



بررسی تعادلی و سینتیکی جذب رنگزای C.I. Basic red 14 بر روی جاذب ارزان قیمت فلدسپار

حسین کتابی، لیلا میوه ای*

گروه مهندسی نساجی، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۴ آذر ۱۳۹۶
بازنگری: ۱۹ دی ۱۳۹۶
پذیرش: ۱۹ اسفند ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۸ فروردین ۱۳۹۷

کلمات کلیدی:

رنگبری
جذب سطحی
رنگزای کاتیونی
فلدسپار
ایزوترم و سینتیک جذب

چکیده: در این تحقیق امکان استفاده از جاذب فلدسپار که یک جاذب معدنی ارزان قیمت بر پایه سیلیکا است، برای حذف رنگزای کاتیونی C.I. Basic red 14 با نام تجاری (Brilliant red 4G) از محلول آبی بررسی شد. خصوصیات سطحی جاذب با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، پراش فلورسینس پرتو ایکس (XRF) و تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) بررسی شد. تاثیر عوامل مختلف از جمله مقدار ماده جاذب، مدت زمان تماس، غلظت اولیه رنگزا، pH اولیه و حضور الکترولیت بر فرآیند جذب مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان دادند که افزایش pH، زمان تماس و مقدار جاذب بر میزان رنگبری تاثیر مثبت دارد در حالی که افزایش غلظت محلول رنگزا سبب کاهش مقدار رنگبری می شود. همچنین افزودن الکترولیت میزان رنگبری را به مقدار بسیار کمی کاهش می دهد که چشمگیر نیست. فلدسپار در زمانی حدود یک ساعت با رنگزای C.I. Basic red 14 به تعادل می رسد راندمان حذف برابر ۹۶ درصد است. در نتیجه فلدسپار یک جاذب قوی و مناسب برای حذف مواد رنگزای کاتیونی از محلول های آبی است. ایزوترم حالت تعادل با مدل ایزوترم های جذب لانگمیر، فرندلش، تمکین، ردلیش پیترسون و دوینین رادشکوچ مطابقت داده شد و نتایج نشان دادند که رنگبری تطابق خوبی با ایزوترم فرندلش دارد. سینتیک جذب سطحی با استفاده از مدل های سینتیکی شبه مرتبه اول، شبه مرتبه دوم و نفوذ درون ذره ای بررسی شد و مشاهده گردید که فرآیند جذب بر روی فلدسپار از معادلات سینتیکی شبه مرتبه دوم تبعیت می کند، لذا فرآیند جذب سطحی بیشتر به صورت جذب شیمیایی است.

۱- مقدمه

به دلیل افزایش سریع جمعیت و توسعه اقتصادی و صنعتی کشورها از یک سو و کمبود منابع آبی از سوی دیگر مدیریت مصرف آب و تصفیه و بازیافت آن بیش از گذشته ضروری به نظر می رسد. همچنین تصفیه پساب به عنوان آب شیرین آلوده، به مراتب ارزانتر از شیرین سازی آب شور است. منابع آبی می توانند توسط انواع پساب های صنعتی، کشاورزی و خانگی آلوده شوند. بعضی از این پساب ها دارای مواد سمی و احتمالاً سرطانزا هستند نظیر پساب های نساجی که حاوی مواد رنگزا هستند [۱-۳]. مواد رنگزای نساجی معمولاً سنتزی و دارای ساختارهای پیچیده آروماتیک و مقاوم نسبت به تخریب زیستی هستند که از نظر ساختار شیمیایی به سه دسته آنیونی (نظیر رنگزاهای مستقیم، اسیدی، ری اکتیو، دیسپرس، خمی، گوگردی)، کاتیونی (رنگزاهای بازیک) و غیر یونی (رنگزاهای دیسپرس) تقسیم می شوند [۴-۶]. حضور حلقه های آروماتیک در ساختار بسیاری از این رنگزاهای سبب سمیت بیشتر آن ها می شود و آن ها را از لحاظ زیستی غیر قابل تجزیه می کند [۷]. افزایش روند آلوده سازی منابع آبی از یک سو و افزایش توجه دولت ها

به حفظ محیط زیست و کنترل های محیط زیستی از طرف دیگر سبب وضع قوانین سخت گیرانه برای حذف آلاینده ها از پساب ها شده است. برای تصفیه پساب ها از فرآیندهای مختلف شیمیایی، فیزیکی، شیمی-فیزیکی و زیستی استفاده می شود. برای تصفیه پساب های رنگی از روش های مختلف مانند اکسایش شیمیایی (فنتون، ازن دهی، تابش نور ماورا بنفش) [۸-۱۰]، فیلتراسیون و غشا [۱۱]، تجزیه میکروبی هوازی و بی هوازی [۱۲]، جذب سطحی [۱۳]، انعقاد و لخته سازی [۱۴]، تعویض یون [۱۵]، تجزیه آنزیمی [۱۶] استفاده می شود. از میان این روش ها جذب سطحی به سبب هزینه اولیه کم، انعطاف پذیری، طراحی آسان، سادگی عملیات و حساس نبودن به آلاینده های سمی نسبت به دیگر روش ها از برتری بیشتری برخوردار است [۱۳]. در جذب سطحی مولکول ماده آلاینده از فاز محلول به فاز جامد (جاذب) منتقل می شود. جاذب های مختلفی برای جذب سطحی به کار می روند. اخیراً حجم وسیعی از پژوهش های این حوزه بر روی جاذب های طبیعی، تجدید پذیر، دوستدار محیط زیست، قابل بازیافت و ارزان قیمت نظیر جاذب های آلی (باگاس نیشکر، پوست میوه، ضایعات تخم مرغ، سبوس برنج، تفاله زیتون، تفاله ذرت و جاذب های آلی دیگری) و

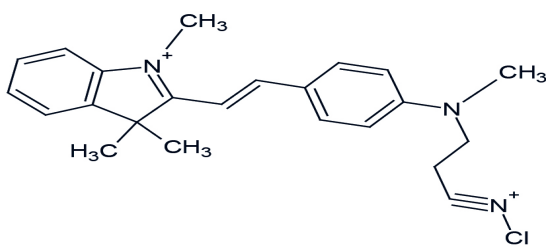
۲- آزمایش‌ها

۲-۱- مواد و وسایل

رنگزای کاتیونی C.I. Basic red 14 با درجه خلوص تجاری از شرکت الوان ثابت تهیه شد. مشخصات و ساختار شیمیایی رنگزا به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات رنگزای کاتیونی C.I. Basic red 14
Table 1. The characteristics of C.I. Basic red 14

وزن مولکولی (g/mol)	فرمول مولکولی	max (nm)	نام شیمیایی
۳۷۹.۹۳	$C_{23}H_{26}N_3Cl$	۵۱۴	C.I. Basic red 14



شکل ۱. ساختار شیمیایی رنگزای کاتیونی C.I. Basic red 14
Fig 1. The chemical structure of C.I. Basic red 14

فلدسپار از شرکت صنعتی-معدنی سبهران واقع در تاکستان استان قزوین تهیه شد. سایر مواد شیمیایی از شرکت مرک آلمان خریداری شدند. از دستگاه اسپکتروفوتومتر UV-Vis مدل Cintra 10، شرکت G.B.C. برای بررسی میزان رنگبری و از pH متر مدل Sana، شرکت مبین طب برای اندازه گیری pH استفاده شد. از دستگاه سانتریفیوژ مدل Ro-tanta 460 R، شرکت Hettich برای جداسازی ذرات جاذب پس از فرآیند رنگبری از پساب و از دستگاه همزن و آون ساخت شرکت memmert به ترتیب برای هم زدن ذرات جاذب در محلول در حین آزمایش و خشک کردن جاذب در آماده سازی جاذب استفاده شد. دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل XL30 شرکت Philips و دستگاه تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) شرکت Nicolet مدل Spectrum 56 به ترتیب برای ریخت شناسی سطح فلدسپار و شناسایی گروه های عاملی مورد استفاده قرار گرفتند. بررسی ساختار فلدسپار به وسیله دستگاه اندازه گیری پراش فلونورسنس پرتو ایکس (XRF) مدل PW1480 شرکت Philips انجام گرفت.

۲-۲- روش کار

ابتدا سنگ معدنی فلدسپار جهت حذف آلودگی‌ها شسته شد و به مدت ۱۲ ساعت در دمای $103^{\circ}C$ خشک گردید. تاثیر عوامل مختلف نظیر مقدار ماده جاذب، مدت زمان و غلظت اولیه ی ماده رنگزا، pH و حضور

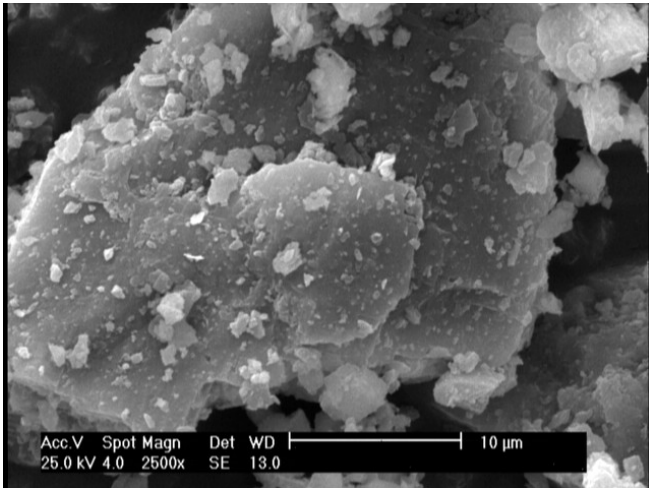
جاذب های معدنی (فلدسپار، کائولین، بنتونیت و جاذب های معدنی دیگری) انجام شده است [۱۷ و ۱۸].

فلدسپار اصلی ترین کانی تشکیل دهنده پوسته زمین که ترکیبی از اکسیدهای فلزی و غیر فلزی است در صنایع مختلف نظیر جواهرسازی، شیشه سازی، سرامیک، لوازم لوله کشی، کاشی، سفالگری، چینی و تهیه لعاب به کار می رود. فلدسپار را بر اساس میزان و نوع عناصر موجود در آن میتوان به گونه های مختلف تقسیم کرد که تمامی این گونه ها دارای عناصر آلومینیوم، اکسیژن و سیلیس هستند ولی عناصر دیگری همچون پتاسیم، کلسیم و سدیم نیز می توانند در بعضی گونه ها باشند. فلدسپارها دارای ساختار سه بعدی (شبکه چهار وجهی) سیلیکاتی به فرمول مولکولی WZ_4O_8 هستند که در آن W کاتیون های دوظرفیتی نظیر کلسیم، باریم و استرنسیوم و یا کاتیون های تک ظرفیتی نظیر سدیم، پتاسیم و روبیدیوم، Z عناصری نظیر سلیسیوم، آلومینیوم و یا ژرمانیوم هستند [۱۹ و ۲۰]. فلدسپارها به سه گروه تقسیم بندی می شوند:

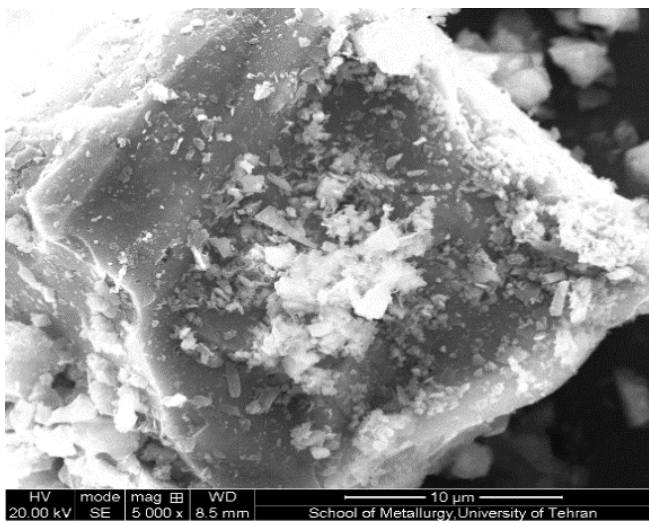
- ۱- فلدسپار کلسیت با فرمول شیمیایی $(CaAl_2Si_2O_8)$ دارای تقارن تری کلینیک
 - ۲- فلدسپار سدیک با فرمول مولکولی $(NaAlSi_3O_8)$ دارای تقارن تری کلینیک
 - ۳- فلدسپار پتاسیک با فرمول مولکولی $(KAlSi_3O_8)$ دارای تقارن مونوکلینیک
- به دلیل فراوانی طبیعی و توانایی فلدسپارها در خواص جذبی، می توان از آنها به عنوان مواد معدنی ارزان قیمت در حذف آلودگی ها از پساب استفاده نمود.

مرور مقالات نشان داد که فلدسپار برای حذف فلزات سنگین از محلول های آبی به کار رفته است اما تنها یک مورد گزارش استفاده از فلدسپار برای حذف رنگزاهای کاتیونی از پساب های نساجی منتشر شده است [۲۱]. از آنجا که یکی از عمده ترین منابع آلودگی پساب های نساجی رنگزاهای کاتیونی هستند، لذا در این پژوهش امکان استفاده از جاذب فلدسپار برای حذف رنگزای پر کاربرد C.I. Basic red 14 از پساب های نساجی مورد بررسی قرار داده شد. همچنین خصوصیات سطحی و ساختار جاذب و عوامل موثر بر فرآیند رنگبری (مقدار ماده جاذب، مدت زمان تماس، غلظت اولیه رنگزا، pH اولیه و حضور الکترولیت) مورد مطالعه قرار گرفت. برای ارزیابی مقدار ماده رنگزای جذب شده بر روی جاذب در حالت تعادل از ایزوترم ها و سینتیک های جذب استفاده شد.

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نمونه پودری فلدسپار خام در شکل ۳-ا آمده است که وجود ذرات ورقه ای شکل و تخلخل های بین ذرات را نشان می دهد. شکل ۳-ب تصویر SEM نمونه فلدسپار بعد از جذب رنگزا است که حضور رنگزا بر روی سطح فلدسپار، نفوذ کامل رنگزا به داخل حفره ها و پر شدن حفره های سطحی فلدسپار را به خوبی نشان می دهد.



۳-الف



۳-ب

شکل ۳. تصویر میکروسکوپ الکترونی پویشی از الف) نمونه پودری فلدسپار خام ب) نمونه فلدسپار بعد از جذب رنگزا
Fig 3. Scanning electron microscopy (SEM) images of Feldspar (a): raw feldspar powder (b): feldspar after dye adsorption

الگوی فلورسانس پرتو X فلدسپار در شکل ۴ نمایش داده شده است. وجود پنج پیک شاخص نشان می دهد که بخش عمده فلدسپار از پنج عنصر تشکیل شده است. جدول ۲ درصد عناصر موجود در جاذب فلدسپار را نشان می دهد که Si بیشترین درصد را دارا می باشد.

الکترولیت بر فرآیند حذف رنگزای C.I. Basicred 14 توسط فلدسپار بررسی شد. از دستگاه اسپکترو فتومتر UV-Vis برای اندازه گیری ویژگی های جذبی استفاده شد. از قانون بیر-لامبرت (معادله ۱) برای محاسبه غلظت ماده رنگزا در محلول استفاده شد. pH محلول ها با استفاده از مقدار کمی از اسید سولفوریک و سود تنظیم شد. مقادیر جذب محلول در طول موج ماکزیمم ماده رنگزا در ۵۱۴ nm به دست آمد.

$$A = \epsilon cl \quad (1)$$

به طوری که در این معادله A: مقدار جذب محلول، ϵ : ضریب جذب خاموشی (l/mol.cm)، l: طول سل (cm) و c: غلظت محلول (mol/l) هستند.

ظرفیت جذب یا مقدار رنگزای جذب شده به ازای واحد وزن جاذب از رابطه ۲ و بازده حذف رنگزا از محلول از رابطه ۳ به دست می آیند که C_0 و C_t به ترتیب غلظت اولیه و غلظت رنگزا در زمان t از فرآیند جذب V ، حجم محلول (l) و M جرم جاذب فلدسپار (g) هستند.

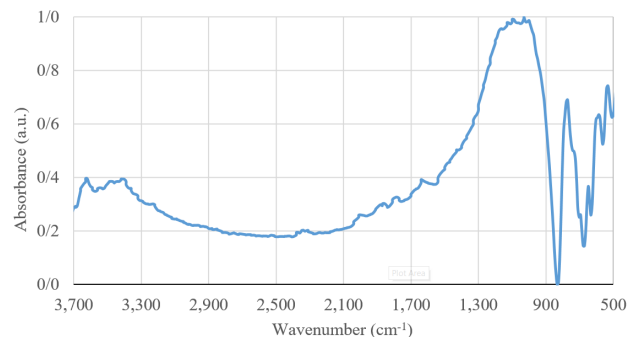
$$qt = \frac{(C_0 - C_t) \cdot V}{M} \quad (2)$$

$$R = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad (3)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خصوصیات ماده جاذب

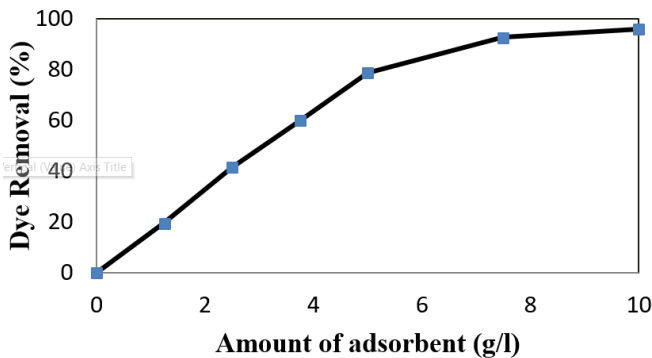
مشخصات شیمیایی جاذب فلدسپار در جدول ۲ آمده است. شکل ۲ طیف تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) فلدسپار را نشان می دهد. پیک در ناحیه 518 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات خمشی گهواره ای Si-O-Si، پیک در ناحیه 782 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات خمشی به دلیل پیوندهای Si-O-Si، پیک در ناحیه 1128 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی Si-O-Si است. همچنین پیک در ناحیه 3623 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی هیدروکسیل اسید Si-O(H)-Al و گروه های هیدروکسیل داخلی، صفحات اکتاهدرال و تتراهدرال بین لایه ای می باشد [۲۱].



شکل ۲. طیف تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) فلدسپار
Fig 2. FTIR spectrum of Feldspar

۳-۳- اثر مقدار ماده جاذب

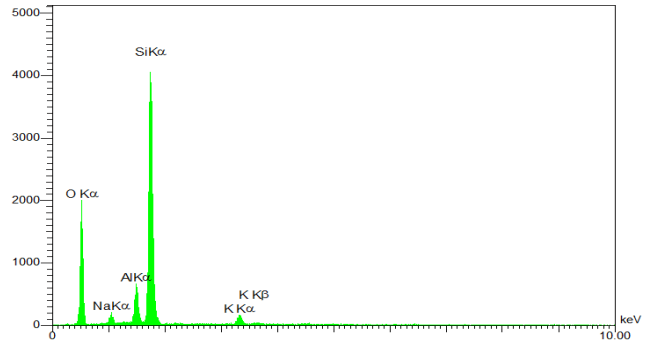
C.I. Basic red رنگزای حذف ماده بر بازده جاذب در شکل ۶ آورده شده است. در این آزمایش‌ها غلظت اولیه ماده رنگزا ۲۵ mg/l، حجم محلول اولیه ۱۴ ml و دور همزن ۳۵۰ rpm ثابت نگه‌داشته شدند. مقادیر مختلفی از فلدسپار (۱۰ g/l، ۷/۵، ۵، ۳/۷۵، ۲/۵، ۱/۲۵) استفاده شد. با افزایش مقدار جاذب مورد استفاده بازده حذف ماده رنگزا افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد که می‌توان آن را به واسطه سطح تماس بیشتر و در دسترس بودن مکان‌های جذبی بیشتر دانست [۲۲]. با افزایش مقدار جاذب تا ۵ g/l سرعت افزایش بازده رنگبری بالاست (در شکل ۶ نمودار شیب تندی دارد) درحالی‌که در غلظت‌های ۷/۵ g/l - ۵ از جاذب این سرعت آهنگ افزایش آهسته‌تری دارد. در غلظت‌های جاذب بالاتر از ۷/۵ g/l مقدار جاذب تاثیر چندانی بر بازده رنگبری ندارد، زیرا با اینکه مقدار جاذب افزایش یافته است ولی مقدار ماده رنگزا در سیستم ثابت است و این مقدار ماده رنگزا به مقدار مشخصی جاذب نیاز دارد و افزایش بیش از این مقدار جاذب تنها هدر دادن جاذب است که از لحاظ اقتصادی به صرفه نمی‌باشد، لذا ۷/۵ g/l فلدسپار، به عنوان مقدار بهینه جاذب در نظر گرفته شد و در ادامه فرآیند رنگبری از این مقدار جاذب استفاده شد.



شکل ۶. تغییرات بازده حذف رنگزا ۱۴ C.I. Basic red با افزایش مقدار جاذب در دمای محیط، pH طبیعی، حجم ۲۰۰ ml
 Fig 6 . The effect of adsorbent dosage on dye removal at room temperature, natural pH and, 200 ml

۳-۴- تاثیر مدت زمان و غلظت اولیه ماده رنگزا

تغییرات درصد حذف ماده رنگزای C.I. Basic red ۱۴ از محلول بر حسب زمان فرآیند برای غلظت‌های مختلف از ماده رنگزا مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمایش‌ها مقدار جاذب ۷/۵ g/l، حجم



شکل ۴. الگوی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) فلدسپار

Fig 4 .XRF pattern of Feldspar

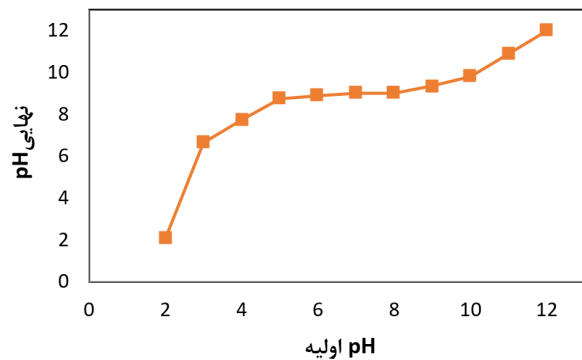
جدول ۲. درصد عناصر موجود در جاذب فلدسپار

Table2 . The chemical analysis of Feldspar

درصد عناصر	نوع عناصر
۳۸/۹۳	O
۱/۸۸	Na
۶/۶۹	Al
۴۷/۷۱	Si
۴/۷۹	K

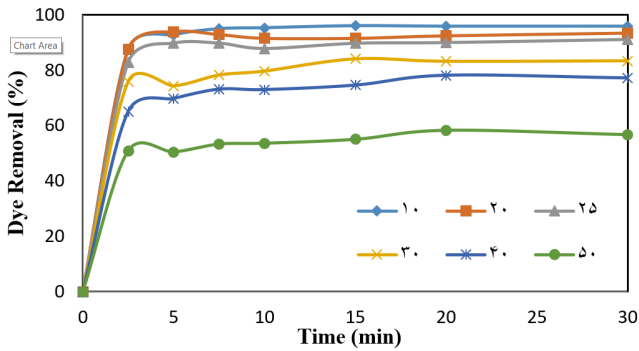
۳-۲- تعیین محدوده ایزوالکتریک

برای تعیین محدوده ایزوالکتریک فلدسپار ۰/۲ g از پودر جاذب به ۵۰ ml محلول نیترات سدیم (۰/۱M) اضافه شد. pH محلول در مقادیر مختلف ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ساعت در دمای اتاق و دور همزن ۳۵۰ rpm نگه‌داشته شدند. سپس pH نهایی محلول‌ها اندازه‌گیری شدند. با رسم نمودار pH نهایی بر حسب pH اولیه محدوده ایزوالکتریک جاذب فلدسپار تعیین گردید. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود محدوده ایزوالکتریک برای این جاذب تقریباً بین ۷-۸ است.



شکل ۵. نمودار تعیین محدوده ایزوالکتریک برای جاذب فلدسپار

Fig 5 .Determination of isoelectric range of Feldspar

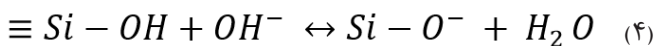


شکل ۷. بازده حذف رنگزای C.I. Basic red 14 توسط فلدسپار در دمای محیط، pH طبیعی، حجم ۲۰۰ ml و غلظت جاذب ۷/۱۵/۷ g در غلظت‌های اولیه ماده رنگزا بر حسب (mg/l).

Fig 7. The influence of initial dye concentration on dye removal at room temperature, natural pH and, 7.5 g/l of adsorbent

۵-۳- اثر pH

در سامانه‌های حذف رنگزا بررسی تاثیر تغییرات pH بر بازده رنگبری مهم است زیرا تغییرات pH می‌تواند سبب تغییر بار سطحی، یونیزاسیون گروه‌های فعال و تغییر ظرفیت جذب جاذب و همچنین تغییر درجه یونیزاسیون ماده جذب شونده گردد. برای بررسی اثر pH بر بازده رنگبری، مطالعات در مقادیر مختلفی از pH اولیه (۱۲، ۱۰/۵، ۹، ۷، ۵، ۳) انجام شد. نتایج اثر pH اولیه بر فرآیند حذف رنگزا - C.I. Ba-sic red 14 در شکل ۸ مشاهده می‌شود. در این آزمایش‌ها مقدار جاذب ۷/۱۵/۷ g، حجم محلول اولیه ۲۰۰ ml و دور همزدن ۳۵۰ rpm ثابت نگه داشته شدند. در pH ایزوالکتریک (pH_{pzc}) سطح از لحاظ بار الکتریکی خنثی است. در مقادیر pH کمتر از نقطه ایزوالکتریک سطح جاذب دارای بار مثبت می‌شود که باعث افزایش جذب یون‌های منفی روی جاذب می‌شود، در حالی که در مقادیر pH بالاتر از نقطه ایزوالکتریک، سطح جاذب دارای بار منفی می‌شود که سبب افزایش جذب یون‌های مثبت از طریق نیروهای الکترواستاتیکی بر روی جاذب می‌شود [۲۱]. فلدسپار از کاتیون‌هایی نظیر Na^+ ، K^+ و Ca^{2+} و آنیون‌هایی نظیر SiO^- تشکیل شده است. تغییر pH سبب تغییر بار سطحی جاذب می‌شود. با افزایش pH بازده رنگبری اندکی افزایش یافته است که می‌تواند به دلیل کاهش بار مثبت سامانه و به تبع آن افزایش تعداد مکان‌های منفی روی سطح فلدسپار و افزایش بار منفی سطح جاذب مطابق معادله شیمیایی ۴ باشد که منجر به افزایش پیوندهای الکترواستاتیکی بین جاذب و رنگزا و در نتیجه افزایش جذب رنگزای کاتیونی و بهبود بازده رنگبری می‌گردد [۲۳].



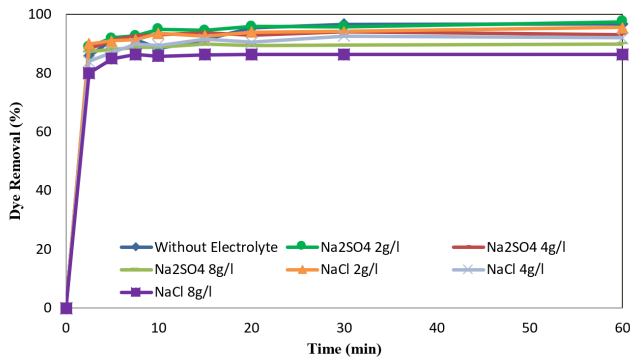
محلول اولیه ۲۰۰ ml و دور همزدن ۳۵۰ rpm ثابت نگه داشته شدند. همان طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود فرآیند جذب رنگزا توسط فلدسپار بسیار سریع بوده و در زمان بسیار کوتاه (کمتر از ۵ دقیقه) انجام می‌شود. نمونه برداری از پساب تا زمان ۳۰ دقیقه که تقریباً تعادل کامل اتفاق افتاده است، ادامه یافته است. تغییرات قابل توجهی بعد از زمان ۳۰ دقیقه در فرآیند حذف رنگزا به وجود نمی‌آید. برای غلظت‌های مختلف ماده رنگزا در محلول (۳۰، ۴۰، ۵۰ mg/l) به ترتیب ۵۴، ۷۲، ۸۲، ۸۹، ۹۳ و ۹۶ درصد بوده است. بدیهی است که برای غلظت‌های پایین‌تر از ماده رنگزا در پساب، فرآیند جذب سریع‌تر و بازده حذف رنگزا بالاتر است. با افزایش غلظت اولیه در محلول مقدار رنگزای جذب شده روی جاذب افزایش می‌یابد.

این امر نشان دهنده این است که غلظت اولیه رنگزا نقش مهمی را در میزان بازده نهایی حذف رنگزا بازی می‌کند، در هر حال با توجه به جذب بسیار سریع ماده رنگزای کاتیونی بر روی فلدسپار زمان رسیدن به تعادل برای غلظت‌های اولیه مختلف ماده رنگزا تقریباً یکسان است و تنها میزان بازده نهایی حذف رنگزا با یکدیگر متفاوت می‌باشد.

در غلظت‌های پایین محلول رنگزا، راندمان رنگبری بالاست و حذف رنگزا تقریباً به طور کامل رخ داده است، زیرا در غلظت‌های پایین تعداد سایت‌های ماده جاذب برای جذب مولکول‌های رنگزا کافی و مناسب است و مولکول‌های رنگزا می‌توانند با توزیع مناسبی روی سطح جاذب قرار گیرند به طوری که نیروهای جاذبه الکترواستاتیکی بین کاتیون‌های رنگزا و مکان‌های منفی روی سطح جاذب بر نیروهای دافعه بین مولکولی میان مولکول‌های رنگزا غلبه می‌کنند. تعداد مکان‌های جذب روی سطح جاذب تعداد ثابتی است. با افزایش غلظت محلول رنگزا تعداد مکان‌های روی سطح جاذب برای جذب تمامی مولکول‌های رنگزا کافی نیستند، لذا تمامی مولکول‌های رنگزا شانس جذب روی سطح جاذب را نخواهند داشت.

همچنین با افزایش تعداد مولکول‌های رنگزای جذب شده بر سطح جاذب، نیروهای دافعه بین مولکولی میان مولکول‌های رنگزا افزایش یافته و بر نیروهای جاذبه الکترواستاتیکی میان کاتیون‌های رنگزا و مکان‌های جذب آنیونی سطح جاذب غلبه می‌کند و پدیده واجذب رخ می‌دهد. نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد که در غلظت ۲۵ mg/l از محلول رنگزا، رنگبری به صورت قابل قبولی رخ داده است. لذا این غلظت به عنوان غلظت بهینه انتخاب شد.

با کاتیون‌های رنگزا کمپلکس‌های ضعیف تشکیل داده و مانع جذب مولکول‌های رنگزا بر سطح جاذب شوند. همچنین کاتیون‌های حاصل از یونیزاسیون الکترولیت‌ها می‌توانند از طریق جاذبه الکترواستاتیکی جذب سطح باردار شوند و با خنثی کردن بار سطحی جاذب تعدادی از مکان‌های جذب را غیر فعال نمایند. هر چند وجود الکترولیت سبب کاهش بازده رنگبری می‌شود اما این کاهش بسیار ناچیز است و همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود بازده رنگبری از ۸۵٪ کمتر نشده است. بنابراین از نظر کاربردی می‌توان از این جاذب معدنی برای حذف رنگزا از نمونه‌های واقعی پساب استفاده نمود.



شکل ۹. تاثیر افزایش الکترولیت بر بازده حذف رنگزای C.I. Basic red 14 در دمای محیط، حجم ۷/۵ g/l و غلظت جاذب ۲۰۰ mg/l

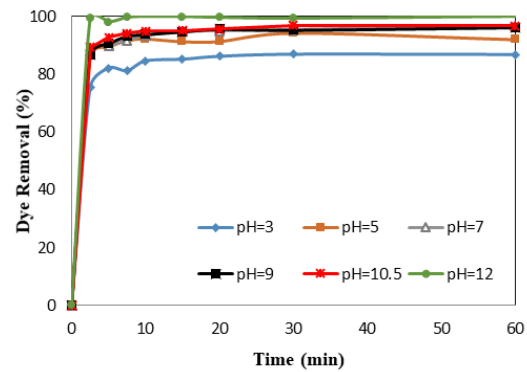
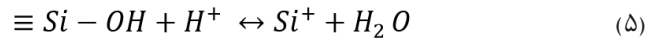
Fig 9 . The influence of electrolyte on dye removal at room temperature, 200 ml and, 7.5 g/l of adsorbent

۳-۷- ایزوترم‌های جذب

فرایند جذب یک فرایند انتقال جرم است که می‌تواند به وسیله معادلات ریاضی فرایند تعادل و سرعت توصیف گردد. ایزوترم‌های جذب ابزارهای کمی مفیدی برای نشان دادن ظرفیت جذب و رفتار یک ماده جاذب برای ماده جذب شونده خاصی هستند. داده‌های تجربی تعادل جذب با مدل‌های ایزوترم جذب لانگمیر، فرنلینش، تمکین، ردلیش پیترسون و دو بنین رادشکوچ مورد بررسی قرار گرفت. در مدل جذب لانگمیر فرض بر آن است که حداکثر جذب، مربوط به تک لایه اشباع شده مولکول جذب شونده روی سطح جاذب با انرژی جذب ثابت می‌باشد و جذب یک مولکول در یک مکان جذبی بر روی جذب مولکول‌های دیگر اثر نمی‌گذارد. معادله‌های شماره ۶ و ۷ نیز رابطه ایزوترم جذب لانگمیر را نشان می‌دهند:

$$q_e = \frac{K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (6)$$

از طرف دیگر با کاهش pH و در pH های اسیدی بازده رنگبری اندکی کاهش می‌یابد که می‌تواند به دلیل وجود یون‌های H^+ در محلول و رقابت آنها با مولکول‌های رنگزا در جذب بر روی سطح جاذب و همچنین افزایش تعداد مکان‌های مثبت روی سطح جاذب مطابق معادله شیمیایی ۵ باشد [۲۴].



شکل ۸. تاثیر pH اولیه بر حذف رنگزای C.I. Basic red 14 در دمای محیط، حجم ۲۰۰ ml و غلظت جاذب ۷/۵ g/l. Fig 8 . The effect of initial pH on dye removal at room temperature, 200 ml and, 7.5 g/l of adsorbent

۳-۶- تاثیر افزایش الکترولیت

پساب‌های صنعتی معمولاً حاوی مقادیر قابل توجهی از انواع الکترولیت‌ها می‌باشند مثلاً در صنعت نساجی برای افزایش رمق‌کشی به حمام‌های رنگرزی مقادیری از الکترولیت‌هایی نظیر NaCl و Na₂SO₄ افزوده می‌شود. حضور الکترولیت‌ها در پساب می‌تواند سبب خنثی شدن بار سطحی جاذب و کاهش کارایی آن و همچنین رقابت با ماده جذب شونده برای تصاحب مکان‌های فعال جاذب شود، لذا بررسی تاثیر حضور الکترولیت بر حذف ماده رنگزا هم از دیدگاه تئوری و هم از دیدگاه عملی در شرایط واقعی مورد توجه است. افزایش مقادیر نسبتاً بالا از الکترولیت‌های سدیم کلراید و سدیم سولفات به محلول رنگزا و تاثیر آن بر بازده حذف رنگزای C.I. Basic red 14 مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در شکل ۹ آمده است. شرایط آزمایش (غلظت اولیه رنگزا ۱۰ mg/l، دمای محیط، حجم ۲۰۰ ml و غلظت جاذب ۷/۵ g/l) در تمامی حالت‌ها ثابت بوده است. نمونه‌برداری از محلول رنگزا در زمان‌های ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۶۰ min انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که صرف نظر از نوع و غلظت الکترولیت افزوده شده، سرعت اولیه حذف ماده رنگزا تقریباً ثابت مانده است اما بازده نهایی حذف ماده رنگزای کاتیونی C.I. Basic red 14 اندکی کاهش نشان می‌دهد. این کاهش اندک به دلیل یونیزاسیون مولکول‌های نمک و ایجاد آنیون‌هایی نظیر SO_4^{2-} و Cl^- می‌باشد که می‌توانند

لایه‌های مختلف به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد. معادله‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب نشان دهنده معادله و شکل خطی ایزوترم تمکین می‌باشند.

$$q_e = \frac{RT}{b} \ln(AC_e) \quad (11)$$

$$q_e = B \ln A + B \ln C_e \quad (12)$$

که $B = \frac{RT}{b}$ است. همچنین A: ثابت مربوط به پیوند در حالت تعادل و مربوط به حداکثر انرژی پیوندی ($L \text{ mg}^{-1}$)، B: ثابت ایزوترم تمکین ($J \text{ mol}^{-1}$)، R: ثابت جهانی گازها ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) و T دمای مطلق بر حسب کلوین است. [۲۷].

ایزوترم جذب ردلیش پیترسون (جذب عمومی) ترکیبی از دو مدل لانگمیر و فرندلیش است و اغلب برای بررسی تعادل در محدوده گسترده‌تری از غلظت به کار می‌رود. شکل خطی ایزوترم عمومی به صورت معادله ۱۳ است.

$$\ln\left[\frac{q_{\max}}{q_e} - 1\right] = \ln K - n_b \ln C_e \quad (13)$$

q_{\max} : حداکثر ظرفیت جذب ماده جاذب (mg g^{-1}) که از مدل لانگمیر محاسبه می‌شود، K: ثابت اشباع ایزوترم (mg L^{-1}) و n_b : مقدار ثابت است [۲۸].

در ایزوترم دوبینین رادشکوویچ (D-R) فرض می‌شود که جذب بر روی سطوح هتروژن رخ می‌دهد. همچنین افت انرژی جذب در این ایزوترم به صورت خطی است برخلاف ایزوترم فرندلیش که در آن افت انرژی به صورت لگاریتمی فرض می‌شود. همچنین فرض می‌شود که اثرات متقابل بین جاذب و جذب شونده غیر مستقیم است لذا به علت این اثرات متقابل انرژی جذب تمامی مولکول‌ها در لایه جذب به صورت خطی کاهش می‌یابد. شکل خطی ایزوترم دوبینین رادشکوویچ به صورت معادله ۱۴ است.

$$\ln q_e = \ln q_{\max} - \beta \varepsilon^2 \quad (14)$$

که β ثابت انرژی آزاد جذب به ازای هر مول ماده جذب شده ای که از فاصله بی نهایت دور به سمت سطح جاذب حرکت کند بر حسب $(\text{mol}^2/\text{J}^2)$ و ε پتانسیل پولانی که مربوط به غلظت تعادلی است بر حسب (J/mol) که این پتانسیل برابر $\varepsilon = RT \ln\left(1 + \frac{1}{C_e}\right)$ است که در آن T دمای کلوین (R)، K: ثابت عمومی گازها (kJ/K.mol) و C_e : غلظت تعادلی ماده جذب شونده در محلول (mol/l) است. E متوسط انرژی آزاد جذب بر حسب (kJ/mol) از معادله ۱۵ به دست می‌آید.

$$E = \frac{1}{\sqrt{-2\beta}} \quad (15)$$

اگر $8 < E < 16$ باشد، نشان می‌دهد که یک فرآیند شیمیایی تبادل یونی رخ داده است و اگر $E < 8$ نشان‌دهنده رخداد بهترین مدل برازنده را می‌توان از طریق مقایسه ضرایب همبستگی (R^2) تعیین کرد. علاوه بر

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_L C_e} + \frac{a_L}{K_L} \quad (7)$$

که در آن C_e : غلظت ماده جذب شونده در محلول در حالت تعادل (mg L^{-1})، q_e : مقدار ماده حل شونده جذب شده بر واحد جرم جاذب در حالت تعادل (mg g^{-1})، K_L : ثابت ایزوترم (L g^{-1}) و a_L : مقدار ثابت (L mg^{-1}) است.

خطی بودن نمودار $\frac{1}{q_e}$ بر حسب $\frac{1}{C_e}$ نشان دهنده پیروی فرآیند جذب از ایزوترم لانگمیر است. مقادیر K_L و a_L از روی معادله خط به دست آمده محاسبه می‌شوند. مشخصه اساسی ایزوترم لانگمیر یک ثابت بدون بعد به نام پارامتر تعادلی R_L است.

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (8)$$

که در اینجا K_L ثابت لانگمیر، C_0 غلظت اولیه ماده رنگزا و R_L نشان دهنده نوع ایزوترم است به طوری که اگر $R_L = 0$ باشد فرآیند برگشت ناپذیر، اگر $0 < R_L < 1$ باشد فرآیند مطلوب، اگر $R_L = 1$ باشد فرآیند خطی و اگر $R_L > 1$ باشد فرآیند نامطلوب است [۲۵].

در مدل ایزوترمی فرندلیش فرض بر آن است که یک سطح ناهمگن با توزیع نایک‌نواختی از گرمای جذب در روی سطح و به صورت چند لایه فرآیند جذب را انجام می‌دهد. معادله جذب فرندلیش و شکل خطی آن به صورت معادله ۹ و ۱۰ نوشته می‌شود.

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (9)$$

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (10)$$

K_f ظرفیت جذب در غلظت واحد بر حسب (L g^{-1}) است. $\frac{1}{n}$ فاکتور ناهمگنی یا شدت جذب سطحی و نشان دهنده نوع ایزوترم است به طوری که اگر $\frac{1}{n} = 1$ باشد، فرآیند برگشت پذیر، اگر $0 < \frac{1}{n} < 1$ باشد فرآیند مطلوب و اگر $\frac{1}{n} > 1$ باشد، فرآیند نامطلوب است. در مدل فرندلیش برهمکنش‌های بین ماده جذب شونده و جاذب در نظر گرفته می‌شود. همچنین در این مدل به دلیل وجود برهمکنش‌هایی میان جاذب و ماده جذب شونده، گرمای جذب کلیه مولکول‌ها در لایه به صورت خطی کاهش می‌یابد و جذب با توزیع یکنواختی از انرژی‌های پیوند مشخص می‌شود. خطی بودن نمودار $\log q_e$ در برابر $\log C_e$ نشان می‌دهد که سیستم جذب مورد مطالعه از ایزوترم فرندلیش پیروی می‌نماید [۲۶].

در ایزوترم جذب تمکین یک سطح ناهمگن دارای مکان‌های جذب با انرژی پیوندی یکسان در نظر گرفته می‌شود. در این ایزوترم به دلیل اثرات متقابل جاذب و جذب شونده بر روی هم گرمای جذب در

برای ایزوترم‌های لانگمیر، ردلیش پیترسون و دوینین رادشکوویچ در حد قابل قبول نمی‌باشند. کم بودن میزان ضریب همبستگی در مدل‌های لانگمیر، ردلیش پیترسون و دوینین رادشکوویچ نسبت به مدل‌های تمپکین و فرندلیش به این معنی است که جذب رنگزای کاتیونی بر روی فلدسپار از حالت لایه‌ی اشباع خارج شده و سطح جاذب دارای انرژی سطحی یکسان برای مکان‌های جذبی نمی‌باشد و جذب مولکول ماده رنگزا بر روی جذب مولکول‌های دیگر تاثیر می‌گذارند. هم‌چنین مقدار n به‌دست آمده در مدل فرندلیش که بزرگ‌تر از یک است، مناسب بودن فرآیند جذب را تایید می‌کند. لذا با توجه به شواهد موجود می‌توان نتیجه گرفت که جذب رنگزای کاتیونی C.I. Basic red 14 توسط فلدسپار به‌صورت یک جذب شیمیایی و فیزیکی است به طوری که هم‌زمان هم از طریق اتصال الکتروشیمیایی بین بار مثبت رنگزا و بار منفی فلدسپار (جذب شیمیایی) و هم از طریق مکان‌ها و حفره‌های سطح فلدسپار جذب (جذب فیزیکی) فرآیند جذب رخ می‌دهد.

R^2 می‌توان از حداقل مربعات خطا (SSE) نیز برای تعیین بهترین مدل استفاده کرد. هر چه R^2 بزرگ‌تر و هم‌چنین هر چه SSE کوچک‌تر باشد، مدل مورد نظر با داده‌های تجربی تطابق بهتری دارد. مقدار SSE از رابطه ۱۶ به‌دست می‌آید

$$SSE = \sqrt{\frac{\sum [(exp, Data - cal, Data) / exp, Data]^2}{n}}$$

که exp.Data مقادیر به‌دست آمده از آزمایش‌ها، cal.Data مقادیر به‌دست آمده از معادلات برازش شده و n تعداد آزمایش‌های انجام شده است. ثابت ایزوترم‌ها، ضرایب همبستگی و مقادیر SSE آنها در جدول ۳ آمده است. نتایج نشان می‌دهند که جذب رنگزای کاتیونی C.I. Basic red 14 بر روی جاذب فلدسپار از معادلات ایزوترم‌های تمپکین و فرندلیش تبعیت می‌کند، که بیشترین پیروی از آن ایزوترم تمپکین است. مقادیر ضریب همبستگی و مقادیر SSE به‌دست آمده

جدول ۳. پارامترها و ضرایب همبستگی ایزوترم‌های لانگمیر، فرندلیش، تمپکین، ردلیش پیترسون و دوینین رادشکوویچ در جذب رنگزای C.I. Basic red 14 بر روی فلدسپار

Table3. Parameters and correlation coefficients of Langmuir, Freundlich, Temkin, Redlich-Peterson, and Dubinin-Radushkevich isotherms in the dye absorption of C.I. Basic red 14 on feldspar

پارامترها، ضرایب همبستگی و مقادیر خطا					نوع ایزوترم
SSE	R^2	R_L	K_L	a_L	لانگمیر
۶/۲۳۱	۰/۸۱۳۹		۰/۱۷۶۷	۲/۴۳	
SSE	R^2	n	K_f		فرندلیش
۱/۲۰۵	۰/۹۰۲۲	۵/۳۴۴	۰/۰۵۱		
SSE	R^2	A	B		تمپکین
۱/۸۰۰	۰/۱۳۹۳	۱۶/۳۰	۱/۷۲		
SSE	R^2	n_b	K		ردلیش پیترسون
۲/۸۳۰	۰/۸۶۵۸	۰/۰۲۵	۰/۱۴		
SSE	R^2	E	β	q_{max}	دوینین رادشکوویچ
۴/۲۰۷	۰/۸۲۲	۰/۴۷۳	-۲/۲۳	۳/۰۸۷	

به صورت معادله ۱۷ بیان می‌شود.

$$\ln\left(\frac{C_t}{C_e}\right) = K \cdot t \quad (17)$$

K: ثابت سرعت واکنش شبه مرتبه اول برگشت ناپذیر (min^{-1})
در مدل شبه مرتبه اول برگشت پذیر فرض بر آن است که شدت پر شدن مراکز جذب به صورت خطی متناسب با تعداد مراکز خالی جذب می‌باشد. در این مدل نفوذ از داخل یک لایه رخ می‌دهد و بر مبنای ظرفیت جامد است که در آن تغییرات در مقدار جذب با زمان

۸-۳- سینتیک جذب

سینتیک جذب برای فهم دینامیک و تاثیر عوامل موثر بر سرعت واکنش جذب مواد رنگزا بر روی ماده جاذب مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. سینتیک حذف رنگزای C.I. Basic red 14 در سه غلظت (۳۰، ۴۰، ۵۰ mg/l) و با استفاده از مدل‌های شبه مرتبه اول برگشت ناپذیر، شبه مرتبه اول برگشت پذیر، شبه مرتبه دوم و نفوذ درون ذره‌ای مورد بررسی قرار گرفت. سینتیک شبه مرتبه اول برگشت ناپذیر

که q_t مقدار ماده جذب شده در زمان t بر حسب $(mg\ g^{-1})$ و K_p ثابت سرعت نفوذ درون ذره‌ای است. C ثابت معادله نفوذ درون ذره‌ای است که اطلاعاتی از ضخامت لایه مرزی در اطراف جاذب را در اختیار می‌گذارد و هرچه بزرگ‌تر باشد تاثیر لایه مرزی بیشتر است. اگر نمودار q_t بر حسب $t^{0.5}$ یک خط گذرنده از مبدا مختصات باشد نشان می‌دهد که نفوذ درون ذره‌ای محدود کننده سرعت و کنترل کننده فرآیند است، ولی اگر از مبدا عبور نکند نشان می‌دهد که علاوه بر مکانیسم نفوذ درون ذره‌ای مکانیسم‌های دیگری هم محدود کننده سرعت هستند و در جذب دخالت دارند. اگر نمودار q_t بر حسب $t^{0.5}$ به صورت دو یا چند خط باشد، نشان دهنده وجود دو یا چند مرحله متفاوت جذب سطحی است. مقادیر K_1 ، K_2 ، q_t و R^2 در جدول ۴ آمده‌اند.

با مقایسه ضرایب همبستگی و مقادیر SSE معادلات بالا مشاهده می‌شود که فرآیند جذب سطحی رنگزای C.I. Basic red 14 بر روی فلدسپار در تمامی غلظت‌ها با مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم تطابق بهتری دارد و مقدار q_e محاسبه شده از این مدل به داده‌های آزمایشگاهی نزدیک‌تر است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که در این پژوهش فرآیند جذب سطحی بیشتر به صورت جذب شیمیایی است. بررسی اثر غلظت رنگزا بر سرعت نفوذ آن در فلدسپار در مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم نشان می‌دهد که سرعت نفوذ رنگزا در غلظت‌های بالاتر بیشتر است به نحوی که سرعت نفوذ رنگزا در هر غلظت، نسبت به غلظت دیگر تقریباً دو برابر است.

متناسب با تعداد مکان‌های اشغال شده در سطح جاذب است. فرم خطی سینتیک شبه مرتبه اول برگشت پذیر در معادله ۱۸ نشان داده شده است:

$$\log\left(1 - \frac{q_t}{q_e}\right) = \frac{-k_1}{2.303 t} \quad (18)$$

مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم نشان می‌دهد که جذب شیمیایی مرحله کند کننده سرعت است و فرآیندهای جذب سطحی را کنترل می‌کند و بر مبنای جذب فاز جامد است که در آن سرعت اشغال مکان‌های جذب با مجذور تعداد مکان‌های اشغال نشده متناسب است. رابطه خطی مدل شبه درجه دوم نیز در معادله ۱۹ آمده است:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \left(\frac{1}{q_e}\right)t \quad (19)$$

در این معادلات q_e برابر مقدار رنگزای جذب شده در حالت تعادل بر حسب (mg/g) ، q_t مقدار رنگزای جذب شده در زمان t بر حسب (mg/g) و K_1 و K_2 (min^{-1}) ، K_1 $(g/mg\ min)$ بر حسب $(g/mg\ min)$ ثابت‌های سرعت تعادلی سینتیک شبه مرتبه اول برگشت ناپذیر، شبه مرتبه اول برگشت پذیر و شبه مرتبه دوم هستند.

مدل سینتیک نفوذ درون ذره‌ای به بررسی مکانیسم نفوذ جذب شونده در جاذب متخلخل و تعیین مرحله کنترل کننده سرعت جذب می‌پردازد. سرعت نفوذ درون ذره‌ای به صورت معادله ۲۰ بیان می‌شود:

$$q_t = K_p t^{0.5} + C \quad (20)$$

جدول ۴. پارامترهای سینتیکی (ثابت‌های سرعت و ضرایب همبستگی معادلات شبه مرتبه اول، شبه مرتبه دوم و نفوذ درون ذره‌ای) جذب رنگزای کاتیونی C.I. Basic red ۱۴ بر فلدسپار

Table 4. Kinetic parameters (rate constants and correlation coefficients of pseudo-first-order, pseudo-second-order and intra-particle diffusion reaction equations) of the cationic dye adsorption onto feldspar

مدل‌های سینتیکی															
نفوذ درون ذره‌ای			شبه مرتبه دوم			شبه مرتبه اول برگشت پذیر			شبه مرتبه اول برگشت ناپذیر			$(\frac{mg}{g})$ ظرف			
SSE	R^2	C	K_p	SSE	R^2	K_1	K_2	q_e	SSE	R^2	K_1		SSE	R^2	K
۰.۲۲/۰	۰/۷۷۶	۰/۲۳۲	۰/۰۰۸	۰/۰۳۴	۰/۹۹۹	۰/۰۴۰	۰/۰۰۳	۰/۲۷۶	۰/۱۱۲	۰/۶۱۰	۰/۰۸۴	۰/۰۵۸	۰/۷۰۳	۰/۰۱۶	۳۰
۰.۲۴/۰	۰/۸۳۴	۰/۳۰۱	۰/۰۱۴	۰/۰۱۸	۰/۹۹۸	۰/۰۶۲	۰/۰۰۷	۰/۳۴۰	۰/۱۵۵	۰/۵۵۰	۰/۱۲۰	۰/۰۵۹	۰/۷۵۴	۰/۰۱۴	۴۰
۰.۲۱/۰	۰/۸۲۶	۰/۲۷۷	۰/۰۱۱	۰/۰۳۹	۰/۹۹۹	۰/۰۸۳	۰/۰۱۱	۰/۳۷۸	۰/۰۴۵	۰/۷۲۸	۰/۰۲۵	۰/۰۳۵	۰/۷۵۳	۰/۰۰۵	۵۰

برابر ۹۶ درصد بود. افزایش میزان ماده جاذب و کاهش غلظت رنگزا باعث افزایش بازده رنگبری می‌شوند. تغییرات pH اولیه و الکترولیت تاثیر اندکی بر بازده حذف رنگزا دارند. داده‌های جذب با ایزوترم‌های لانگمویر، فرنرندلیش، تمکین، ردلیش پیترسون و دویینین رادشکوویچ بررسی شدند و نتایج نشان داد که فرآیند جذب از ایزوترم تمکین و تا حدی فرنرندلیش پیروی می‌کند. سینتیک جذب نیز از نوع مرتبه دوم است که نشان می‌دهد جذب رنگزای C.I. Basic red 14 بر روی

۴- نتیجه گیری

فلدسپار به عنوان یک ماده معدنی ارزان قیمت توانایی جذب و حذف ماده رنگزای کاتیونی C.I. Basic red 14 از پساب‌های نساجی را دارد. شرایط بهینه حذف این رنگزا توسط جاذب فلدسپار در غلظت ۲۵ mg/l رنگزا، ۷/۵ g/l فلدسپار، دمای +۲۲ درجه سانتی‌گراد، مدت زمان ۳۰ تا ۶۰ دقیقه، سرعت همزن ۳۵۰ rpm و حجم محلول رنگزا ۲۰۰ ml به دست آمد که در این شرایط بیشترین راندمان حذف

um alginate membrane for methylene blue removal from water, *Chemical Engineering Journal*, 316 (2017) 623-630.

[12] A. Das, S. Mishra, Removal of textile dye reactive green-19 using bacterial consortium: process optimization using response surface methodology and kinetics study, *Journal of environmental chemical engineering*, 5(1) (2017) 612-627.

[13] F. Zhang, X. Chen, F. Wu, Y. Ji, High adsorption capability and selectivity of ZnO nanoparticles for dye removal, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 509 (2016) 474-483.

[14] H. Li, S. Liu, J. Zhao, N. Feng, Removal of reactive dyes from wastewater assisted with kaolin clay by magnesium hydroxide coagulation process, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 494 (2016) 222-227.

[15] M. Constantin, I. Asmarandei, V. Harabagiu, L. Ghimici, P. Ascenzi, G. Fundueanu, Removal of anionic dyes from aqueous solutions by an ion-exchanger based on pullulan microspheres, *Carbohydrate polymers*, 91(1) (2013) 74-84.

[15] J.T. Chacko, K. Subramaniam, Enzymatic degradation of azo dyes-a review, *International Journal of Environmental Sciences*, 1(6) (2011) 1250.

[16] I. Cretescu, T. Lupascu, I. Buciscanu, T. Balau-Mindru, G. Soreanu, Low-cost sorbents for the removal of acid dyes from aqueous solutions, *Process Safety and Environmental Protection*, 108 (2017) 57-66.

[17] S. De Gisi, G. Lofrano, M. Grassi, M. Notarnicola, Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment: a review, *Sustainable Materials and Technologies*, 9 (2016) 10-40.

[18] G. Crini, P.-M. Badot, Application of chitosan, a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes using batch studies: a review of recent literature, *Progress in polymer science*, 33(4) (2008) 399-447.

[19] M. Rinaudo, Chitin and chitosan: properties and applications, *Progress in polymer science*, 31(7) (2006) 603-632.

[20] M. Yazdani, N. Mohammad Mahmoodi, M. Arami, H. Bahrami, Isotherm, kinetic, and thermodynamic of cationic dye removal from binary system by Feldspar, *Separation Science and Technology*, 47(11) (2012) 1660-1672.

[21] G. Crini, F. Gimbert, C. Robert, B. Martel, O. Adam, N. Morin-Crini, F. De Giorgi, P.-M. Badot, The removal of Basic Blue 3 from aqueous solutions by chitosan-based adsorbent: Batch studies, *Journal of Hazardous Materials*, 153(1-2) (2008) 96-106.

[22] E. Lorenc-Grabowska, G. Gryglewicz, Adsorption characteristics of Congo Red on coal-based mesoporous activated car-

فلدسپار قابل کنترل توسط فرآیند جذب شیمیایی است. این جاذب به دلیل ظرفیت جذب بالا و قیمت ارزان می‌تواند به طور گسترده‌ای در حذف رنگر از پساب‌های نساجی به‌کار برده شود.

مراجع

[1] S. Liu, F. Konstantopoulou, P. Gikas, L.G. Papageorgiou, A mixed integer optimisation approach for integrated water resources management, *Computers & Chemical Engineering*, 35(5) (2011) 858-875.

[2] C. Li, T. Lou, X. Yan, Y.-z. Long, G. Cui, X. Wang, Fabrication of pure chitosan nanofibrous membranes as effective absorbent for dye removal, *International journal of biological macromolecules*, 106 (2018) 768-774.

[3] G. Pearce, UF/MF pre-treatment to RO in seawater and wastewater reuse applications: a comparison of energy costs, *Desalination*, 222(1-3) (2008) 66-73.

[4] A. Maljajei, M. Arami, N.M. Mahmoodi, Decolorization and aromatic ring degradation of colored textile wastewater using indirect electrochemical oxidation method, *Desalination*, 249(3) (2009) 1074-1078.

[5] A. Tehrani-Bagha, N. Mahmoodi, M. Markazi, E. Talaee, Removal of a cationic dye from wastewater by low-cost kaolin, *J. Color Sci. Tech*, 3 (2009) 145-155.

[6] A.K. Mishra, T. Arockiadoss, S. Ramaprabhu, Study of removal of azo dye by functionalized multi walled carbon nanotubes, *Chemical Engineering Journal*, 162(3) (2010) 1026-1034.

[7] X. Xiao, F. Zhang, Z. Feng, S. Deng, Y. Wang, Adsorptive removal and kinetics of methylene blue from aqueous solution using NiO/MCM-41 composite, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 65 (2015) 4-12.

[8] X. Li, X. Jin, N. Zhao, I. Angelidaki, Y. Zhang, Novel bio-electro-Fenton technology for azo dye wastewater treatment using microbial reverse-electrodialysis electrolysis cell, *Biore-source technology*, 228 (2017) 322-329.

[9] J.C. Cardoso, G.G. Bessegato, M.V.B. Zanoni, Efficiency comparison of ozonation, photolysis, photocatalysis and photo-electrocatalysis methods in real textile wastewater decolorization, *Water research*, 98 (2016) 39-46.

[10] H.-Y. Shu, M.-C. Chang, S.-W. Huang, Decolorization and mineralization of azo dye Acid Blue 113 by the UV/Oxone process and optimization of operating parameters, *Desalination and Water Treatment*, 57(17) (2016) 7951-7962.

[11] Q. Li, Y. Li, X. Ma, Q. Du, K. Sui, D. Wang, C. Wang, H. Li, Y. Xia, Filtration and adsorption properties of porous calci-

- [25] H. Freundlich, W. Heller, The adsorption of cis-and trans-azobenzene, *Journal of the American Chemical Society*, 61(8) (1939) 2228-2230.
- [26] M. Temkin, V. Pyzhev, Recent modifications to Langmuir isotherms, (1940).
- [27] O. Redlich, D.L. Peterson, A useful adsorption isotherm, *Journal of Physical Chemistry*, 63(6) (1959) 1024-1024.
- bon, *Dyes and pigments*, 74(1) (2007) 34-40.
- [23] Y. El Mouzdahir, A. Elmchaouri, R. Mahboub, A. Gil, S. Korili, Equilibrium modeling for the adsorption of methylene blue from aqueous solutions on activated clay minerals, *Desalination*, 250(1) (2010) 335-338.
- [24] I. Langmuir, The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum, *Journal of the American Chemical society*, 40(9) (1918) 1361-1403.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Please cite this article using:

H. Ketabi, L. Mivehi, Equilibrium and Kinetics Investigations on Sorption of C.I. Basic Red 14 onto Low-cost Feldspar, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(3)(2019)535-546.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13770.5475

