]. برای تولید سیانور، ابتدا گاز هیدروژن سیانید تولید شده و سپس به ترکیبات مایع و جامد سیانور تبدیل و در صنایع مختلف استفاده می‌شود. سیانور ماده‌ای سمی برای انسان و سایر موجودات زنده است. با ورود به خون انسان موجب تشکیل کمپلکس پایدار با آنزیم موجود در آن شده و در عملکرد تنفسی اختلال و در نهایت موجب مرگ می‌شود. ماهیان و دیگر آبزیان نسبت به سیانور حساس‌تر از سایر موجودات زنده هستند [۹]. حداکثر غلظت مجاز سیانید در آب ۰/۰۷ میلی‌گرم در لیتر توسط سازمان جهانی بهداشت تعیین شده است [۱۰].

روش‌های مختلفی از جمله اکسیداسیون شیمیایی-کلرزی در

محیط قلیایی، اکسیداسیون در حضور کاتالیزست، ازون زنی، پراکسید هیدروژن، پراکسی سولفات، اسمز معکوس، روش‌های بیولوژیکی، جذب سطحی با استفاده از کربن فعال و سایر جاذب‌های طبیعی برای حذف سیانید از پساب‌ها استفاده شده است [۱]. روش‌های شیمیایی و فیزیکی، گران و نیازمند تجهیزات خاص هستند و غالباً از لحاظ زیست‌محیطی مشکل‌ساز هستند. در سال‌های اخیر از مواد معدنی مختلف سازگار با محیط زیست از جمله پوسته تخم مرغ، پوسته پسته و جلبک سبز برای حذف سیانید از پساب‌های صنعتی به دلیل مزایای آن‌ها از جمله منابع فراوان، هزینه کم، استفاده آسان و سازگار با محیط زیست و اهمیت اقتصادی استفاده شده است [۱۱-۱۳ و ۱۷].

گل قرمز ماده جامد باقیمانده انحلال اکسید آلومینا توسط محلول سود است که با فیلتر کردن جدا می‌شود [۱۴]. با تولید یک تن آلومینا معمولاً یک یا دو تن گل قرمز خشک حاصل می‌شود. مقدار گل قرمز تولیدی بستگی به میزان آلومینای موجود در ترکیب بوکسیت و شرایط فرآیند کانه‌آرایی آن دارد. گل قرمز ترکیبی ریزدانه شامل اکسیدهای Ti، Si، Fe و Al و هیدروکسیدها و کانی‌های باقیمانده از بوکسیت مانند هماتیت (Fe_2O_3)، ژئوتیت ($a-FeOOH$)، بوهمیت ($\gamma-AlOOH$)، تیتان (TiO_2)، کوارتز (SiO_2)، سودالیت ($Na_4Al_3Si_3O_{12}Cl$) با حضور اندکی کلسیت ($CaCO_3$) و ژیبسیت ($AlOH_3$) است که قابلیت جذب یون‌ها

DX8 و بر اساس روش سطح-پاسخ، ۴۴ آزمایش طراحی شد. pH، مقدار جاذب، غلظت ماده جذب شونده، زمان، دور همزن، قدرت یونی و نوع جاذب به عنوان پارامترهای متغیر و میزان ظرفیت جذب و درصد جذب به عنوان پاسخ در نظر گرفته شدند. برای تعیین تأثیرات اصلی برهم‌کنش‌ها سطح اطمینان ۹۵٪ در نظر گرفته شد. سپس مطالعات ترمودینامیکی در شرایط بهینه به دست آمده از طراحی آزمایش انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

در این مطالعه از گل قرمز کارخانه آلومینای جاجرم به عنوان جاذب یون‌های فری سیانید و فرو سیانید استفاده شد. شناسایی عناصر و اکسیدهای تشکیل دهنده گل قرمز (جدول ۱) با استفاده از فلورسانس اشعه ایکس (XRF) و شناسایی گونه‌های کانی شناسی آن (جدول ۲) با استفاده از پراش اشعه ایکس (XRD) انجام شد. نتایج نشان داد گل قرمز جاجرم به طور عمده شامل اکسیدهای آلومینیوم، کلسیم، آهن، سیلیم و تیتانیم است و میزان Fe_2O_3 آن ۲۳/۴ درصد است. نتایج آنالیز XRD نشان داد که گل قرمز شامل فازهای شامل فازهای هماتیت، کلسیت، آاناتاز، کائولینیت است. ستیل تری متیل آمونیوم برماید (CTAB) به عنوان سورفکتانت کاتیونی، پتاسیم فری سیانید ($K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$)، پتاسیم فرو سیانید ($K_3Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$) و آمونیاک خریداری شده از مرک در آزمایش‌ها استفاده شد. از KCl برای تنظیم قدرت یونی محلول و HCl و NaOH خریداری شده از مرک برای تنظیم pH استفاده شد. درصد یون‌های سیانید در محلول به وسیله اسپکتروفتومتری UV (مدل HITACHI U-2000) تعیین شد [۲۰-۲۲].

از پساب را دارد [۱۵]. کاربرد گل قرمز به عنوان جاذب به کانی‌های اصلی تشکیل دهنده آن بستگی دارد. در سال‌های اخیر بیشترین استفاده از گل قرمز در تصفیه آب‌ها به عنوان جاذب آنیون‌ها، کاتیون‌ها، مواد ارگانیکی، باکتری‌ها، ویروس‌ها و نیز به عنوان کاتالیزور بوده است که با توجه به فراوانی گل قرمز و نیز وجود اکسیدهای فلزی مناسب در آن برای جذب مناسب است. هدف اصلی این مطالعه استفاده از گل قرمز به عنوان یک جاذب مؤثر و ارزان قیمت در جذب ترکیبات سیانیدی است [۱۶].

به منظور بهبود خاصیت جذب گل قرمز، روش‌های فعال‌سازی مختلفی به طور موفقیت‌آمیزی استفاده شده است. پرادهن و همکاران (۱۹۹۹) از روش فعال‌سازی انحلال اسیدی ساده و سپس رسوب آمونیاک برای حذف کروم از محلول آبی به وسیله گل قرمز استفاده کردند [۱۷]. آلتندگان و همکاران (۲۰۰۲) از روش اسیدی برای افزایش ظرفیت جذب آرسنیک بر روی گل قرمز استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که ظرفیت جذب گل قرمز با فعال‌سازی اسیدی افزایش می‌یابد [۱۸]. تور و سنگلاگو (۲۰۰۶) هم‌چنین به طور موفقیت‌آمیزی گل قرمز فعال شده اسیدی را برای حذف رنگدانه کنگو از محلول آبی بررسی کردند [۱۹]. کائو و همکاران (۲۰۱۶) از سورفکتانت کاتیونی ستیل تری متیل آمونیوم برماید (CTAB) برای بهبود واکنش نانو ذرات اکسید آهن برای حذف فسفات استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که کارایی حذف فسفات با استفاده از CTAB افزایش می‌یابد [۲۰].

در این مطالعه، از گل قرمز فعال شده با آمونیاک (ABA^1) و CTAB (ABC^2) به عنوان جاذب برای حذف یون‌های فری سیانید و فرو سیانید استفاده شد. به منظور بررسی عوامل مؤثر بر فرایند با استفاده از نرم‌افزار

جدول ۱. آنالیز XRF نمونه گل قرمز

Table 1: XRF analysis of red mud samples

LOI	SO ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	CaO	MnO	TiO ₂	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	اکسید اصلی
۹/۵۵	۰/۴۶	۲۳/۴	۰/۱۰۸	۱۹/۹	۰/۰۶	۷/۳	۰/۳۵	۱/۸۲	۳/۱۴	۱۰/۳	۱۲/۲	گل قرمز %

جدول ۲. آنالیز XRD نمونه‌های گل قرمز

Table 2: XRD analysis of red mud samples

فازهای اصلی	فاز فرعی	فازهای کمیاب
کلسیت، هماتیت، آاناتاز	کائولینیت، پروسکیت، کانکرنیت	رتیل، زیپسیت

برای تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از آزمایش‌ها از نرم‌افزار اکسل استفاده شد. مقدار ظرفیت جذب (q) و درصد جذب (R) به ترتیب از معادله‌های ۱ و ۲ محاسبه می‌شود.

$$R = \frac{(c_0 - c_e)}{c_0} \times 100 \quad (2)$$

که در آن ، ، و به ترتیب غلظت اولیه سیانید، غلظت نهایی سیانید، حجم محلول و مقدار جاذب است.

$$q_e = \frac{(c_0 - c_e)V}{M} \quad (1)$$

۳- تهیه جاذب

استفاده شد. در این طراحی، متغیرها مطابق جدول ۳ در پنج سطح بررسی شدند که براساس آن تعداد ۴۴ آزمایش که ۵ آزمایش آن تکرار در سطوح مرکزی بودند طراحی شد.

برای بررسی اثر پارامترها و تأثیر متقابل آن‌ها بر یکدیگر از آنالیز واریانس (ANOVA) استفاده شد و نتایج در جدول ۴ ارائه شده است. پارامتر F معیاری از انحراف داده‌ها از مقدار میانگین است. به طور کلی برای مدلی که نتیجه آزمایش‌ها را با موفقیت پیش بینی می‌کند، مقدار F به طور معمول بسیار بالاست و مقدار Prob کمتر از ۰/۰۰۵ نیز به معنی معنادار بودن مدل است. F برای مدل‌های ظرفیت جذب و درصد جذب به ترتیب برابر با ۱۳/۶۶ و ۸/۱۵ بوده که نشان دهنده معنی دار بودن مدل‌ها است. در مدل ظرفیت جذب پارامترهای خطی B، C، E، G و F، پارامترهای درجه دو B² و D² و پارامترهای اندرکنش AB، BC، EF، EG، EF، BF، BG، CD، CE، DG، EF پارامترهای شاخص مدل هستند. هم‌چنین، پارامتر R² مدل برابر با ۰/۹۱۸۶ است که نشان دهنده دقت مدل است. هر چه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد ارتباط بهتری بین نتیجه‌های آزمایشگاهی و محاسبه شده توسط مدل وجود دارد. در مدل درصد جذب پارامترهای خطی D و G و پارامترهای اندرکنش AC، AG، BF، BG، CD، CG، EG پارامترهای شاخص مدل هستند. پارامتر R² مدل برابر با ۰/۸۰۲۹ است که نشان دهنده دقت مدل است. در شکل ۱ رابطه بین مقادیر پیش‌بینی شده با مدل آماری و مقادیر محاسبه شده آزمایشگاهی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، رابطه خوبی بین نتیجه‌های پیش‌بینی شده و نتیجه‌های آزمایشگاهی وجود دارد.

جدول ۳. سطوح پارامترهای ورودی برای طراحی آزمایش

Table 3: Levels of input parameters for testing design

سطح پایین	سطح بالا	پارامتر
۴	۸	pH (A)
۰/۵	۵	مقدار جاذب (B)
۵۰	۲۰۰	غلظت ماده جذب شونده (C)
۱۰	۱۲۰	زمان (D)
۱۰۰	۱۸۰	دور همزن (E)
۰/۰۵	۱	قدرت یونی (F)
فعال شده	اصلاح شده	نوع جاذب (G)

گل قرمز pH بالایی در حدود ۱۱-۱۲ دارد، با شستشو توسط آب دریا می‌توان pH گل قرمز را بدون نیاز به مواد شیمیایی کاهش داد. پس از شستشوی گل قرمز با آب دریا، pH و غلظت فلزات گل قرمز به واسطه ترسیب منگنز، کلسیم و آلومینیوم به شکل هیدروکسیدها، کربنات‌ها و هیدروکربنات‌ها کاهش یافت (گل قرمز جدید تشکیل شده با کسول (B) نامیده می‌شود) [۲۳-۲۵]. خصوصیات جذب گل قرمز به علت واکنش مواد جذب شونده با گروه‌های هیدروکسیلی است که با فلزات در گل قرمز پیوند دارند. با شستشو گل قرمز توسط آب دریا و تشکیل این ترکیبات هیدروکسیلی، جذب آنیون‌ها بهتر صورت می‌گیرد [۲۶ و ۲۷]. برای فعال سازی، ابتدا گل قرمز در محلول یک سوم وزنی آب دریا به گل قرمز، مخلوط و به مدت یک ساعت برای کاهش pH به مقدار ۸-۸/۵ هم زده شد [۲۷]. پس از خشک کردن نمونه به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۰ درجه، نمونه خرد و از سرند ۱۴۹ میکرون عبور داده شد. سپس نمونه با استفاده از درووش فعال سازی ترسیب با آمونیاک بعد از اسید شویی و استفاده از سورفکتانت CTAB مورد بررسی قرار گرفت. در روش فعال سازی به روش ترسیب با آمونیاک بعد از اسید شویی، ۵ گرم نمونه با ۱۰۰ میلی لیتر از محلول اسیدکلریدریک ۰/۵ مولار به مدت ۳۰ دقیقه رفلکس شد [۲۸]. سپس آمونیاک برای ترسیب و دستیابی به pH ۸-۸/۵ اضافه شد [۲۹]. مجدداً پس از خشک کردن نمونه به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۰ درجه، نمونه خرد و از سرند ۱۴۹ میکرون عبور داده شد. در روش فعال سازی با سورفکتانت CTAB، ابتدا مقدار مناسب CTAB در ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر حل شد. سپس ۲۰ گرم نمونه با محلول ۱٪ CTAB به مدت ۲ ساعت مخلوط شد. بعد از فیلتر کردن محلول، فاز جامد باقیمانده برای حذف تأثیر منفی یون‌های -Br، ۳ بار با آب مقطر شستشو و سپس خشک شد. از AgNO₃ به عنوان شناساگر برای شناسایی یون‌های -Br استفاده شد [۲۰].

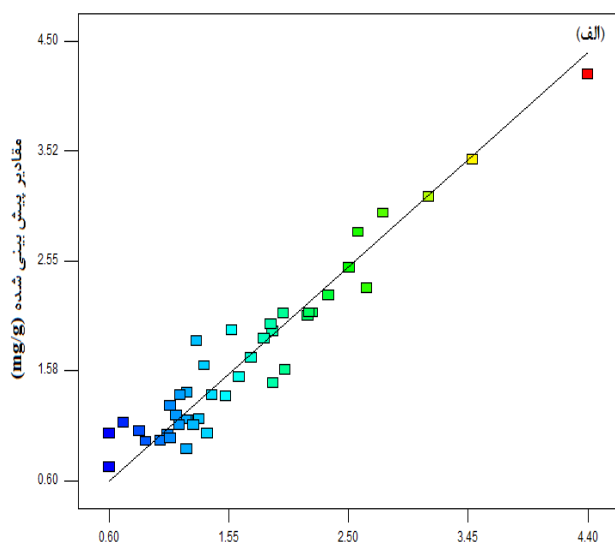
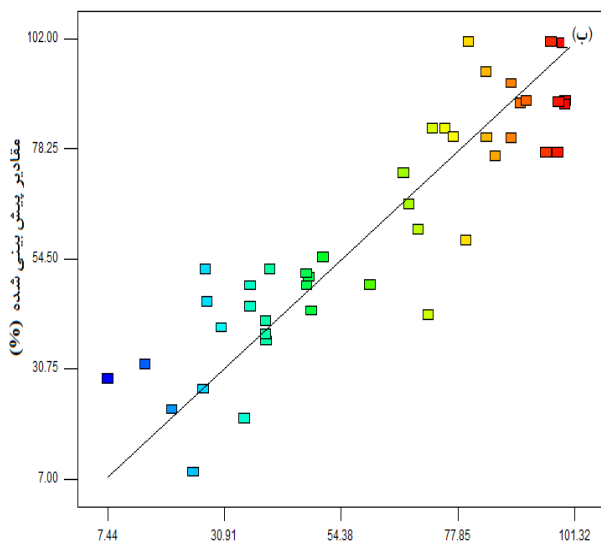
۴- نتایج و بحث

روش پاسخ سطح (RMS) در نرم افزار DX۸ یک ابزار قدرتمند برای مدل سازی آماری چند متغیره غیرخطی با طراحی کمترین تعداد آزمایش‌های تجربی است. در حال حاضر RMS به طور گسترده برای بهینه سازی متغیرهای فرآیند جذب استفاده می‌شود. در این مطالعه، برای تعیین پارامترهای مهم تأثیرگذار بر فرآیند، تخمین شرایط بهینه و یافتن رابطه بین متغیرهای مؤثر (غلظت اولیه ماده جذب شونده، زمان، مقدار جاذب، قدرت یونی، دور همزن و نوع جاذب) بر حداکثر ظرفیت جذب و درصد جذب فری سیانید و فرو سیانید از طراحی آزمایش با روش سطح-پاسخ بر مبنای D-Optimal با استفاده از نرم افزار DX۸

جدول ۴. آنالیز واریانس و بررسی آماری مدل‌های الف) ظرفیت جذب و ب) درصد جذب یون‌های فری سیانید و فروسیانید.

Table 4: Analysis of variance and statistical analysis of models a) Absorption capacity and b) Percentage of adsorption of ferricyanides and ferrocyanides

(ب)					(الف)						
p-value	مقدار F	میانگین	درجه	مجموع	متغیر	p-value	مقدار F	میانگین	درجه	مجموع	متغیر
Prob >F		مربعیات	آزادی	مربعیات		Prob >F		مربعیات	آزادی	مربعیات	
		۱۰۹۴/۲۸	۱	۱۰۹۴/۲۸	بلوک			۱/۴۰	۱	۱/۴۰	بلوک
<۰/۰۰۰۱	۸/۱۵	۱۸۳۷/۶۰	۱۴	۲۵۷۲۶/۴۰	مدل	<۰/۰۰۰۱	۱۳/۶۶	۱/۲۲	۱۹	۲۳/۱۳	مدل
۰/۳۴۴۰	۰/۹۳	۲۰۸/۹۴	۱	۲۰۸/۹۴	A	۰/۳۵۲۶	۰/۹۰	۰/۰۸۰	۱	۰/۰۸۰	A
۰/۲۲۴۹	۱/۵۴	۳۴۷/۴۰	۱	۳۴۷/۴۰	B	<۰/۰۰۰۱	۱۴۲/۰۳	۱۲/۶۶	۱	۱۲/۶۶	B
۰/۱۳۱۹	۲/۴۱	۵۴۳/۳۲	۱	۵۴۳/۳۲	C	<۰/۰۰۰۱	۳۴/۳۵	۳/۰۶	۱	۳/۰۶	C
۰/۰۲۳۰	۵/۷۹	۱۳۰۴/۹۲	۱	۱۳۰۴/۹۲	D	۰/۰۲۸۵	۵/۴۶	۰/۴۹	۱	۰/۴۹	D
۰/۰۶۳۳	۳/۷۴	۸۴۳/۴۶	۱	۸۴۳/۴۶	E	<۰/۰۰۰۱	۲۴/۰۷	۲/۱۵	۱	۲/۱۵	E
۰/۰۶۳۶	۳/۷۳	۸۴۱/۵۸	۱	۸۴۱/۵۸	F	<۰/۰۰۰۱	۴۴/۳۱	۳/۹۵	۱	۳/۹۵	F
<۰/۰۰۰۱	۴۵/۹۷	۱۹۳۶۸/۰۸	۱	۱۹۳۶۸/۰۸	G	<۰/۰۰۰۱	۹۲/۳۶	۸/۲۳	۱	۸/۲۳	G
۰/۰۱۵۳	۶/۶۷	۱۵۰۴/۷۲	۱	۱۵۰۴/۷۲	AC	۰/۰۰۴۷	۹/۷۸	۰/۸۷	۱	۰/۸۷	AB
۰/۰۴۱۱	۴/۵۹	۱۰۳۴/۶۰	۱	۱۰۳۴/۶۰	AG	<۰/۰۰۰۱	۵۲/۵۶	۴/۶۹	۱	۴/۶۹	BC
۰/۰۳۵۱	۴/۹۱	۱۱۰۶/۷۰	۱	۱۱۰۶/۷۰	BF	<۰/۰۰۰۱	۸۲/۰۷	۷/۳۲	۱	۷/۳۲	BE
<۰/۰۰۰۱	۲۳/۳۰	۵۲۵۴/۶۶	۱	۵۲۵۴/۶۶	BG	۰/۰۱۲۵	۷/۳۴	۰/۶۵	۱	۰/۶۵	BF
۰/۰۱۰۰	۷/۶۴	۱۷۲۳/۴۵	۱	۱۷۲۳/۴۵	CD	<۰/۰۰۰۱	۲۴/۲۱	۲/۱۶	۱	۲/۱۶	BG
۰/۰۰۰۳	۱۶/۵۷	۳۷۳۷/۵۱	۱	۳۷۳۷/۵۱	CG	<۰/۰۰۰۱	۲۶/۸۲	۲/۳۹	۱	۲/۳۹	CD
۰/۰۰۰۷	۱۴/۵۲	۳۲۷۵/۴۹	۱	۳۲۷۵/۴۹	EG	<۰/۰۰۰۱	۷۷/۰۳	۶/۸۷	۱	۶/۸۷	CE
		۲۲۵/۵۵	۲۸	۶۳۱۵/۲۸	باقیمانده	۰/۰۰۰۳	۱۸/۶۳	۱/۶۶	۱	۱/۶۶	DG
					Lack of Fit	۰/۰۰۳۶	۱۰/۵۲	۰/۹۴	۱	۰/۹۴	EF
۰/۰۵۱۱	۴/۴۹	۲۶۱/۸۹	۲۳	۶۰۲۳/۴۶	خطا	<۰/۰۰۰۱	۳۲/۲۰	۲/۸۷	۱	۲/۸۷	EG
		۵۸/۳۶	۵	۲۹۱/۸۲	Cor Total	۰/۰۰۱۰	۱۴/۱۷	۱/۲۶	۱	۱/۲۶	B۲
			۴۳	۳۳۱۳۵/۹۶		۰/۰۳۰۱	۵,۳۵	۰/۴۸	۱	۰/۴۸	D۲
								۰/۰۸۹	۲۳	۲/۰۵	باقیمانده
						۰/۳۸۱۲	۱/۳۹	۰/۰۹۵	۱۸	۱/۷۱	Lack of Fit
								۰/۰۶۸	۵	۰/۳۴	خطا
									۴۳	۲۶/۵۹	Cor Total



شکل ۱. رابطه بین مقادیر پیش‌بینی شده با مدل آماری و مقادیر آزمایشگاهی.

Figure 1: Relationship between predicted values with statistical model and laboratory values.

بر جاذب‌های فعال شده و اصلاح شده، مقدار جاذب بیشترین تأثیر بر ظرفیت جذب را داشته و پس از آن به ترتیب غلظت محلول آزمایش بر جاذب فعال شده و دور همزن بر جاذب اصلاح شده مهم است. با توجه به شکل ۲ و جدول ۳، قدرت یونی بر جذب کمپلکس‌های سیانیدی مؤثر است. با افزایش قدرت یونی، جذب کاهش می‌یابد که نشان دهنده بار مثبت سطحی جاذب است که در مورد جاذب ABC کاملاً مطابقت دارد.

پارامترهای مدت زمان تماس و pH تأثیر کمتری نسبت به سایر پارامترها داشته است. این نتایج مؤید نتایج آنالیز واریانس است؛ به طوری که در جدول ۴ مقدار زیاد پارامترهای F-value و مقدار کم p-value این سه پارامتر (غلظت اولیه، مقدار جاذب، دور همزن) نشان دهنده اهمیت و تأثیر آن‌ها بر فرآیند جذب کمپلکس‌های سیانیدی بر جاذب‌های ABA و ABC است. تأثیر مثبت پارامترهای غلظت اولیه و اثر منفی مقدار جاذب بر جذب به وسیله جاذب‌های ABA و ABC در شکل ۳ نشان داده شده است. درصد جذب نسبت به تمامی پارامترها حساس است.

مدل‌های پیشنهادی نرم افزار برای جاذب‌های ABA (معادلات ۱ و ۲) و ABC (معادلات ۳ و ۴) به صورت زیر به دست آمد:

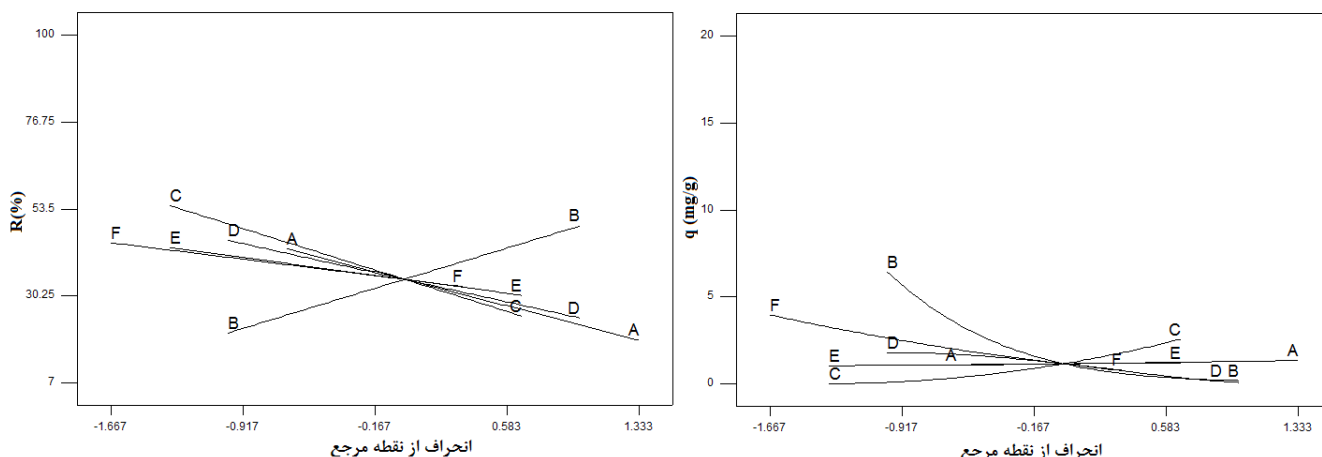
$$\begin{aligned} \text{Sqrt}(q) = & -0.05 + 0.21 A + 1.90 B - 0.03 C + 0.02 D - 0.01 E + 0.84 F \\ & - 0.07 AB - 0.004 BC - 0.01 BE + 0.19 BF - 0.0001 CD \\ & + 0.0004 CE - 0.02 EF + 0.08 B^2 - 9.9 D^2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} R = & +39.18 + 2.50 A + 13.08 B + 0.26 C + 0.16 D - 0.16 E + 9.57 F - 0.06 AC \\ & - 7.97 BF - 0.002 CD \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Sqrt}(q) = & -2.15 + 0.21 A + 1.55 B - 0.03 D + 0.02 E + 0.84 F - 0.07 AB \\ & - 0.004 BC - 0.01 BE + 0.19 BF - 0.0001 CD + 0.0004 CE \\ & - 0.02 EF + 0.08 B^2 - 8.98 D^2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} R = & -60.05 + 8.99 A - 1.03 B + 0.60 C + 0.16 D + 0.47 E + 9.56 F - 0.06 AC \\ & - 7.97 BF - 0.002 CD \end{aligned} \quad (4)$$

برای بررسی اثر تطبیقی و هم‌زمان پارامترهای مختلف بر مقدار جذب از نمودار اختلال^۱ استفاده شد. این نمودار که در شکل ۲ نشان داده شده است؛ چگونگی تغییرات مقدار ظرفیت و درصد جذب را با تغییر مقدار هر پارامتر و ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در جذب کمپلکس‌های سیانیدی



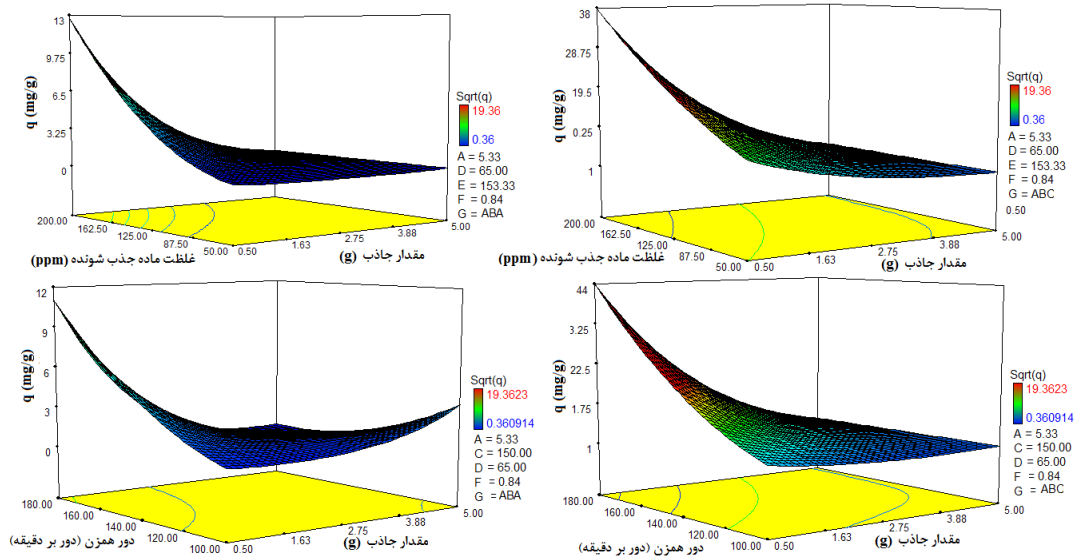
شکل ۲. نمودار اختلال تأثیر هم‌زمان پارامترها بر ظرفیت جذب و درصد جذب.

Figure 2: Coefficient of disruption of the effects of parameters on adsorption capacity and absorption percentage

جذب افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت همزن و کاهش مقدار جاذب ظرفیت جذب جاذب‌های ABA و ABC افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت همزن، تحرک ذرات جاذب افزایش یافته و موجب افزایش ظرفیت جذب هر ذره می‌شود.

نتایج نشان داد که بهترین ظرفیت جذب برای جاذب‌های ABA و ABC در بیشترین مقدار غلظت ماده جذب شونده (۲۰۰ ppm) و کمترین مقدار جاذب (۵/۰ گرم) به دست می‌آید (شکل ۳). افزایش مقدار جاذب موجب افزایش سطح بیشتر جاذب با گروه‌های فعال می‌شود و درصد

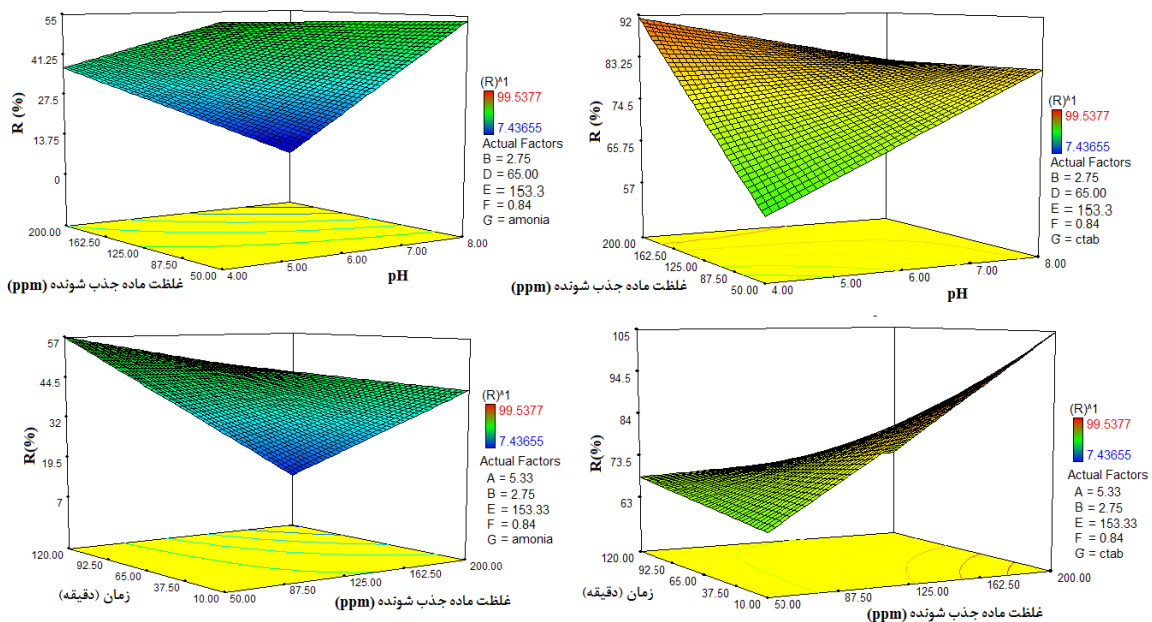
1 Perturbation plot



شکل ۳. اندرکنش‌های پارامترهای مؤثر بر ظرفیت جذب فری سیانید و فرو سیانید بر جاذب‌های ABA و ABC
 Figure 3: Interactions of parameters affecting for ferricyanide and ferrocyanide adsorption capacity on ABA and ABC adsorbents

در pH بالای pH_{zpc}، جذب آنیون‌های کمپلکس سیانیدی ناچیز بوده، زیرا سطح جاذب به دلیل پروتئین‌های گروه هیدروکسیل منفی است. درصد جذب کمپلکس سیانیدی در بالاترین غلظت آن بر جاذب ABA در pH بین ۵-۷ و بر جاذب ABC در pH ۵/۵ به مقدار ۵۴٪ و ۹۰٪ می‌رسد. اندرکنش زمان-غلظت ماده جذب‌شونده در شکل ۴ نشان می‌دهد با افزایش همزمان این دو پارامتر درصد جذب افزایش می‌یابد. با افزایش زمان، مدت زمان تماس جاذب و ماده جذب‌شونده افزایش یافته و زمان کافی برای جذب شیمیایی و نفوذ کمپلکس سیانیدی در بین خلل و فرج جاذب وجود دارد.

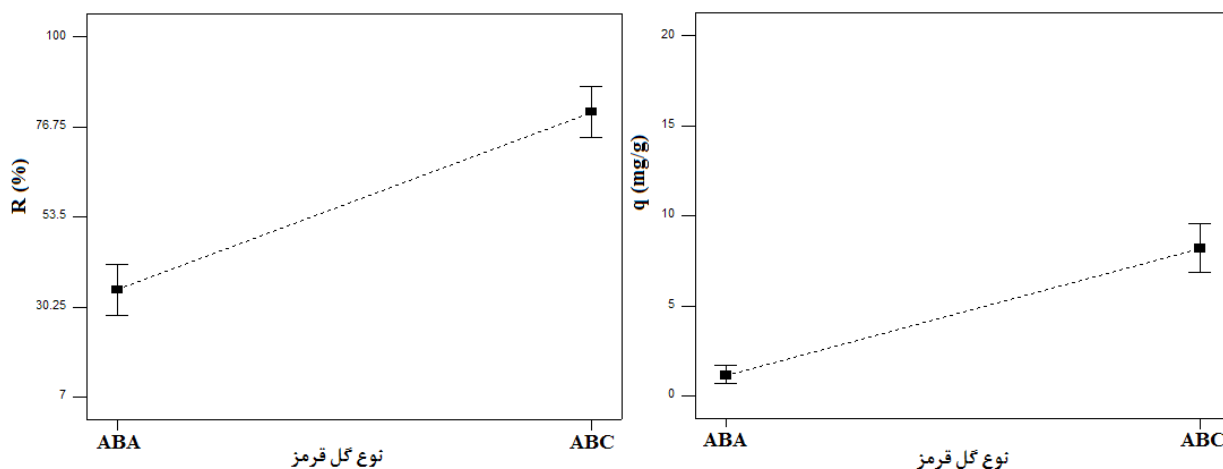
اندرکنش‌های pH-غلظت ماده جذب‌شونده برای جاذب‌های ABA و ABC در شکل ۴ نشان داده شده است. افزایش مقدار pH باعث کاهش درصد حذف کمپلکس سیانیدی می‌شود. تغییر pH موجب تغییر سطح بار سطح گل قرمز فعال شده می‌شود. نقطه بار صفر سطح (pH_{zpc}) مفهومی وابسته به پدیده‌های شیمی سطح جذب بوده و مقدار آن برای جاذب ABA، ۵-۷ و برای جاذب ABC، ۵/۵ است. هنگامی که pH محلول پایین‌تر از pH_{zpc} باشد، آنیون‌های کمپلکس سیانیدی به سطح با بار مثبت جاذب به واسطه پروتون دهی شدن گروه هیدروکسیل جذب می‌شوند؛ بنابراین



شکل ۴. اندرکنش‌های پارامترهای مؤثر بر درصد جذب فری سیانید و فرو سیانید بر جاذب‌های ABA و ABC
 Figure 4: Interactions of parameters affecting the percentage of for ferricyanide and ferrocyanide adsorption on ABA and ABC adsorbents

مثبت خود جذب مکان های منفی گل قرمز جذب شده و بنابراین لایه ای از سطح ساز بر سطح جاذب تشکیل می شود. با افزایش غلظت سطح ساز و رسیدن به نقطه CMC برهمکنش آب دوستی میان دنباله هیدروکربنی این مولکول ها سبب ایجاد لایه دومی از سطح ساز بر سطح جاذب می شود. لایه دوم به گونه ای است که زنجیره های هیدروکربنی آن درون لایه اول سطح ساز جذب شده بر سطح جاذب نفوذ کرده و قسمت های مثبت آن به سمت خارج قرار می گیرد [۳۰ و ۳۱]. یون های منفی سیانید به عنوان یون مخالف در کنار لایه دوم سطح ساز قرار می گیرد؛ بنابراین علاوه بر جذب فری سیانید به صورت فیزیکی بر روی خلل و فرج گل قرمز، این یون ها توسط اندرکنش نیروی کلومبیک توسط سطح ساز کاتیونی نیز جذب می شوند و موجب افزایش ظرفیت جذب و درصد جذب نسبت به جاذب ABA می شود.

تأثیر نوع جاذب بر میزان ظرفیت جذب و درصد جذب در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که جاذب ABC کارایی بالاتری در حذف یون های سیانیدی از پساب سنتزی دارد. افزودن آمونیاک بر روی سطح گل فعال شده موجب تشکیل کلرید آمونیوم (نشادر) می شود که ایجاد این کاتیون ها سطح مناسبی را برای جذب آنیون های سیانیدی فراهم می کند؛ اما در مقایسه با جاذب ABC نتایج نشان داد که گل فعال شده با سطح ساز CTAB کارایی بالاتری در حذف یون های سیانیدی دارد. سطح سازهای کاتیونی مولکول هایی با سر قطبی مثبت و زنجیره طولانی هیدروکربنی هستند. به علت وجود بار منفی در سطح گل قرمز، سطح سازهای کاتیونی از طریق تبادل یونی می توانند جذب سطح گل قرمز شوند، در غلظت های پایین تر از CMC مونومرهای سطح ساز از طریق سر



شکل ۵. تأثیر نوع جاذب های ABA و ABC بر الف) ظرفیت جذب و ب) درصد جذب فری سیانید و فروسیانید

Figure 5: Effect of adsorbent type ABA and ABC on a) (Absorption capacity and b)

Percentage of adsorption of ferricyanide and ferrocyanide

و قدرت یونی ۰/۲۴ مولار برای ظرفیت جذب ۱۹/۵ میلی گرم بر گرم و درصد جذب ۹۹/۳٪ پیشنهاد شد. مقدار مطلوبیت تابع برای جاذب ABC، ۱ است که تطابق کاملی با مقدار پیش بینی شده نشان می دهد. ظرفیت جذب و درصد جذب کمپلکس بر جاذب ABC مطابق شرایط بهینه ۱۸/۹ میلی گرم بر گرم و ۸۶٪ بوده که تطابق خوبی با مقدار پیشنهادی دارد.

۴-۱- اعتبارسنجی مدل ها

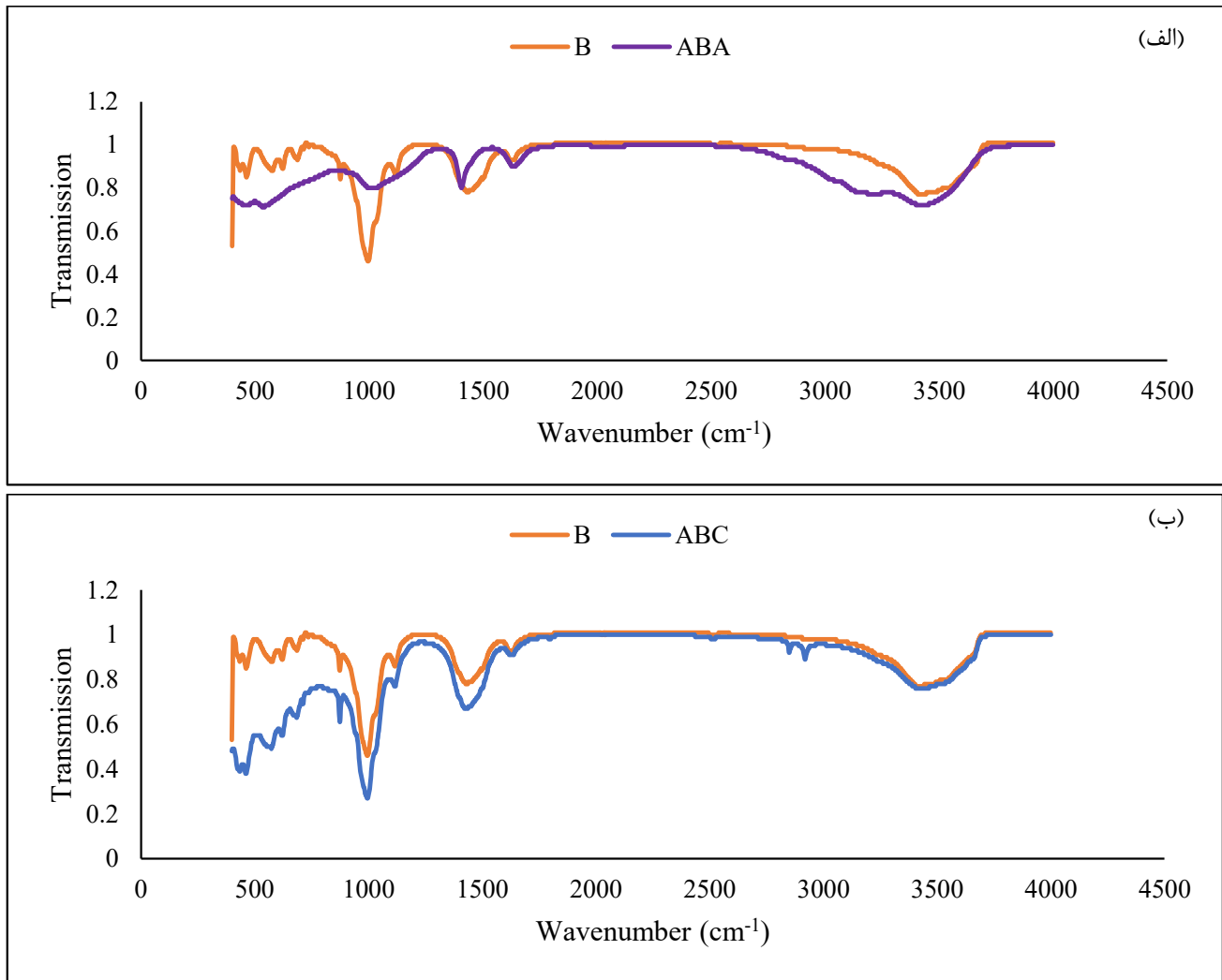
فرآیند مشخص نمودن شرایط بهینه از طریق روش بهینه سازی عددی نرم افزار انجام شد. شرایط بهینه جذب کمپلکس سیانیدی بر جاذب ABA شامل ۰/۵ گرم جاذب، با غلظت اولیه ۱۹۸ ppm، زمان تماس ۱۳ دقیقه، سرعت هم زدن ۱۴۴ rpm و قدرت یونی ۰/۰۶ برای ظرفیت جذب ۲۰/۵۷ میلی گرم بر گرم و درصد جذب ۳۳٪ پیشنهاد شد. مقدار مطلوبیت تابع برای جاذب ABA، ۱ است که تطابق کاملی با مقدار پیش بینی شده دارد. نتایج آزمایش در شرایط پیشنهادی بر نشان داد که ظرفیت جذب و درصد جذب کمپلکس سیانیدی بر جاذب ABA به ترتیب ۱۹/۱۸ میلی گرم بر گرم و ۴۰٪ است که تطابق نسبتاً خوبی با مقدار پیش بینی شده نشان می دهد. مقدار مطلوب پارامترهای پیشنهاد شده برای دست یابی به بیشترین ظرفیت جذب بر جاذب ABC در شرایط pH محلول ۷/۱، با غلظت اولیه ۱۲۶ ppm، مقدار جاذب ۰/۵۷ گرم، زمان ۹۶/۷۸ دقیقه، سرعت هم زدن ۱۲۰ rpm

۴-۲- مطالعه طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز گل فعال شده (FTIR)

نتایج بررسی های FTIR انجام شده روی باکسول (B) نشان می دهد که نوارهای در محدوده ۱۴۵۰-۴۷۰ cm⁻¹ مربوط به ارتعاش Fe-O است (شکل ۶). طیف FTIR باکسول در طول موج های ۵۹۰ و ۹۷۱۱ cm⁻¹ مربوط به گروه های Si-O-Si موجود در گل قرمز است. طیف پهن مشاهده شده در ناحیه ۲۸۰۰ تا ۱۳۷۰۰ cm⁻¹ مربوط به ارتعاش کششی گروه O-H است.

باشد که در گل اسید شویی شده توسط اسید کلریدریک شسته شده بود. در طول موج 3245 cm^{-1} باند جدیدی دیده می‌شود که مربوط به یون NH_4^+ موجود در کلرید آمونیوم است [۳۲]. در جاذب ABC باندهای جدیدی در ناحیه 2850 cm^{-1} - 1474 cm^{-1} مشاهده می‌شود که به ترتیب مربوط به ارتعاشات کششی متقارن و نامتقارن CH_2 و ارتعاشات خمشی مربوط به CH_3 است که نشان می‌دهد اصلاح سطح با CTAB با موفقیت انجام شده است [۲۰].

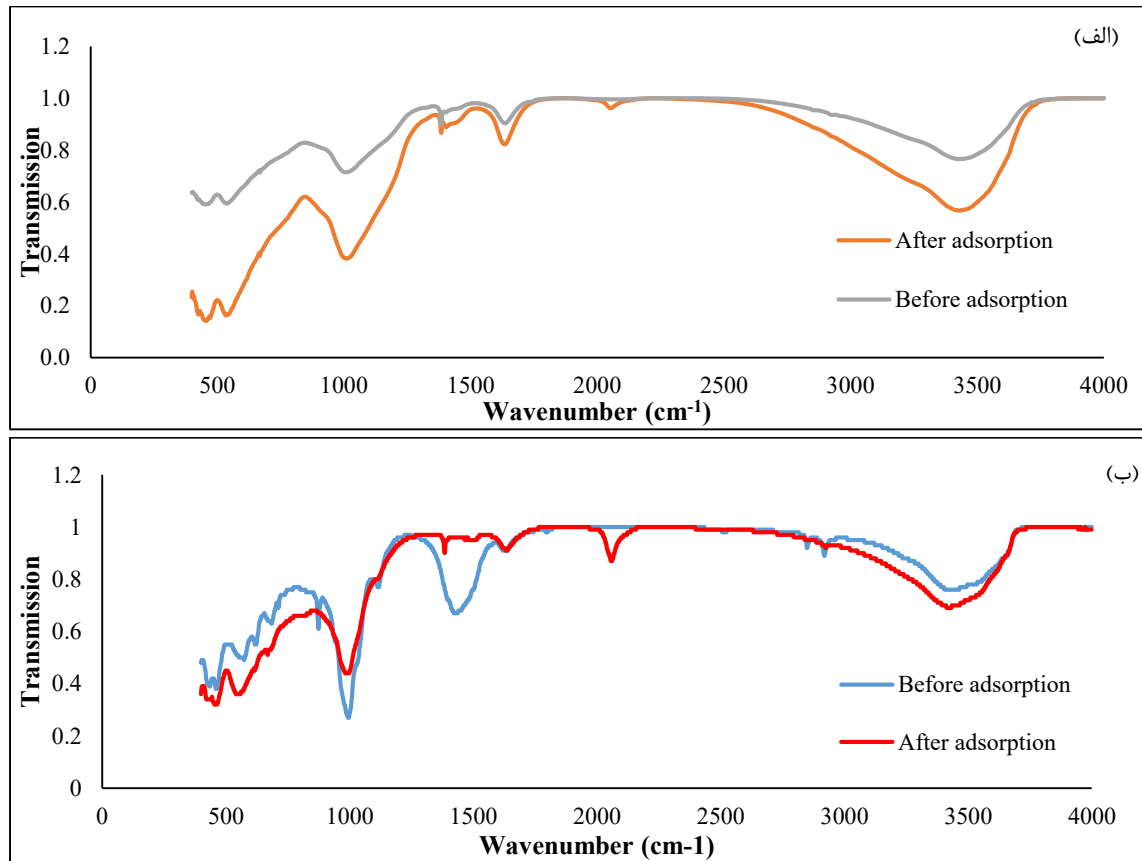
باندهای مشاهده شده در 536 و 1634 cm^{-1} نشان دهنده افزایش پیوند Fe-O در جاذب ABA است که می‌تواند به دلیل انحلال یون‌های آهن در آمونیاک و سپس به شکل رسوب در سطح جاذب باشد. باندهای جدید دیده شده در 1010 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی Al-O است که قسمتی از آن در اسید کلریدریک حل شده و سپس با استفاده از آمونیاک به صورت ژلیسیته ترسیب می‌کند. باند جدید در طول موج 1400 cm^{-1} می‌تواند به دلیل ترسیب کانکرنیت و سودالیت



شکل ۶. مقایسه FTIR جاذب‌های الف) ABA و ب) ABC قبل و بعد از فعال‌سازی سطح
 Figure 6: Comparison of adsorbent FTIR a) ABA and b) ABC before and after surface activation

مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده جذب فری سیانید است. پیک جذب فری سیانید بر سطح جاذب ABC بیشتر از جاذب ABA است که نشان‌دهنده جذب بهتر جاذب ABC است [۳۳].

طیف FTIR گل‌های فعال‌شده پس از جذب کمپلکس‌های سیانیدی در شکل ۷ نشان داده شده است. در مقایسه گروه‌های عاملی جاذب‌های ABC و ABA قبل و بعد از جذب کمپلکس سیانید، باند جدیدی در 2056 cm^{-1} پس از جذب فرو سیانید در شکل ۷



شکل ۷. مقایسه FTIR جاذب‌های الف (ABA) و ب (ABC) قبل و بعد جذب کمپلکس سیانید

Figure 7: Comparison of adsorbent FTIR a) ABA and b) ABC before and after absorption of cyanide complex

۵- بررسی عامل دما

برای بررسی ترمودینامیک جذب، مقادیر جذب کمپلکس سیانیدی در شرایط بهینه به دست آمده از طراحی آزمایش‌ها بررسی شد. آزمایش‌های ترمودینامیک با شرایط ۳ گرم جاذب ABA و ۰/۵ گرم جاذب ABC در دماهای ۲۹۸، ۳۰۳، ۳۲۳ و ۳۴۳ درجه کلوین به کمک انکوباتور همزن دار با سرعت ۱۸۰ rpm به مدت ۱۲۰ دقیقه و به کمک ۵/۵ pH انجام شد. از روابط وانت هوف برای تعیین مقادیر پارامترهای ترمودینامیکی استفاده شد. پارامترهای ترمودینامیکی جذب از جمله آنتالپی استاندارد ΔH° ، انرژی آزاد گیبس ΔG° و آنتروپی ΔS° از طریق روابط زیر محاسبه شد [۳۴ و ۳۵]:

$$\ln k_D = \frac{\Delta S_{ads}^0}{R} - \frac{\Delta H_{ads}^0}{RT} \quad (5)$$

$$\Delta G_{ads}^0 = \Delta H_{ads}^0 - T \Delta S_{ads}^0 \quad (6)$$

که در آن ضریب توزیع (T)، دما (K) و R ثابت جهانی گازها (۸/۳۱۴ J/mol K) است. با رسم نمودار برحسب $1/T$ ، و تعیین عرض

از مبدأ و شیب آن به ترتیب مقادیر و محاسبه می‌شود. نتایج محاسبات ترمودینامیکی در جدول ۵ ارائه شده است. مقدار منفی آنتالپی (ΔH°) نشان دهنده جذب گرمازای فری سیانید بر جاذب ABA است و توانایی جذب کمپلکس سیانیدی بر جاذب ABA در محیط اسیدی و خنثی با افزایش دما کاهش می‌یابد. مقدار مطلق پارامتر (ΔH°) در جاذب ABA در محیط اسیدی بیشتر از جاذب ABA در محیط خنثی است که نشان دهنده تأثیر منفی بیشتر دما بر آن است. مقدار مثبت آنتالپی (ΔH°) جاذب ABC نشان دهنده جذب گرماگیر فری سیانید بر آن است. توانایی جذب کمپلکس سیانیدی بر جاذب ABA با افزایش دما افزایش می‌یابد. جذب یون‌ها نیازمند یک فرآیند نفوذی است و افزایش دما یک عامل مطلوب برای انتقال یون‌ها به درون ذرات جاذب است. مقدار منفی پارامترهای ΔG° در دماهای مختلف گویای خود به خودی بودن فرآیند جذب کمپلکس سیانیدی بر جاذب‌های ABA و ABC است. به طوری که با افزایش دما، ΔG° منفی‌تر می‌شود. مثبت بودن آنتروپی ΔS° نشان دهنده غیر تجمعی بودن فرآیند جذب و زیاد شدن یون‌ها در طی فرآیند جذب است که می‌تواند ناشی از تغییراتی در سطح جاذب در حین فرآیند جذب باشد.

جدول ۵. پارامترهای ترمودینامیکی جذب یون‌های سیانید بر جاذب‌های ABA و ABC

Table 5: Thermodynamic parameters of adsorption of cyanide ions on ABA and ABC adsorbents

GΔ°					SΔ°	HΔ°	نوع جاذب
۳۳	۳۲۳	۳۱۳	۳۰۳	۲۹۸	۰/۱۴	-۱۲/۶۸	ABA (5/4=pH)
-۶۰/۳۴	-۵۸/۹۱	-۵۷/۴۸	-۵۶/۰۴	-۵۵/۳۳			
-۴۲/۲۶	-۴۱/۲۳	-۴۰/۱۹	-۳۹/۱۵	-۳۸/۶۳	۰/۱۰۳۷	-۷/۷۱	ABA (7=pH)
-۰/۵۰	-۰/۴۸	-۰/۴۷	-۰/۴۵۷	-۰/۴۵۰	۰/۰۰۱۵	۷/۰۷×۵-۱۰	ABC

allurgy, 78(1) (2005) 3-20.

[4] D. Kaušpėdienė, A. Gefenienė, R. Ragauskas, V. Pakštas, Comparative investigation of plain and silver impregnated activated carbons for the removal of cyanide from basic aqueous solutions in the batch process, Chemical Engineering Communications, 204(11) (2017) 1258-1269.

[5] H. Uppal, S.S. Tripathy, S. Chawla, B. Sharma, M. Dalai, S. Singh, S. Singh, N. Singh, Study of cyanide removal from contaminated water using zinc peroxide nanomaterial, Journal of Environmental Sciences, 55 (2017) 76-85.

[6] Y. Zhou, X. Fang, K. Wang, Y. Hu, K. Chen, J. Lu, Improving cyanide removal from coke plant wastewaters by optimizing the operation conditions of an ammonia still tower, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 39(5) (2017) 491-496.

[7] G. Moussavi, R. Khosravi, Removal of cyanide from wastewater by adsorption onto pistachio hull wastes: Parametric experiments, kinetics and equilibrium analysis, Journal of Hazardous Materials, 183(1) (2010) 724-730.

[8] D.A. Dzombak, R.S. Ghosh, G.M. Wong-Chong, Cyanide in water and soil: chemistry, risk, and management, CRC press, 2010.

[9] T. Mudder, M. Botz, Cyanide and society: a critical review, ejmp & ep (European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection), 4(1) (2004) 62-74.

[10] N. Kuyucak, A. Akcil, Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes, Minerals Engineering, 50 (2013) 13-29.

[11] N.S. Shifrin, B.D. Beck, T.D. Gauthier, S.D. Chapnick, G. Goodman, Chemistry, toxicology, and human health risk of cyanide compounds in soils at former manufactured gas plant sites, Regulatory Toxicology and Pharmacology, 23(2) (1996) 106-116.

[12] G. Asgari, A. Dayari, Experimental dataset on acid treated eggshell for removing cyanide ions from synthetic and industrial wastewaters, Data in brief, (2017).

[13] Q. Liu, G. Zhang, J. Ding, H. Zou, H. Shi, C. Huang, Evalu-

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه از گل قرمز برای حذف یون‌های فرو سیانید و فری سیانید از پساب سنتزی استفاده شد. خصوصیات جذب گل قرمز به علت واکنش مواد جذب‌شونده با گروه‌های هیدروکسیلی که با فلزات در گل قرمز پیوند دارند برای حذف یون‌های سیانید مناسب است. به‌منظور افزایش خاصیت جذب گل قرمز از روش‌های فعال‌سازی سطح با استفاده از آمونیاک و سورفکتانت کاتیونی CTAB استفاده شد. از روش طراحی آزمایش برای تعیین پارامترهای بهینه فرآیند استفاده شد. مقدار مطلوب پارامترهای پیشنهاد شده برای دست‌یابی به بیشترین ظرفیت جذب بر جاذب ABC در شرایط pH محلول ۷/۱، با غلظت اولیه ۱۲۶ ppm، مقدار جاذب ۰/۵۷ گرم، زمان ۹۶/۷۸ دقیقه، سرعت هم‌زدن ۱۲۰ rpm و قدرت یونی ۰/۲۴ مولار به دست آمد. شرایط بهینه جذب کمپلکس سیانیدی بر جاذب ABA شامل ۰/۵ گرم جاذب، با غلظت اولیه ۱۹۸ ppm، زمان تماس ۱۳ دقیقه، سرعت هم‌زدن ۱۴۴ rpm و قدرت یونی ۰/۰۶ به دست آمد. نتایج نشان داد که جاذب ABC عملکرد بهتری برای حذف یون‌های سیانید دارد. مطالعات FTIR نشان داد که پیک جذب فری سیانید بر سطح جاذب ABC بیشتر از جاذب ABA است که نشان‌دهنده جذب بهتر جاذب ABC است که نتایج به‌دست‌آمده از طراحی آزمایش را تأیید می‌کند. مطالعات ترمودینامیکی انجام شده در شرایط بهینه به‌دست‌آمده از طراحی آزمایش نشان داد که جذب کمپلکس سیانیدی بر جاذب‌های ABA و ABC فرآیندی خود به خودی است و با افزایش دما فرآیند جذب افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] C. Young, T. Jordan, Cyanide remediation: current and past technologies, in: Proceedings of the 10th Annual Conference on Hazardous Waste Research, Kansas State University: Manhattan, KS, 1995, pp. 104-129.
- [2] R.R. Dash, A. Gaur, C. Balomajumder, Cyanide in industrial wastewaters and its removal: a review on biotreatment, J Hazard Mater, 163(1) (2009) 1-11.
- [3] G.M. Ritcey, Tailings management in gold plants, Hydromet-

- [24] N. Menzies, I. Fulton, W. Morrell, Seawater neutralization of alkaline bauxite residue and implications for revegetation, *Journal of Environmental Quality*, 33(5) (2004) 1877-1884.
- [25] S.J. Palmer, R.L. Frost, Characterisation of bauxite and seawater neutralised bauxite residue using XRD and vibrational spectroscopic techniques, *Journal of materials science*, 44(1) (2009) 55-63.
- [26] Y. Cengeloglu, A. Tor, G. Arslan, M. Ersoz, S. Gezgin, Removal of boron from aqueous solution by using neutralized red mud, *Journal of hazardous materials*, 142(1) (2007) 412-417.
- [27] V. Grudić, S. Brašanac, V. Vukašinović-Pešić, N. Blagojević, Sorption of cadmium from water using neutralized red mud and activated neutralized red mud, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8(11) (2006) 933-943.
- [28] H. Genç-Fuhrman, J.C. Tjell, D. McConchie, Increasing the arsenate adsorption capacity of neutralized red mud (Bauxsol), *Journal of Colloid and Interface Science*, 271(2) (2004) 313-320.
- [29] H. Genç-Fuhrman, J.C. Tjell, D. McConchie, Adsorption of arsenic from water using activated neutralized red mud, *Environmental science & technology*, 38(8) (2004) 2428-2434.
- [30] Y.-Y. Luo, Z.-P. Du, Y.-H. Lu, B.-X. Liu, Adsorption of CTAB on Zeolite A Detected by Surfactant Ion-selective Electrode, *Tenside Surfactants Detergents*, 46(3) (2009) 175-178.
- [31] L.T. Eriksson, P.M. Claesson, J.C. Eriksson, V.V. Yaminsky, Equilibrium wetting studies of cationic surfactant adsorption on mica: 1. Mono-and bilayer adsorption of CTAB, *Journal of colloid and interface science*, 181(2) (1996) 476-489.
- [32] C. Paola, S. Margherita, G. Giovanni, D. Salvatore, Influence of the pH on the accumulation of phosphate by red mud, *J. of Hazardous Materials*, 182(4) (2010) 266-272.
- [33] J. Jamis, A. Drljaca, L. Spiccia, T.D. Smith, FTIR spectroscopic study of the adsorption of hydrogen cyanide by metal-oxide pillared clays, *Chemistry of materials*, 7(11) (1995) 2078-2085.
- [34] S. Naeem, U. Zafar, Adsorption studies of cyanide (CN)⁻ on alumina, *Pak. J. Anal. Environ. Chem*, 10 (2009) 83-87.
- [35] C. Huang, W. Cheng, Thermodynamic Parameters of Iron-Cyanide Adsorption onto γ -Al₂O₃, *Journal of colloid and interface science*, 188(2) (1997) 270-274.
- ation of the Removal of Potassium Cyanide and its Toxicity in Green Algae (*Chlorella vulgaris*), *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, (2017) 1-6.
- [14] A. Bhatnagar, V.J. Vilar, C.M. Botelho, R.A. Boaventura, A review of the use of red mud as adsorbent for the removal of toxic pollutants from water and wastewater, *Environmental technology*, 32(3) (2011) 231-249.
- [15] D.J. Cooling, Improving the sustainability of residue management practices-Alcoa World Alumina Australia, *Paste and Thickened Tailings: A Guide*, (2007) 3-16.
- [16] S. Wang, H. Ang, M. Tadé, Novel applications of red mud as coagulant, adsorbent and catalyst for environmentally benign processes, *Chemosphere*, 72(11) (2008) 1621-1635.
- [17] J. Pradhan, S.N. Das, R.S. Thakur, Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solution by using activated red mud, *Journal of Colloid and Interface Science*, 217(1) (1999) 137-141.
- [18] H.S. Altundoğan, F. Tümen, Removal of phosphates from aqueous solutions by using bauxite. I: Effect of pH on the adsorption of various phosphates, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 77(1) (2002) 77-85.
- [19] Y. Çengelöglu, E. Kır, M. Ersöz, Removal of fluoride from aqueous solution by using red mud, *Separation and Purification Technology*, 28(1) (2002) 81-86.
- [20] D. Cao, X. Jin, L. Gan, T. Wang, Z. Chen, Removal of phosphate using iron oxide nanoparticles synthesized by eucalyptus leaf extract in the presence of CTAB surfactant, *Chemosphere*, 159 (2016) 23-31.
- [21] H.-j. Hong, H. Kim, K. Baek, J.-W. Yang, Removal of arsenate, chromate and ferricyanide by cationic surfactant modified powdered activated carbon, *Desalination*, 223(1-3) (2008) 221-228.
- [22] A.R. Zimmerman, D.-H. Kang, M.-Y. Ahn, S. Hyun, M.K. Banks, Influence of a soil enzyme on iron-cyanide complex speciation and mineral adsorption, *Chemosphere*, 70(6) (2008) 1044-1051.
- [23] C. Hanahan, D. McConchie, J. Pohl, R. Creelman, M. Clark, C. Stocksiek, Chemistry of seawater neutralization of bauxite refinery residues (red mud), *Environmental Engineering Science*, 21(2) (2004) 125-138.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Please cite this article using:

N.Deihimi ,M.Irannajad ,B.Rezai, Optimum condition determination of adsorption capacity and adsorption percentage of cyanide ions using activated red mud ,*Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(2)(2019)377-387.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13750.5469