فصلنامه علوم محیطی، دوره یازدهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۲

۱۲۰-۱۱۱

نانوذرات اصلاح شده با سدیم دودسیل سولفونات به‌عنوان جاذبی کارا برای حذف رنگ از پساب‌های سنتزی

محمد فرجی[۱]، نادیا احمدی[۲]، رویا نوربخش[۳*]

[۱] استادیار، گروه پژوهشی مواد غذایی، پژوهشکده صنایع غذایی و کشاورزی، پژوهشگاه استاندارد

[۲] کارشناس مسئول، گروه پژوهشی مواد غذایی، پژوهشکده صنایع غذایی و کشاورزی، پژوهشگاه استاندارد

[۳] رییس آزمایشگاه مرجع، گروه پژوهشی مواد غذایی، پژوهشکده صنایع غذایی و کشاورزی، پژوهشگاه استاندارد

تاریخ دریافت: ۹۱/۷/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۲/۶/۴

چکیده

در این نوشتار حذف رنگ بازی زرد ۲۸ از نمونه پساب سنتزی با استفاده از نانوذرات اصلاح‌شده با سدیم دودسیل سولفانات (SDS) ارزیابی و مطالعه شد. اثر پارامترهای تجربی مختلف مانند pH نمونه، مقدار جاذب، مقدار سورفکتانت، قدرت یونی و نوع شوینده ارزیابی و بهینه شد. تحلیل داده‌های هم‌دمای تعادلی نشان داد که مدل لانگمویر مطابقت بهتری با داده‌های به دست آمده دارد. همچنین از روی مدل لانگمویر، بیشینه ظرفیت جاذب معادل ۱۴۱mg/g به دست آمد. با مطالعه شرایط واجذب مشخص شد که با استفاده از متانول، به‌عنوان شوینده، می‌توان نانوذرات را بازیابی و دست‌کم برای ۶ مرتبه متوالی مجدداً استفاده کرد.

کلمات کلیدی: نانوذرات مغناطیسی، رنگ بازی زرد ۲۸، مدل لانگمویر، حذف رنگ.

Sodium Dodecyl Sulphate Coated Magnetite Nanoparticles as an Excellent Adsorbent for Removal of Basic Dyes from Synthetic Textile's Wastewater Samples

Mohammad Faraji[1*], Nadia Ahmadi[2], Roya Noorbakhsh[3]

[1] *Assistant Professor, Faculty of Food Industry and Agriculture, Department of Food Science & Technology, Standard Research Institute (SRI).*

[2] *Senior expert, Faculty of Food Industry and Agriculture, Department of Food Science & Technology, Standard Research Institute (SRI).*

[3] *Head of Reffrence lab, Faculty of Food Industry and Agriculture, Department of Food Science & Technology, Standard Research Institute (SRI).*

Abstract

Batch adsorption experiments were carried out for removal of basic dye, namely Basic Yellow 28 (BY 28), from synthetic wastewater sample of textile's company, using sodium dodecyl sulphate coated magnetite nanoparticles (SDS-Fe_3O_4 NPs). The effects of various experimental parameters (e.g. initial pH, SDS amount, ion strength) were examined and optimal experimental conditions were obtained. The results showed that adsorption process onto the adsorbent is very fast and nearly 30 min of contact time was found to be sufficient for the dye adsorption to reach equilibrium. Equilibrium isotherm data were analyzed according to Langmuir and Freundlich equations. The characteristic parameters for each model have been determined. The Langmuir isotherm gave the best correlation for the adsorption of the BY 28 onto the adsorbent. On the basis of the Langmuir analysis, the maximum adsorption capacities were determined to beand 140.8 mg g^{-1}. Also, regeneration studies showed that Fe_3O_4 NPs can be regenerated and reused at least for six times.

Keywords: Magnetite Nanoparticles, Removal; Basic Dye, Basic Yellow 28.

* Corresponding author. *E-mail Address*: roybakhsh@gmail.com

۱- مقدمه

آلودگی شیمیاییِ آب که ناشی از گسترهٔ وسیعی از آلاینده‌هاست به‌علت دارا بودن سمیت بالقوه برای انسان یک مشکل زیست محیطی مهم است. صنعت نساجی از مصرف‌کنندگان عمده آب است و حجم بالایی از رنگ‌ها را به آب‌های طبیعی تخلیه می‌کند. رهاشدن پساب‌های رنگی این صنعت ممکن است موجب مخاطرات زیست‌محیطی شود و از طریق زنجیره غذایی برای انسان‌ها زیان‌آور باشد. فرایندهای بی‌شماری مانند جذب، رسوب‌دادن، تجزیه شیمیایی، تجزیه نوری، تجزیه زیستی، لخته‌سازی شیمیایی و لخته‌سازی الکتروشیمیایی برای حذف رنگ‌ها از پساب‌های رنگی ارائه شده است [۱].

از میان تمام روش‌های پیشنهادی، «جذب با جاذب‌ها» یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای حذف آلودگی از پساب‌هاست. مزایای فرایندهای جذب عبارت‌اند از: سادگی در عملیات و ارزان بودن (در مقایسه با سایر روش‌های جداسازی)؛ همچنین در این روش لجن تولید نمی‌شود.

از میان تمام جاذب‌های مرسوم، کربن فعال رایج‌ترین جاذب است که قادر به جذب بسیاری از رنگ‌ها با ظرفیت بالاست. اما این جاذب گران‌قیمت است و هزینه بازیابی آن به‌دلیل ساده نبودن واجذب مولکول‌های رنگ بسیار بالاست [۲]. اخیراً جاذب‌های کارا و کم‌هزینه‌ای به‌عنوان جایگزینِ کربن فعال برای حذف رنگ‌های بازی از نمونه‌های آبی به کار گرفته شده است [۹].

در سال‌های اخیر نانوذرات مغناطیسی اصلاح‌شده کاربرد گسترده‌ای در حذف رنگ‌ها پیدا کرده است [۱۰-۱۵]. در قیاس با جاذب‌های رایج در حذف رنگ‌ها که ابعاد میکرونی دارند، نانوذرات به‌طور قابل ملاحظه‌ای مساحت سطح به حجم بالایی دارند که این مزیت ظرفیت جاذب و راندمان بالایی را برای آنها فراهم می‌کند [۱۲]. همچنین سطح نانوذرات می‌تواند به سادگی اصلاح شود و حذف رنگ‌هایی با ساختار و ماهیت‌های مختلف را امکان‌پذیر کند [۳، ۱۲-۱۵]. مزیت دیگر نانوذرات مغناطیسی، جمع‌آوری آسان آنها از محلول به‌کمک یک میدان مغناطیسی خارجی است. این خاصیت آنها را برای حذف رنگ‌ها از حجم‌های بالای نمونه مفید می‌سازد، زیرا نیازی به سانتریفیوژ کردن و یا صاف‌کردن نمونه بعد از فرایند حذف نیست.

هدف این تحقیق ارزیابی حذف رنگ بازی زرد ۲۸، از پساب‌های رنگ است. بدین‌منظور نانوذرات اصلاح شده با سدیم دودسیل سولفات به‌عنوان جاذب به کار برده شده است. ویژگی‌های جذبی جاذب با بررسی سینتیک و هم‌دما جذب مطالعه شد. همچنین بازیابی و استفاده مجدد از جاذب، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲- ۱- معرف‌ها و مواد شیمیایی

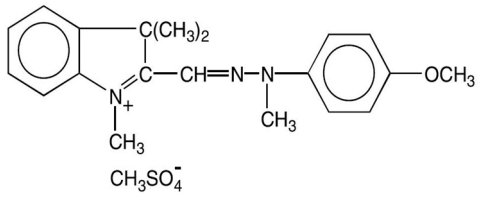
تمامی مواد شیمیایی به کار رفته دارای درجه خلوص تجزیه‌ای بودند. رنگ بازی زرد ۲۸ ($C_{21}H_{27}N_3O_5S$, F_W=۴۳۳/۵۲) از پژوهشکده رنگ تهیه شد. در شکل ۱ ساختار شیمیایی این رنگ نشان داده شده است.

فریک کلراید ($FeCl_3.6H_2O$)، فروس کلراید ($FeCl_2.4H_2O$)، سدیم هیدروکسید، سدیم کلراید، سدیم سولفات، سدیم استات، استیک اسید، سورفکتانت سدیم دو دسیل سولفات (SDS) ($NaC_{12}H_{25}SO_4$, F_w=۲۸۸/۳۷g/mol)، متانول، استون، اتانول و هیدروکلریک اسید از شرکت مِرک (دارمستات، آلمان) تهیه شد. در کلیه آزمایش‌ها از آب دوبار تقطیر استفاده شد. محلول اولیهٔ رنگ با غلظت ۱۰mg/ml با حل‌کردن مقدار معینی از آن در آب مقطر به دست آمد. محلول‌های کاری با رقیق‌سازی محلول اولیه رنگ تا غلظت مورد نیاز تهیه شد. همچنین محلول پایهٔ SDS (۱۰mg/ml) با حل‌کردن مستقیمِ مقدار مناسبی از SDS در آب دوبار تقطیر تهیه شد. برای تنظیم pH از محلول‌های سدیم هیدروکسید ۰/۱mol/l و هیدروکلریک اسید mol/l استفاده شد.

۲- ۲- تجهیزات دستگاهی

اندازه‌گیری‌های اسپکتروفتومتری با دستگاه اسپکتروفتومتری CECIL مدل CE-7200 (ساخت کشور انگلستان) در طول موج بیشینه (۴۴۰nm) انجام شد. با استفاده از دستگاه pHسنج، مدل WTW Inolab (ساخت آلمان)، pH محلول‌ها تنظیم شد. محلول‌های رنگ را با استفاده از یک موتور همزن مکانیکی هایدولف مدل RZR control 2102 (ساخت کلهم، کشور آلمان) و با همزن

شیشه‌ای هم زدند. یک آهن‌ربا با قدرت میدان مغناطیسی ۱/۴تسلا و با ابعاد (۱۰×۵×۴ cm) برای جداسازی‌های مغناطیسی به کار گرفته شد.



Basic yellow 28 (BY28)

شکل ۱- ساختار شیمیایی رنگ بازی زرد ۲۸

۲-۳- روش سنتز نانوذرات مگنتیت

به منظور سنتز نانوذرات مگنتیت [۱۶] ابتدا ۱۰/۴g از نمک $FeCl_3.6H_2O$، ۴/۰g از $FeCl_2.4H_2O$ و ۱/۷ ml از هیدروکلریک اسید (۱۲M) به ۵۰ml آب یون‌زدایی شده داخل یک بشر اضافه شد و مخلوط کاملاً هم‌زده شده تا محلولی شفاف به دست آید. سپس این محلول مدت ۲۰ دقیقه با عبور گاز نیتروژن اکسیژن‌زدایی شد. به‌صورت موازی، ۵۰۰ml محلول سدیم هیدروکسید (۱/۵M) به یک بشر منتقل شد و به‌مدت ۱۵دقیقه اکسیژن‌زدایی شد؛ در حین اکسیژن‌زدایی همزمان دمای آن به ۸۰°C رسانده شد. سپس محلول اولیه تهیه شده در مدت ۳۰ دقیقه، تحت اتمسفری از گاز نیتروژن و با هم‌زدن شدید (۱۰۰۰ rpm) توسط یک همزن مکانیکی، به‌صورت قطره قطره به محلول سدیم هیدروکسید اضافه شد. در طول این فرایند، دمای محلول همواره در ۸۰°C نگه داشته شد و برای جلوگیری از ورود اکسیژن نیز گاز نیتروژن به‌طور پیوسته به محلول دمیده شد. پس از پایان واکنش، رسوب نانوذرات مگنتیت توسط یک آهن‌ربا از محیط واکنش جدا شد و چهار مرتبه با آب یون‌زدایی شده شسته شد. آب یون‌زدایی شده مورد نیاز برای شست‌وشو، قبلاً به‌مدت نیم‌ساعت با نیتروژن اکسیژن‌زدایی شده بود. در نهایت نانوذرات به دست آمده در ۵۰۰ml آب یون‌زدایی شده پخش شدند. pH سوسپانسیون حاصل ۱۱ بود و غلظت نانوذرات در آن ۱۰ mg/ml تخمین زده شد. نانوذرات تهیه شده تحت این شرایط برای مدت یک ماه پایدار بودند. در این حالت احتمال اکسایش آنها بسیار کم است.

۲- ٤- جذب رنگ

برای بهینه‌سازی فرایند حذف رنگ، در یک بشر با افزودن مقدار مناسبی از محلول‌های پایه رنگ مقدار ۴۰میلی‌لیتر از محلول رنگ با غلظت ۲۰mg/l تهیه شد. سپس ۱ ml سوسپانسیون نانوذرات مگنتیت (محتوی ۱۰mg نانوذره) به محلول رنگ اضافه شد. pH محلول در مقدار ۳ تنظیم شد و ۵ میلی‌گرم از SDS به محلول رنگ اضافه شد. سپس به‌منظور افزایش جذب، مخلوط حاصل به‌مدت ۲دقیقه هم زده شد. پس از جذب رنگ، جاذب از محلول نمونه به‌کمک یک آهن‌ربای قوی جدا شد. غلظت باقی‌مانده رنگ در محلول با دستگاه اسپکترومتری اندازه‌گیری شد. برای محاسبه بازده حذف رنگ مطابق معادله ۱ عمل می‌کنیم

$$\text{Dye removal efficiency (\%)} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (۱)$$

در این معادله C_0 و C_e به‌ترتیب غلظت اولیه رنگ و غلظت باقی‌مانده رنگ در محلول (mg/l) است.

۲-۵- مطالعه هم‌دما

مطالعات هم‌دما در بطری‌های شیشه‌ای به حجم ۷۰ml انجام شد. به هر کدام از این بطری‌ها ۴۰ml محلول رنگ با غلظت‌های مختلف در گستره ۱۰-۷۰mg/l اضافه شد که ترکیبی کاملاً مشابه با ترکیب خمره‌های رنگرزی به کار رفته برای رنگ‌های بازی داشت (۲٪ سدیم استات، ۱۰٪ سدیم سولفات، ۳٪ اسید استیک). سپس ۱۰mg نانوذره و ۵mg از SDS در pH بهینه به هریک از این محلول‌های رنگ اضافه شد. محلول‌ها با سرعت ۲۰۰ rpm و به‌مدت ۲ ساعت در دمای ۲۵°C هم زده شدند تا جذب رنگ به تعادل برسد. پس از خارج کردن بطری‌ها از زیر همزن مکانیکی، آنها را روی یک آهن‌ربای قوی قرار دادند و بعد از جداسازی مغناطیسی نانوذرات اصلاح‌شده با SDS، غلظت تعادلی رنگ در محلول باقی‌مانده با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. مقدار رنگ جذب شده با نانوذرات اصلاح‌شده (برحسب q_e(mg/g)) از طریق معادله ۲ به دست آمد:

$$q_e = \frac{C_0 - C_e}{m_s} \quad (۲)$$

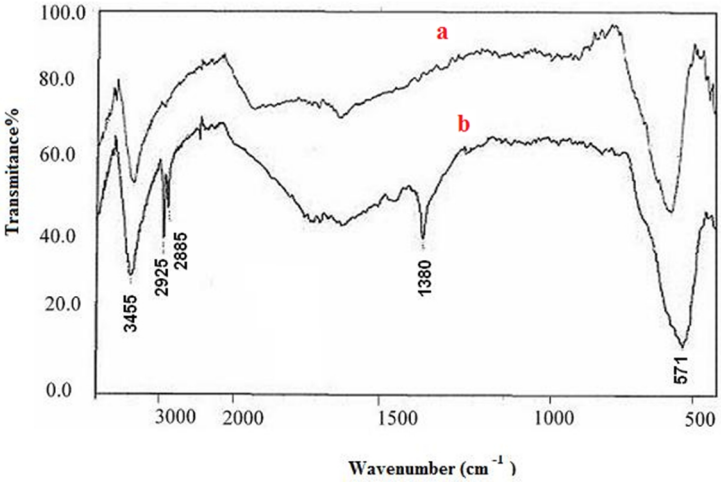
که در آن C_0 و C_e به‌ترتیب غلظت‌های اولیه و تعادلی رنگ در محلول، و m_s غلظت نانوذرات مگنتیت است.

۳- نتایج و بحث

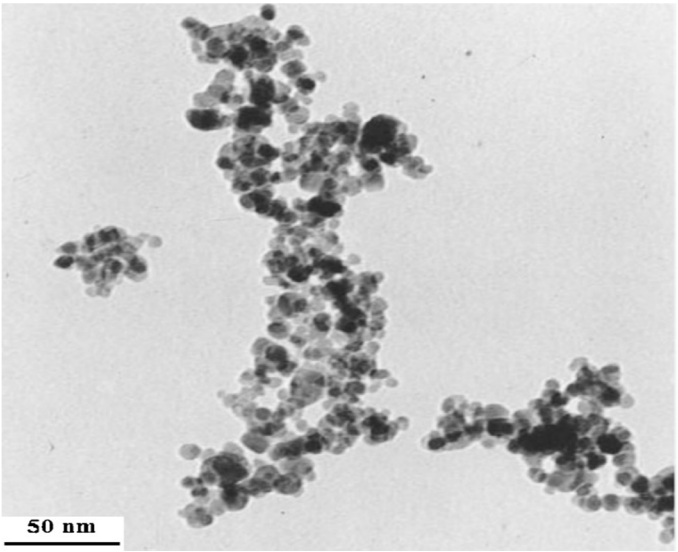
۳- ۱- شناسایی نانوذرات سنتزشده

شناسایی و توصیف نانوذرات مگنتیت سنتزشده با استفاده از دستگاه‌های مختلف انجام شد. طیف IR نانوذرات مگنتیت در شکل ۲ نشان داده شده است. پیک مشاهده‌شده در cm^{-1} ۳۴۵۵~ به ارتعاش کششی گروه OH- نسبت داده می‌شود. این پیک نشان می‌دهد سطح نانوذرات مگنتیت با گروه‌های OH- پوشیده شده است. پیک موجود در cm^{-1} ۵۷۱~ نیز به ارتعاش پیوند Fe-O نسبت داده می‌شود. همچنین پیک موجود در cm^{-1} ۱۳۸۰~ به پیوند S-O و پیک‌های cm^{-1} ۲۸۸۵~ و cm^{-1} ۲۹۲۵~ به ارتعاش کششی متفاوت پیوند C-H موجود در SDS نسبت داده می‌شود. طیف IR نشان می‌دهد که سطح نانوذرات مگنتیت به‌خوبی با SDS اصلاح شده است.

تصویر TEM مربوط به Fe_3O_4 در شکل ۳ نشان داده شده است. تصویر نشان‌دهنده تشکیل نانوذرات مغناطیسی نسبتاً کروی است. همچنین در بین نانوذرات تجمع دیده می‌شود و کاملاً از هم مجزا نیستند. البته آماده‌سازی نمونه می‌تواند تجمع را در کلوئیدها القا کند و درنتیجه تحلیل‌های TEM ممکن است اندازه و توزیع را در محلول منعکس نکند.



شکل ۲- طیف IR نانوذرات: الف) اصلاح نشده؛ ب) اصلاح‌شده مگنتیت



شکل ۳- تصویر TEM نانوذرات مگنتیت

۳-۲- بهینه‌سازی فرایند حذف رنگ

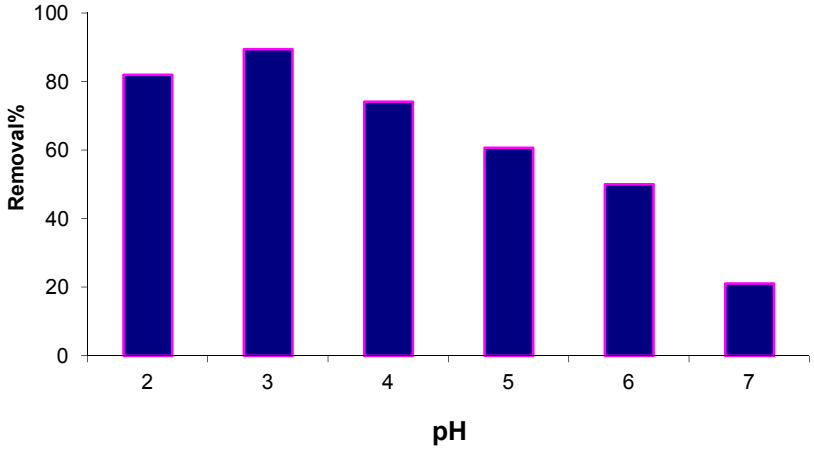
۳-۲-۱- اثر pH محلول رنگ روی کارایی حذف

pH محلول نمونه نقشی کلیدی در حذف رنگ‌ها دارد. میزان رنگ جذب‌شده روی سطح نانوذرات تحت تأثیر بار سطحی جاذب است و بار سطحی نیز تحت تأثیر pH محلول تغییر می‌کند. نتایج بررسی اثر pH روی بازده حذف رنگ‌ها در گسترهٔ ۲ تا ۷ در شکل ۴ نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود بازده حذف با افزایش pH از ۲ به ۳ افزایش می‌یابد و در pH = ۳ به مقدار بیشینه (۹۰٪) خود می‌رسد. پس از آن با افزایش بیشتر pH میزان حذف کاهش می‌یابد.

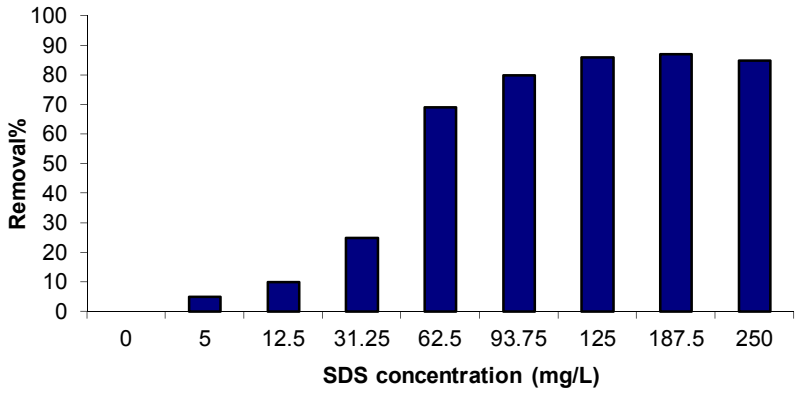
۳-۲-۲- اثر مقدار SDS

شکل ۵ درصد رنگ حذف‌شده را به‌عنوان تابعی از مقدار SDS اضافه شده نشان می‌دهد. به‌علت دافعه‌های الکتروستاتیک میان رنگ کاتیونی و سطح مثبت نانوذرات مگنتیت در محیط اسیدی (pH=۳) در غیاب SDS، میزان بازده حذف رنگ برابر صفر است. در مقابل، با افزایش مقدار SDS مقدار حذف رنگ به‌شدت افزایش می‌یابد. افزایش حذف رنگ می‌تواند با تشکیل تدریجی تجمعات مختلفی از SDS ــ همی‌مایسل (سورفکتانت به‌صورت تک‌لایه بر روی سطح نانوذرات قرار می‌گیرد)، مخلوط همی‌مایسل و یا ادمایسل (سورفکتانت به‌صورت دولایه بر روی سطح نانوذرات قرار می‌گیرد) ــ بر روی سطح نانوذرات مگنتیت توضیح داده شود [۱۶]. در نتیجهٔ برهمکنش رنگ با این تجمعات، بازده حذف افزایش می‌یابد.

بر پایه نتایج به دست آمده (شکل ۵)، بیشینه جذب وقتی به دست می‌آید که غلظت SDS بین ۱۸۷/۵ mg/l-۱۲۵ باشد. براساس این داده‌ها غلظت ۱۲۵ mg/l از SDS به‌عنوان مقدار بهینه انتخاب شد.



شکل ۴ – اثر pH بر کارایی حذف رنگ



شکل ۵- اثر مقدار سورفکتانت روی کارایی حذف رنگ

۳-۲-۳- اثر قدرت یونی

پساب‌های صنعت نساجی حاوی غلظت‌های بالایی از نمک‌های مختلف است؛ حضور این نمک‌ها ممکن است به‌صورت معناداری فرایندهای جذب را تحت تأثیر قرار دهد. شکل ۶ نشان می‌دهد که تحت شرایط بهینه (pH=۳، غلظت ۲۵۰ mg/l از جاذب و غلظت ۱۲۵ mg/l از SDS) با تغییر غلظت سدیم کلراید از صفر تا ۱۰٪، بازده حذف رنگ ابتدا کاهش می‌یابد، سپس افزایش می‌یابد و پس از آن نیز تقریباً ثابت می‌ماند.

با افزایش نمک ابتدا ممکن است برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک بین نانوذرات اصلاح‌شده با SDS و رنگ‌ها کاهش یابد. حضور نمک در غلظت زیاد ممکن است با تشکیل یک لایه‌ی پوششی روی سطح نانوذرات، مانع از برهم‌کنش SDS و سطح نانوذرات در شرایط اسیدی شود. از طرف دیگر افزایش بازده حذف با افزایش غلظت نمک را می‌توان با پدیده نمک زدایی (افزایش راندمان استخراج از فاز آبی به فاز الی به علت حضور غلظت بالای نمک) تفسیر کرد [۱۷]. تحت این شرایط حلالیت رنگ در محلول آبی کاهش می‌یابد و میزان تمایل گونه به سطح جاذب بیشتر می‌شود. از این رو، میزان جذب به تغییرات غلظت نمک حساس است. این نتیجه نشان می‌دهد که در این سیستم جاذبه‌های الکتروستاتیک نقش مهمی در پدیده جذب ایفا می‌کنند.

۳-۳- مطالعه هم‌دمای جذب

داده‌های تعادلی جذب که رابطه میان جرم جذب‌شونده (بر واحد وزن جاذب) و غلظت‌های تعادلی در فاز مایع را بیان می‌کنند با هم‌دماهای جذب بیان می‌شوند و اطلاعات مهمی برای طراحی سیستم حذف فراهم می‌کنند. هم‌دماهای جذبی، نحوه برهمکنش آلاینده‌ها با جاذب‌ها را نیز توصیف می‌کنند. به‌منظور بهینه کردن طراحی سیستم جذب به‌منظور حذف رنگ از محلول‌ها، برقرار کردن همبستگی بسیار مطلوب منحنی‌های تعادل مهم است. در پژوهش‌های ثبت شده چندین معادله هم‌دمای قابل دسترس برای ارزیابی داده‌های تعادلی تجربی وجود دارد. در این مطالعه داده‌های تجربی با دو مدل هم‌دمای لانگمویر و فروندلیچ انطباق داده شد [۱۸].

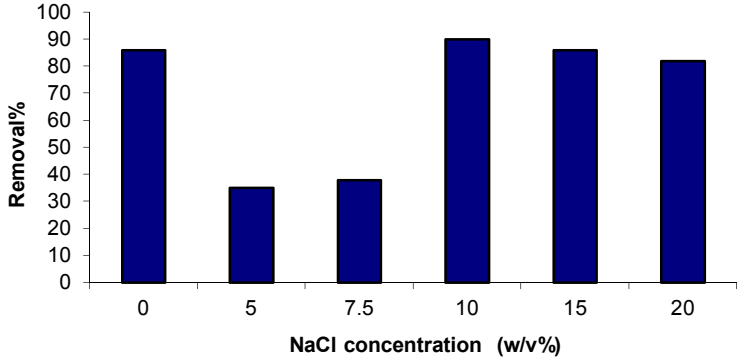
مدل لانگمویر پیشنهاد می‌کند که تمامی محل‌های جذب معادل‌اند، توانایی یک گونه برای پیوند شدن به این محل‌ها مستقل از اشغال یا عدم اشغال محل‌های همسایه است، و جاذب بعد از تشکیل لایه‌ای از جذب‌شونده روی سطح جاذب اشباع می‌شود. معادله خطی لانگمویر در معادله ۳ آورده شده است.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_{max}} + \frac{1}{q_{max}} C_e \qquad (۳)$$

از طرف دیگر، مدل فروندلیچ جذب ناهمگون و چندلایه بر روی جاذب را در نظر می‌گیرد. فرم خطی مدل فروندلیچ نیز در معادله ۴ آورده شده است.

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \qquad (۴)$$

پارامترهای مربوط به هر هم‌دما برای جذب رنگ‌ها روی جاذب با استفاده از تحلیل رگرسیون و ضریب همبستگی (R^2) تعیین شد (جدول ۱). نتایج نشان می‌دهد

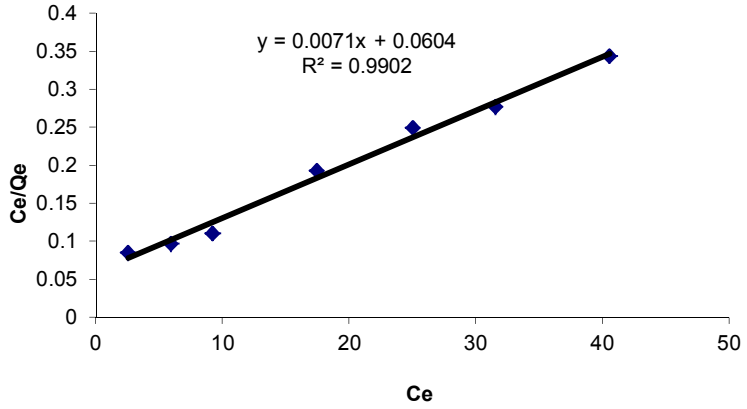


شکل ۶- اثر نمک بر روی کارایی حذف رنگ

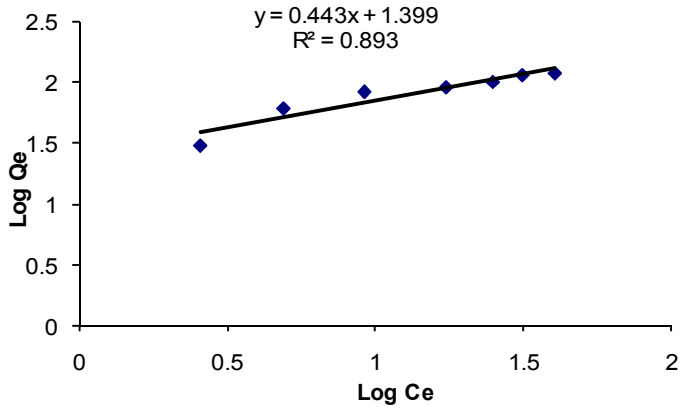
که داده‌های تعادل با مدل لانگمـویر، در مقایسـه بـا مـدل فروندلیچ، انطباق بهتری دارند (شکل ۷). همچنین براساس مدل لانگمویر بیشینه ظرفیت جاذب برای رنـگ زرد بـازی ۲۸ معادل ۱۴۱ mg/g به دسـت آمـد. ایـن مقـادیر نشـان می‌دهد که نانوذرات اصلاح‌شده با SDS ویژگی‌های جـذب خـوبی دارد. در مقایسـه بـا برخـی از دیگـر جـاذب‌هـای گزارش‌شده برای حذف رنگ‌های بازی، نتـایج ایـن تحقیـق نشان‌گر پتانسیل بالای نانوذرات مغناطیسی اصلاح‌شـده بـا SDS به‌عنوان یک جاذب فوق‌العاده است.

جدول ۱- پارامترهای مدل‌های لانگمویر و فروندلیچ برای حذف رنگ

رنگ	مدل های ایزوترم					
	لانگمویر			فروندلیچ		
	q_{max} (mg g^{-1})	K_L (L mg^{-1})	R_L^2	n	K_F (L mg^{-1})	R_F^2
BY 28	۱۴۱	۰/۱۲	۰/۹۹۰۲	۲/۲۵	۲۵/۱	۰/۸۹۳۱



(الف)



(ب)

شکل ۷- انطباق داده‌های تعادلی رنگ بازی زرد ۲۸ به: الف) مدل فروندلیچ؛ ب) مدل لانگمویر

۳-٤- واجذب و بازیابی جاذب

از آنجا که جذب رنگ بازی زرد ۲۸ روی سطح نانوذرات اصلاح شده با SDS یک فرایند برگشت‌پذیر است، امکان بازیابی نانوذرات مگنتیت برای استفاده مجدد وجود دارد. بر پایه نتایج به دست آمده، جاذب جداسازی‌شده می‌تواند با ۱ ml متانول بازیابی شود و دست‌کم برای ۶ فرایند جذب/واجذب متوالی با داشتن بازده جذب بالای ۹۵٪ مجدداً استفاده شود. نتایج مشابهی نیز در تحقیقات پیشین به دست آمده است [۱۲و۱۶]. فرایندهای بازیابی در زمان بسیار کوتاهی (۲ دقیقه) انجام می‌شود زیرا نانوذرات مغناطیسی می‌توانند به‌راحتی از محلول نمونه جمع‌آوری شوند. بنابراین، سانتریفیوژ یا صاف کردن بعد از اتمام عملیات بازیابی اصلاً لازم نیست و این یک ویژگی بسیار مطلوب از نظر کاربردی است. معادله ۵ برای محاسبه بازده واجذب رنگ به کار برده شد.

$$\text{Dye desorption efficiency (\%)} = \frac{C_D \times V_D}{(C_0 - C_e) \times V_{aq}} \times 100 \qquad (۵)$$

که در آن C_0، C_e و C_D به‌ترتیب غلظت اولیه رنگ، غلظت باقی‌مانده رنگ در محلول، و غلظت رنگ واجذب شده (mg/l) و V_D و V_{aq} به‌ترتیب حجم شوینده (۱ ml) و حجم نمونه پساب سنتزی (۴۰ ml) است.

٤- نتیجه گیری

این مطالعه تأیید می‌کند که نانوذرات اصلاح شده با SDS را می‌توان جاذب فوق‌العاده‌ای برای حذف رنگ‌های بازی از پساب سنتزی برشمرد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد pH محلول و مقدار SDS تأثیر زیادی بر جذب رنگ بر روی جاذب دارند. از طرف دیگر، در غیاب یا حضور غلظت‌های بالای نمک سدیم کلراید (بالاتر از ۱۰٪) بازده حذف رنگ بالاست، اما زمانی که غلظت نمک بین صفر تا ۱۰٪ است، بازده حذف رنگ کاهش می‌یابد. داده‌های هم‌دما برای رنگ بازی زرد ۲۸ به‌خوبی با مدل لانگمویر منطبق شدند. همچنین براساس مدل لانگمویر، بیشینه ظرفیت جاذب برای رنگ بازی زرد ۲۸ معادل ۱۴۰/۸mg/g به دست آمد. انطباق مدل لانگمویر در این سیستم نشان‌گر تشکیل پوشش تک‌لایه‌ای از رنگ در سطح خارجی جاذب است. همچنین نتایج حاصله نشان داد نانوذرات مگنتیت می‌توانند به‌سادگی با متانول بازیابی و مجدداً به کار برده شوند. مقایسه بیشینه ظرفیت نانوذرات اصلاح‌شده با جاذب با دیگر جاذب‌های به کار برده شده برای حذف رنگ‌های بازی نشان‌دهنده کارایی و ظرفیت جذب بالا و همچنین دینامیک حذف بسیار سریع است (جدول ۲). نتایج این تحقیق را می‌توان به‌عنوان پایه‌ای برای طراحی و ساخت سیستم‌های تیمار ارزان برای حذف رنگ بازی زرد ۲۸ از پساب‌های صنعتی به کار برد.

جدول ۲- مقایسه جاذب مورد استفاده در روش پیشنهادی با برخی از جاذب‌های به کار رفته برای حذف رنگ‌های بازی از نمونه‌های پساب

جاذب	رنگ مورد بررسی	q_{max} (mg g^{-1})	مرجع
Clinoptilolite	Basic Yellow 28	۵۹/۶	Yener et.al
Silkworm pupa	Basic Blue 41	۵۵۵	Noroozi et. al
Agricultural by-products (rice bran and wheat bran)	Malachite Green	۶۶/۵-۶۸/۹	Wang et. al
	Methylene Blue	۱۶/۶-۵۴/۹	
Boron waste	Basic Yellow 28	۷۵/۰	Olgun et.al
	Basic Red 46	۷۴/۷	
Moroccan crude clay	Basic Red 46	۵۴/۰	Karim et. al
Phosphoric acid modified rice straw	Basic blue 9	۲۰۸/۳	Gong et. al
	Basic red 5	۱۸۸/۷	
Cyclodextrin polymer	Basic Blue 3	۴۲/۴	Crini et.al
	Basic Violet 3	۳۵/۸	
	Basic Violet 10	۵۳/۲	
SDS- Fe_3O_4 NP	BY 28	۱۴۱	This work

منابع

[1] Slokar Y M, Marechal A M L. Methods of decoloration of textile wastewaters. Dyes Pigments; **1998**; **37**: 335-356.

[2] McKay G, Ramprasad G, Mowli P. Desorption and regeneration of dye colours from low-cost materials. Water Res.; **1987**; **21**: 375-381.

[3] Yener J, Kopac T, Dogu G, Dogu T. Adsorption of Basic Yellow 28 from aqueous solutions with clinoptilolite and amberlite. Journal of Colloid and Interface Science; **2006**; **294**: 255-264.

[4] Noroozi B, Sorial G A, Bahrami H, Arami M. Equilibrium and kinetic adsorption study of a cationic dye by a natural adsorbent—Silkworm pupa. Journal of Hazardous Materials; **2007**; **B139**: 167-174.

[5] Wang X S, Zhou Y, Jiang Y, Sun C. The removal of basic dyes from aqueous solutions using agricultural by-products. Journal of Hazardous Materials; **2008**; **157**: 374-385.

[6] Olgun A, Atar N. Equilibrium and kinetic adsorption study of Basic Yellow 28 and Basic Red 46 by a boron industry waste. Journal of Hazardous Materials; **2009**; **161**: 148-156.

[7] Karim A B, Mounir B, Hachkar M, Bakasse M, Yaacoubi A. Removal of Basic Red 46 dye from aqueous solution by adsorption onto Moroccan clay. Journal of Hazardous Materials; **2009**; **168**: 304-309.

[8] Gong R, Jin Y, Chen J, Hu Y, Sun J. Removal of basic dyes from aqueous solution by sorption on phosphoric acid modified rice straw. Dyes and Pigments; **2007**; **73**: 332-337.

[9] Crini, G. Kinetic and equilibrium studies on the removal of cationic dyes from aqueous solution by adsorption onto a cyclodextrin polymer. Dyes and Pigments; **2008**; **77**: 415-426.

[10] Keyhanian F, Shariati S, Faraji M, Hesabi M. Magnetite nanoparticles with surface modification for removal of methyl violet from aqueous solutions. Arabian Journal of Chemistry; 2011; doi:10.1016/j.arabjc.2011.04.012.

[11] Shariati S, Faraji M, Yamini Y, Rajabi A A. Fe_3O_4 magnetic nanoparticles modified with sodium dodecyl sulfate for removal of safranin O dye from aqueous solutions. Desalination; **2011**; **270**: 160-165.

[12] Faraji M, Yamini Y, Tahmasbi E, Saleh A, Nourmohammadian F. Cetyltrimethylammonium bromide-coated magnetite nanoparticles as high efficient adsorbent for rapid removal of reactive dyes from the textile companies' wastewaters. J. Iran. Chem. Soc.; **2010**; **7**: S130-S144.

[13] Kong L P, Gan X J, Ahmad A L, Hamed B H, Evarts E R, Ooi B S, Kang L J. Design and synthesis of magnetic nanoparticles augmented microcapsule with catalytic and magnetic bifunctionalities for dye removal. Chemical Engineering Journal; **2012**; **197**: 350-358.

[14] Ge F Ye H, Li M-M, Zhao B-X. Efficient removal of cationic dyes from aqueous solution by polymer-modified magnetic nanoparticles. Chemical Engineering Journal; **2012**; **198-199**: 11-17.

[15] Konicki W, Sibera D, Mijowska E, Lendzion-Bielu Z, Narkiewicz U. Equilibrium and kinetic studies on acid dye Acid Red 88 adsorption by magnetic $ZnFe_2O_4$ spinel ferrite nanoparticles. Journal of Colloid and Interface Science; **2013**; **398**: 152-160.

[16] Zhao X L, Shi Y L, Cai Y Q, Mou S F. Cetyltrimethylammonium bromide-coated magnetic nanoparticles for the preconcentration of phenolic compounds from environmental water samples. Environ. Sci. Technol.; **2008**; **42**: 1201-1206.

[17] Saleh A, Yamini Y, Faraji M, Shariati S, Rezaee M. Hollow fiber liquid phase microextraction followed by high performance liquid chromatography for determination of ultra-trace levels of Se(IV) after derivatization in urine, plasma and natural water samples. J. Chromatogr. B.; **2009**; **877**: 175-176.

[18] Tien C. Adsorption calculations and modelling. Newton, Boston, USA: Butterworth-Heinemann; **1994**.