Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 5, No. 1, PP. 23-32, Spring 2020
DOI: 10.22112/jwwse.2020.165041.1132

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال پنجم، شماره ۱، صفحات ۲۳-۳۲، بهار ۱۳۹۹

Research Paper

Synthesis and Efficiency Evaluation $Fe_2O_3@SiO_2$ Nanoparticle in Acid Blue 92 Removal from Aqueous Solutions: Equilibrium and Kinetic Studies

Zohre Aramesh[1], Somayeh Rahdar[2], Shahin Ahmadi[2], Hojat Shahraki[1] and Abbas Rahdar[3*]
1- M.Sc. Student, School of Health, Zabol University of Medical Sciences, Zabol, Iran
2- B.Sc. Student of Environmental Health, Department of Environmental Health, Zabol University of Medical Sciences, Zabol, Iran.
3- Department of Physics, University of Zabol, Zabol, Iran.
* Corresponding author, Email: a.rahdarnanophysics@gmail.com

Received: 01/01/2019
Revised: 06/01/2020
Accepted: 02/02/2020

Abstract

Dyes are one of the most important existing pollutants in textile industrial wastewater. They are often toxic, carcinogenic, teratogenic, and non-biodegredable. So the aim of this study was synthesis $Fe_2O_3@SiO_2$ nanoparticle and using it as adsorbent for the removal of acid blue 92 from aqueous solutions. In this study, the electrochemical method for synthesis nanoparticle was used and characteristics of nanoparticle were analyzed by SEM (Scanning electron microscopy) technique. In this study, the effect of the pH (2-11), contact time (20-150 min), nanoparticle dosage (0.02-0.14 g/L) and concentration of dye (20-120 mg/L) was investigated by one factor at the time method and then was optimized. The pH equal to 2, contact time of 40 min, and absorbent of 0.08 g/l was obtained as experimental data correlate to the pseudo-second order kinetic (R^2=0.995) and Dubinin-Radushkevich adsorption isotherm model (R^2=0.989). In optimal conditions, $Fe_2O_3@SiO_2$ nanoparticle has well potential to quickly and effectively remove dye and simply be separated from the solution by the magnet due to its magnetic property.

Keywords: Acid blue 92, Adsorption isotherm, Aqueous solution, $Fe_2O_3@SiO_2$ nanoparticle, Kinetic

مقاله پژوهشی

سنتز و ارزیابی کارایی نانوذره اکسید آهن پوشش داده شده با Sio_2 در حذف رنگ اسید بلو ۹۲ از محلول‌های آبی: مطالعه سنتیک و ایزوترم

زهره آرامش[۱]، سمیه رهدار[۲]، شهین احمدی[۲]، حجت شهرکی[۱] و عباس رهدار[۳*]
۱- دانشجوی کارشناسی مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی زابل، زابل، ایران.
۲-کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، عضو هیات علمی دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی زابل، زابل، ایران.
۳- عضو هیات علمی، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: a.rahdarnanophysics@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۱
تاریخ اصلاح: ۱۳۹۸/۱۰/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۳

چکیده

رنگ‌ها یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های فاضلاب نساجی بوده که سمی، سرطان‌زا، جهش‌زا و غیرقابل تجزیه بیولوژیک هستند. بنابراین هدف از مطالعه حاضرسنتز نانوذره $Fe_2O_3@SiO_2$ و کاربرد آن در حذف رنگ‌زای اسید بلو ۹۲ از محلول‌های آبی و تعیین ایزوترم و سینتیک جذب است. در این مطالعه از روش الکتروشیمیایی برای سنتز نانوذره $Fe_2O_3@SiO_2$ استفاده شد. ویژگی جاذب با تکنیک میکروسکوپ الکترونی عبوری (SEM) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تاثیر pH (۲-۱۱)، زمان تماس (۲۰-۱۵۰ دقیقه)، دوز نانوذره (۰/۰۲-۰/۱۴ گرم بر لیتر) و غلظت‌های مختلف رنگ (۲۰-۱۲۰ میلی‌گرم بر لیتر) بررسی و بهینه‌سازی شدند. pH برابر با ۲، زمان تماس ۹۰ دقیقه، دوز نانوذره ۰/۱ گرم بر لیتر به‌عنوان شرایط بهینه برای حذف رنگ حاصل شد. بررسی معادلات سینتیک و ایزوترم نشان داد که داده‌های تجربی فرایند جذب رنگ به‌ترتیب با شبه درجه دوم (R^2=۰/۹۹۵) و مدل دوبینین-رادوشکویچ (R^2=۰/۹۸۹) همبستگی داشت. در شرایط بهینه، نانوذره $Fe_2O_3@SiO_2$ پتانسیل و کارایی موثری را در حذف رنگ دارد و به‌دلیل خاصیت مغناطیسی، جداسازی آن از محلول آبی ساده و سریع‌تر است.

کلمات کلیدی: اسید آبی ۹۲، نانو ذره $Fe_2O_3@SiO$ ، سینتیک، ایزوترم جذب، محلول آبی

۱- مقدمه

نگرانی زیادی درباره زائدات صنایع از جمله صنایع نساجی وجود دارد، زیرا حجم بالایی از فاضلاب را که حاوی رنگ‌های سمی، pH بالا، COD بالا و ترکیبات مقاوم در برابر تجزیه هستند تولید می‌کنند (Rahdar et al., 2019) متداول‌ترین رنگ‌های کاربردی راکتیو، دیسپرس، اسیدی و مستقیم است که در غلظت‌های پایین سمی بوده و حلالیت بالایی در منابع آبی داشته و در صنایع گوناگون مثل غذایی، چرم لاستیک و پلاستیک، خانگی، جوهرها و مواد شوینده کاربرد دارند (علی‌دادی و همکاران، ۱۳۹۳). میزان مصرف رنگ در صنایع نساجی دنیا بیش از ۱۰۰۰۰ تن در سال تخمین زده می‌شود و ۱ تا ۵ در صد از رنگ‌ها در طی فرآیند وارد فاضلاب می‌شود (رضایی مفرد و همکاران، ۱۳۹۲). ورود مولکول‌های رنگ‌های سنتتیک به منابع آبی باعث تهدید محیط‌زیست و سلامت عمومی انسان‌ها شده است و تخلیه فاضلاب‌های صنایع نساجی حتی در غلظت‌های خیلی پایین به منابع آبی باعث کاهش نفوذ نورخورشید و اختلال در فتوسنتز، بروز پدیده اتروفیکاسیون و تداخل در اکولوژی آب‌های پذیرنده شده و برای حیات آبزیان سمی بوده و جنبه زیبا شناختی دارد (علی‌دادی و همکاران، ۱۳۹۳; Ahmadi et al., 2019).

رنگ‌ها به‌دلیل تحریک پوست، چشم و سیستم تنفسی برای انسان‌ها و حیوانات مضر هستند (Kaur and Kaur, 2014) و باعث سمیت درسیستم‌های تنفسی و کاهش باروری درانسان‌ها می‌شود (Srivastava et al., 2004). علاوه‌بر این، مواد شیمیایی موجود در پساب‌های رنگی سمی بوده و باعث سرطان‌زایی، جهش‌زا یی و یا تراتوژنیک در گونه‌های بیولوژیکی و آبزیان شده است (Alizadeh et al., 2014). بنابراین ضروری است که فاضلاب این صنایع مورد تصفیه قرار گیرند. تکنیک‌های زیادی برای حذف رنگ از پساب صنایع کاربرد گسترده دارند از جمله تجزیه بیولوژیکی، فلوکولاسیون و کواگولاسیون، اکسیداسیون شیمیایی، اسمز معکوس، فیلترهای غشایی، اکسیداسیون الکتروشیمیایی و اکسیداسیون پیشرفته. فرایند انعقاد مقدار زیادی از لجن را تولید می‌کند که منجر به هزینه‌های بالای دفع می‌شود (Bazrafshan et al., et al., 2019a; Rahdar 2015).

فرایند تبادل یونی برای طیف وسیعی از رنگ‌ها قابل استفاده نبوده و گران‌قیمت است (Srivastava et al., 2016). فرایند ممبران غشایی نیز در حذف رنگ موثر است اما به‌دلیل سرمایه‌گذاری بالا و ضایعات، کاربرد آن محدود شده و راهبری آن نیاز به نیروی متخصص دارد. فرایند تجزیه بیولوژیکی به‌دلیل دامنه وسیع pH و غلظت بالای رنگ و سمی‌بودن برای تصفیه بیولوژیکی موثر نیست. هم‌چنین فرایند اکسیداسیون - احیا نیز نیاز به تزریق مواد شیمیایی اضافی دارد که در نتیجه باعث آلودگی ثانویه می‌شود (احمدآبادی و همکاران، ۱۳۹۵).

در میان فرآیندهای بیان شده، فرایند جذب به‌عنوان تکنولوژی با بهره‌برداری بالا و آسان، سادگی در طراحی و کارایی موثر و احیای مجدد و اقتصادی در حذف آلاینده‌ها بوده و باعث ایجاد آلودگی ثانویه نمی‌شود (Rahdar et al., 2019). اخیرا توجه زیادی به بررسی حذف رنگ‌ها و پیگمنت‌ها از پساب صنایع و فاضلاب توسط نانوذرات به‌دلیل وجود تخلخل وسایت‌های فعال بر روی ساختار ذرات که باعث تسهیل در پخش آلاینده‌های آلی بر روی سطح و منافذ نانوذرات می‌شود شده است (Abou- 2015 Gamra and Ahmeed,). نانوذرات واکنش‌پذیری و توانایی جذب بالایی در حذف آلاینده‌ها نسبت به مواد با اندازه معمولی دارند که این ویژگی ظرفیت جذب آلاینده را به‌شدت افزایش می‌دهد. نانوذره کاربردی دارای آهن و سیلیس است که به فراوانی یافت می‌شود، غیر سمی بوده و واکنش‌پذیری سریع دارند (عبدالله زاده و همکاران، ۱۳۹۵). علاوه‌بر این، نانوذره مغناطیسی سطح بالاتری از سایت‌های فعال را برای جذب به‌خود اختصاص می‌دهند و پوشش نانوذرات با دی اکسید سیلسیوم باعث می‌شود که نانوذرات به‌هم آمیخته نشوند (Park et al., 2004).

امروزه تحقیقات زیادی در استفاده از نانوذرات متفاوتی در حذف رنگ‌ها از فاضلاب صنایع در حال انجام است. به‌طور نمونه تحقیق Khalighi et al. (2012) نشان داد که بیشترین حذف رنگ اسید بلو ۹۲ توسط نانوذره اکسید نیکل در pH برابر ۲، غلظت اولیه ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و دوز نانو ذره ۰/۱ گرم و زمان تماس ۹۰ دقیقه معادل ۹۵/۲۱٪ (۴۷/۶۱ mg/g) بود. باقرپورسرد صحرا (۱۳۹۴) حذف رنگ اسید آبی ۹۲ با استفاده از نانوذرات سرامیکی $ZnLaALO_4$ را انجام دادند که با افزایش دوز جاذب افزایش حذف رنگ مشاهده شد و حذف رنگ از سینتیک جذبی شبه مرتبه دوم و از ایزوترم لانگمویر تبعیت می‌کرد. با مقدار pH برابر ۲/۵، دوز جاذب ۰/۰۳ گرم و غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، بیشترین ظرفیت جذب معادل ۱۴۲۸/۵۷ mg/g مشاهده شد (باقرپور سرد صحرا و همکاران، ۱۳۹۴). بنابراین هدف از این مطالعه، سنتزنانوذرات $Fe_2O_3@SiO_2$ و کاربرد آن در حذف رنگ‌زای اسید بلو ۹۲ از محلول‌های آبی و تعیین ایزوترم و سینتیک جذب رنگ است.

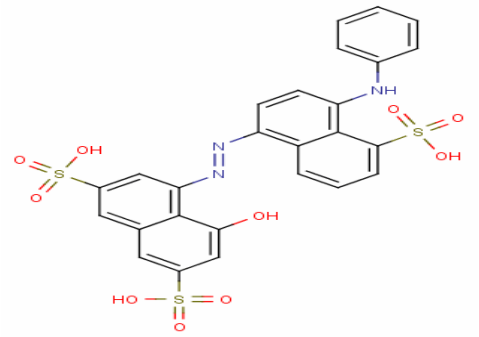
۲- مواد و روش ها

۲-۱- مشخصه یابی فیزیکی نانوذرات

از دستگاه SEM (مدل Mira 3-XMU) برای مطالعه ریخت‌شناسی نانوذرات استفاده شد. برای مطالعه خواص مغناطیسی نانوذرات نیز از دستگاه VSM (شرکت مغناطیس دقیق کویر، ایران) استفاده شد.

۲-۲- روش سنتز نانوذرات

در این تحقیق نانوذرات با استفاده از روش (Taimoory et al. 2018) سنتز شدند. مطالعه حاضر یک مطالعه تجربی در مقیاس آزمایشگاهی بود که در سیستم ناپیوسته اثر pH (۹، ۱۱، ۷، ۵، ۳، ۲)، زمان تماس (۲۰، ۴۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ دقیقه)، دوز نانوذره (۰/۱۴، ۰/۱۲، ۰/۱، ۰/۰۸، ۰/۰۶، ۰/۰۵، ۰/۰۳، ۰/۰۲ گرم بر لیتر) و غلظت‌های مختلف رنگ (۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰، ۶۰، ۴۰، ۲۰، ۱۰ میلی گرم بر لیتر) بر روی حذف رنگ بررسی شد. رنگ اسید بلو ۹۲ از شرکت سیگما الدریچ خریداری شد. ساختار رنگ اسید بلو ۹۲ با فرمول شیمیایی $C_{26}H_{19}N_3O_{10}S_3$ و وزن مولکولی (۶۲۹/۶۳ گرم بر مول) است که در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- ساختار رنگ اسید بلو ۹۲

سایر مواد شیمیایی از شرکت مرک آلمان تهیه شدند. جذب رنگ اسید بلو ۹۲ توسط نانوذره سنتز شده $Fe_2O_3@SiO_2$ به‌طور پیوسته بر روی روتاری شیکر انجام شد. برای آزمایش‌های جذب از محلول استوک رنگ اسید بلو ۹۲ با غلظت ۱۰۰۰ mg/l استفاده و غلظت‌های مورد نیاز با استفاده از رقیق‌سازی محلول استوک تهیه شد. مقدار pH اولیه با استفاده ازاسید سولفوریک ۱N وهیدروکسید سدیم ۱N تنظیم و توسط pH متر دیجیتال مدل (MIT65) اندازه‌گیری شد. مقدار ثابتی از جاذب به ارلن مایرهای ۲۵۰ ml میلی‌لیتری که حاوی ۵۰ ml رنگ بود اضافه و سپس به‌مدت زمان واکنش ۶۰ دقیقه، در دمای اتاق و سرعت اختلاط ۱۸۰ rpm برروی شیکر قرار گرفت. پس از گذشت زمان مشخص محلول‌های میکس شده با استفاده از کاغذ صافی واتمن µm ۰/۴۵ مورد صاف‌سازی قرار گرفت. سپس میزان جذب نمونه‌ها با استفاده از اسپکتروفتومتر UV/Vis مدل Shimadzu Model:CE-1021-UK)، در طول موج nm ۶۲۰ اندازه‌گیری شد (Shanthi et al., 2014). برای دستیابی به نتایج بهتر، آزمایش‌ها سه بار تکرار شد. درصد حذف رنگ اسید بلو ۹۲ با استفاده از معادله (۱) مورد بررسی قرارگرفت.

$$R(\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} 100 \qquad (۱)$$

که C_0 و C_e: به‌ترتیب غلظت‌های اولیه و نهایی رنگ پس از جذب هستند. مقدار رنگ اسید بلو ۹۲ جذب شده به‌ازای جرم جاذب یا q_e (mg/g) با استفاده از معادله (۲) تعیین شد.

$$q_e\left(\frac{mg}{g}\right) = \frac{C_0 - C_e}{M_S} V \qquad (۲)$$

که C_0 و C_e: به‌ترتیب غلظت‌های اولیه و تعادلی رنگ در فاز مایع برحسب (mg/l)، V: حجم محلول (L) و M: مقدار جاذب مورد استفاده (g) هستند (Bazrafshan et al., 2015).

ایزوترم‌های جذب به توصیف چگونگی توزیع رنگ بین فاز جذب شونده و جاذب کمک می‌کند و معیاری از موقعیت تعادل در فرایند جذب است. مدل‌های ایزوترم زیادی برای تحلیل داده‌های تجربی و توصیف تعادل در جذب مانند لانگمویر، فروندلیچ، دوبینین-رادوشکویچ و تمکین وجود دارد. این مدل‌ها دیدگاهی راجع به مکانیسم جذب، خواص سطحی، تمایل جاذب و توصیف داده‌های تجربی جذب را ارائه می‌دهند. بنابراین، ایجاد یک ارتباط مناسب بین شکل‌های تعادل برای بهینه نمودن شرایط و طراحی سیستم‌های جذب بسیار حائز اهمیت است. سپس داده‌های حاصل از فرایند جذب با ایزوترم‌های فروندلیچ، لانگمویر، تمکین و دوبینین-رادوشکویچ برازش شدند. تبعیت از هر مدل ایزوترم با بررسی ضریب همبستگی (R^2) مشخص می‌شود (Bazrafshan et al., 2015). مهم‌ترین فرضیات علمی مدل ایزوترم لانگموئر این است که مواد جذب شونده به نقاط مشخص و یکسان بر روی سطح نانوذره متصل شده، جذب به‌صورت تک لایه‌ای صورت می‌گیرد و اثر متقابلی بین مولکول‌های جذب شونده وجود ندارد. معادله ایزوترم لانگموئر با رابطه (۳) ارائه شده است.

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{q_m K_l}\frac{1}{C_e} \qquad (۳)$$

که q_e: مقدار رنگ جذب شده به‌ازای مقدار مشخصی از جاذب، C_e: غلظت رنگ (mg/l)، K_L: ثابت جذب ایزوترم و q_m: حداکثر ظرفیت جذب (mg/g) هستند. مقادیر ثابت q_m و K_L با رسم نمودار $\frac{1}{q_e}$ در برابر $\frac{1}{C_e}$ حاصل می‌شود.

مطلوبیت جذب با استفاده از مقادیر فاکتور بدون بعد R_L (رابطه (۴)) تعیین می‌شود. مقادیر R_L>۱ جذب نامطلوب، R_L=۱ جذب خطی، R_L=۰ جذب برگشت ناپذیر و ۰< R_L<۱ جذب مطلوب را نشان می‌دهد (Rahdar et al., 2019b).

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_O} \quad (۴)$$

ایزوترم فروندلیچ جذب سطحی آلاینده را بر روی سطح جاذب به‌صورت ناهمگن با توزیع غیر یکنواختی از گرمای جذب بر روی سطح جاذب توسط معادله (۵) بیان می‌کند.

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n}\log C_e \quad (۵)$$

ثابتهای ایزوترم فروندلیچ K_F و $\frac{1}{n}$ با رسم نمودار log q_e در برابر Log C_e تعیین می‌شود که K_F عرض از مبدا و $\frac{1}{n}$ شیب خط هستند. با استفاده از ثابت $\frac{1}{n}$ نوع فرایند تفسیر می‌شود که اگر $\frac{1}{n}$=۰ باشد برگشت ناپذیر، ۰<$\frac{1}{n}$<۱ مطلوب و اگر $\frac{1}{n}$>۱ نامطلوب است (قاجاریه و همکاران، ۱۳۹۶). در مدل تمکین، رابطه (۶)، با درنظر گرفتن برهم‌کنش‌های احتمالی موجود بین جذب شونده - جذب شونده و گونه‌های جذب شونده - جاذب بیان می‌شود.

$$q_e = B \ln K_T + B \ln C_e \quad (۶)$$

که B: مرتبط با انرژی جذب ($B = \frac{RT}{b}$) و T: دما برحسب (°K)، R: ثابت جهانی گازها (۸/۳۱۴ $J/mol.k^{-1}$) هستند (احمدآبادی و همکاران، ۱۳۹۵). برای تعیین ماهیت فرایند جذب (فیزیکی یا شیمیایی فرآیند)، از ایزوترم دوبینین-رادوشکویچ (D-R) طبق معادله (۷) استفاده می‌شود.

$$\log q_e = \ln q_m - \beta\varepsilon^2 \quad (۷)$$

که q_m: ظرفیت تک لایه‌ای ایزوترم D-R (mg/g)، ε: پتانسیل پولانی که وابسته به غلظت تعادل است (KJ/mol) و β: عدد ثابت که وابسته به انرژی و رابطه (۸) نشان دهنده ضریب متوسط انرژی است.

$$E_a = \frac{1}{\sqrt{-2\beta}} \quad (۸)$$

که E_a: انرژی آزاد برای انتقال یک مول از رنگ از توده محلول به سطح جاذب است.

در مدل ایزوترم دوبینین-رادوشکویچ، اگر مقدار انرژی جذب برحسب (kJ/mol)، کمتر از ۸ باشد جذب از نوع فیزیکی و ناشی از نیروهای ضعیف واندروالس است، اگر در محدوده ۸ تا ۱۶ باشد جذب رنگ اسید بلو ۹۲ توسط نانوذره با مکانیسم تبادل یون صورت می‌گیرد و اگر E_a بین ۲۰-۴۰ باشد جذب شیمیایی صورت گرفته است (Tahir and Rauf, 2006).

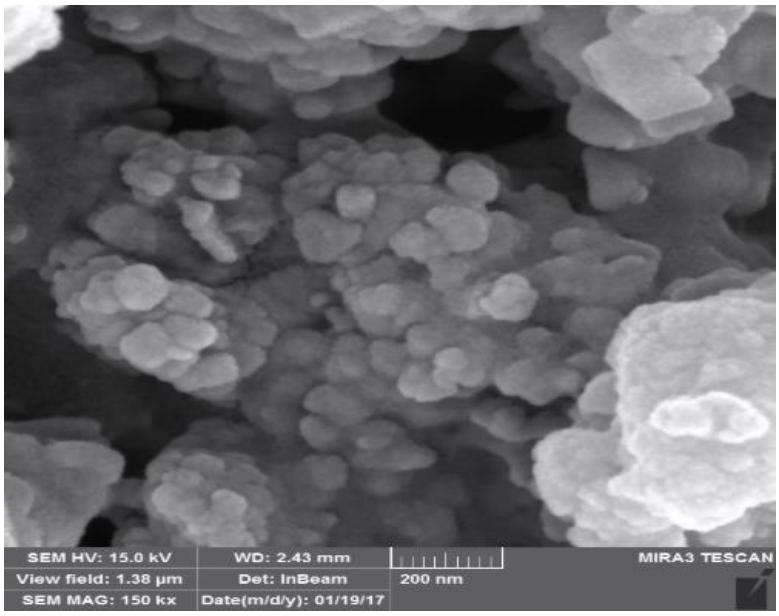
یکی از فاکتورهای مهم در طراحی سیستم جذبی، پیش‌بینی سرعت جذب است. سینتیک جذب، به ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی جاذب بستگی دارد که موثر بر فرآیند جذب است. معادله لاگرگرین شبه مرتبه اول، معادله (HO) شبه مرتبه دوم و معادله نفوذ بین ذره‌ای اندازه‌گیری شد و این معادلات برای تشریح رفتار انتقال مولکول‌های رنگ جذب شونده در واحد زمان و متغیرهای موثر برسرعت واکنش به‌کار می‌رود (Rahdar et al., 2019). پارامترهای مورد بررسی و معادلات سینتیک جذب در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- پارامترها و معادلات سینتیک جذب (Rahdar et al., 2019c)

مدل سینتیک	معادله سینتیک	پارامترها	رسم نمودار
لاگرگرین	$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303}$	K_f (1/min) q_e (mg/g) R^2	$\log(q_e - q_t)$ vs t
هو	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$	K_2 (g/mg min) q_e (mg/g) R^2	$\frac{t}{q_t}$ vs t
نفوذ بین ذره‌ای	$q_t = k_p t^{1/2} + C$	K (mg/g/min$^{1/2}$) C (mg/g) R^2	q_t vs $t^{0.5}$

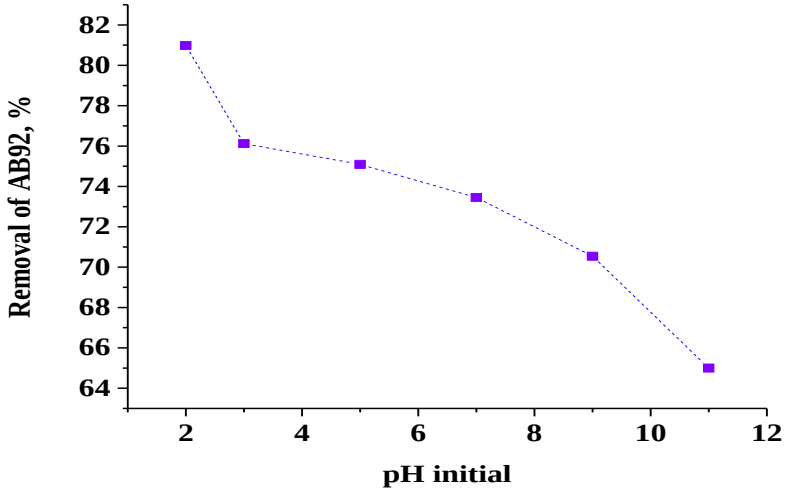
۳- یافته‌ها

مورفولوژی نانوذرات $Fe_3O_4@SiO_2$ با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری مطالعه شد که در شکل ۲ نشان داده می‌شود. تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری حاصل از نانوذرات نشان می‌دهد که شکل نانوذرات تقریبا کروی اند. pH یکی ازفاکتورهای قابل‌ملاحظه و تاثیرگذار بر فرایند جذب بوده، تعیین‌کننده بار متغیر پروتونی سطح جاذب است، بر خواص الکتریکی جاذب تاثیرگذار بوده و در نتیجه بر روی کارایی فرایند جذب تاثیر ویژه‌ای دارد (Duan and Su, 2014).



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانوذرات

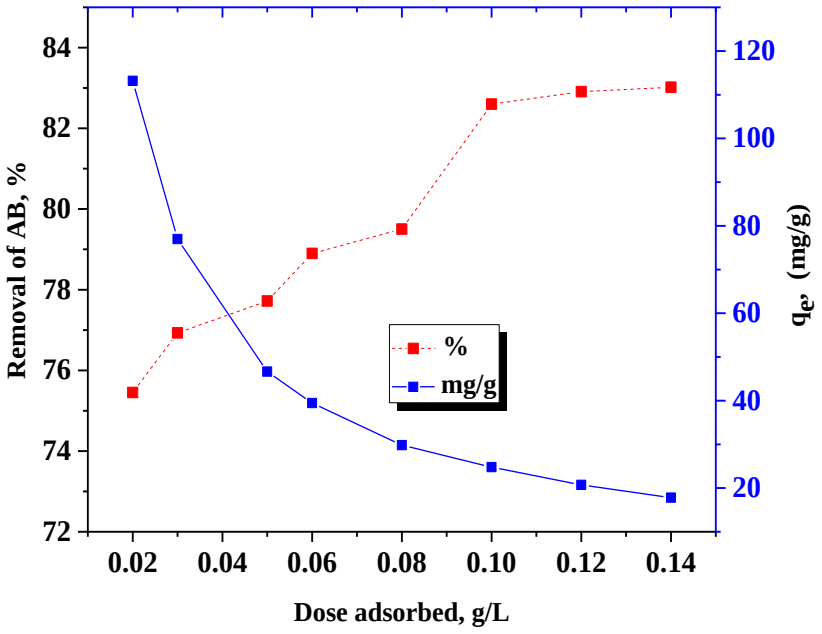
برای تعیین pH بهینه در حداکثر جذب رنگ اسید بلو ۹۲ و جذب تعادلی، غلظت رنگ ۵۰ mg/L در محدوده pH (۲۱-۱۱)، در مدت زمان ۶۰ دقیقه و دوز جاذب ۰/۰۸ g/L مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل در شکل ۳ ارائه شده است. حداکثر حذف نیترات در pH محلول ۲ است و راندمان حذف معادل ۸۰/۹۸٪ است. با افزایش مقادیر pH از ۲ به ۱۱، درصد حذف رنگ از ۸۰/۹۸٪ به ۶۵٪ کاهش می‌یابد. جذب رنگ بر روی سطح نانوذره به‌شدت وابسته به pH است.



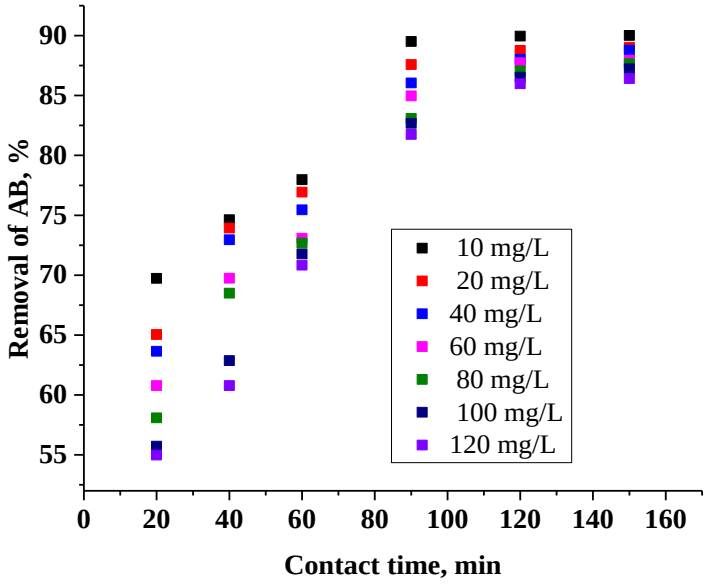
شکل ۳- اثر pH های مختلف بر حذف رنگ اسید بلو ۹۲ توسط نانوذره $Fe_2O_3@SiO_2$ (غلظت اولیه رنگ ۵۰mg/l میلی‌گرم در لیتر، دوز جاذب g/l ۰/۰۸، زمان تماس min ۶۰ و درجه حرارت ۲۵ سانتی‌گراد)

شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش دوز جاذب (۰/۰۲-۰/۱۴ گرم بر لیتر) درصد حذف از ۷۵/۴۵٪ به ۸۳/۰۵٪ افزایش می‌یابد. حداکثر حذف در دوز جاذب ۰/۱ g/L (۸۲٪/۶۲- ۲۴/۷۸ mg/g) مشاهده شده است. از طرف دیگر با افزایش دوز جاذب ظرفیت، جذب رنگ کاهش می‌یابد و از ۱۱۳/۱۷۵ mg/g به ۱۷/۷۹ mg/g می‌رسد.

اثر زمان تماس و غلظت اولیه رنگ اسید بلو ۹۲ بر روی جذب آن به‌عنوان یک پارامتر مهم مطرح است. عملکرد زمان تماس (۱۵۰-۲۰min) در غلظت‌های اولیه رنگ (۱۲۰-۱۰ mg/L) با pH محلول ۲ و دوز جاذب ۰/۱ g/L مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت رنگ، حذف کاهش یافته و از ۶۸/۹۵٪ به ۶۳/۸۷٪ می‌رسد. جذب رنگ در ابتدای فرایند سریع بوده و با گذشت زمان به‌تدریج کاهش یافته و در مدت زمان تماس ۹۰ دقیقه با راندمان حذف ۸۹/۵۱٪ به تعادل می‌رسد.



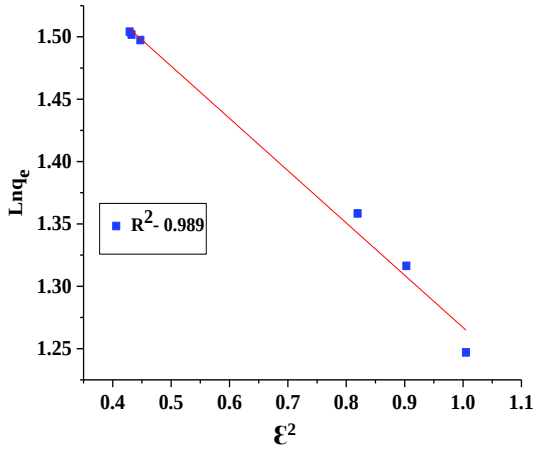
شکل ۴- اثر دوز جاذب بر حذف رنگ اسید بلو ۹۲ توسط نانوذره $Fe_2O_3@SiO_2$ (غلظت اولیه رنگ ۵۰ mg/l میلی‌گرم در لیتر، pH=۲، زمان تماس ۶۰ min و درجه حرارت ۲۵ سانتی‌گراد)



شکل ۵- اثر زمان‌های تماس مختلف و غلظت‌های مختلف بر حذف رنگ اسید بلو ۹۲ توسط نانوذره $Fe_2O_3@SiO_2$ (pH=۲، دوز جاذب ۰/۱ g/l و درجه حرارت ۲۵ سانتی‌گراد)

۱-۳- ایزوترم و سینتیک جذب

ضرایب همبستگی و ضرایب ثابت ایزوترم‌های لانگمویر، فروندلیچ، تمکین و دوبینین-رادوشکویچ حاصل از داده‌های فرایند جذب رنگ اسید بلو ۹۲ توسط نانوذره $Fe_2O_3@SiO_2$ در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است میزان R^2 در ایزوترم دوبینین-رادوشکویچ (۰/۹۸۹) بالاتر از بقیه ایزوترم‌ها است. بنابراین فرایند جذب از ایزوترم دوبینین-رادوشکویچ تبعیت می‌کند که در شکل ۶ ارائه شده است. مقدار R_L برای ایزوترم لانگمویر کمتر از ۱ به‌دست آمد که نشان‌دهنده جذب مطلوب رنگ است. مقدار محاسبه شده برای ایزوترم فروندلیچ در محدوده $0<\frac{1}{n}<1$ بوده و جذب مطلوب است. مقدار ثابت Ea برای حذف رنگ کمتر از ۸ است که نشان‌دهنده جذب فیزیکی رنگ اسید بلو ۹۲ توسط نانوذره $Fe_2O_3@SiO_2$ است.

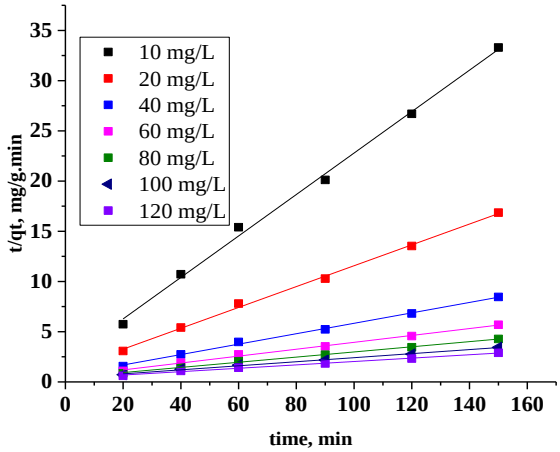


شکل ۶- ایزوترم دوبینین-رادوشکویچ

جدول ۲- پارامترهای ایزوترم‌های لانگمویر، فروندلیچ، تمکین و دوبینین-رادوشکویچ (غلظت بهینه رنگ ۱۰ میلی گرم بر لیتر، pH: ۲، زمان تماس ۹۰ دقیقه، دوز نانوذره $Fe_2O_3@SiO_2$ ۰/۱ گرم بر لیتر)

مدل ایزوترم	پارامترها	مقادیر
لانگمویر	K_L (L/mg)	۳/۶۰
	q_m (mg/g)	۳/۲۸
	R^2	۰/۹۴۷
فروندلیچ	K_f (mg/g)	۴/۵۱
	N	۴/۶۳
	R^2	۰/۹۸۴
تمکین	K_T	۰/۰۱۰
	B	۱/۱۳۶
	R^2	۰/۹۸۸
رادوشکویچ-دوبینین	β	۰/۴۱۹
	q_m (mg/g)	۱/۶۸۶
	R^2	۰/۹۸۹

ضرایب همبستگی و ضرایب ثابت مدل‌های سنینتیک درجه اول (لاگرگرین)، سینتیک درجه دوم (هو) و سینتیک نفوذ بین ذره‌ای حاصل از داده‌های فرایند جذب رنگ اسید بلو ۹۲ توسط نانوذره $Fe_2O_3@SiO_2$ در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است میزان R^2 در مدل سینتیک هو بالاتر از بقیه مدل‌های سینتیک است. بنابراین فرایند جذب از سینتیک درجه دوم تبعیت می‌کند که در شکل ۷ ارائه شده است.



شکل ۷- سینتیک درجه دوم

جدول ۳- پارامترها و ضریب همبستگی سینتیک‌های جذب حذف غلظت‌های متفاوت رنگ اسید بلو ۹۲ توسط نانوذره $Fe_2O_3@SiO_2$

مدل سینتیک	۱۰ mg/L	۲۰ mg/L	۴۰ mg/L	۶۰ mg/L	۸۰ mg/L	۱۰۰ mg/L	۱۲۰ mg/L
مدل سینتیک لاگرگرین							
K_f (1/min)	۰/۰۴۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴۱
q_e (mg/g)	۰/۰۰۰۳	۲/۱۶۹	۸/۴۳۸	۱۳/۸۷۹	۱۹/۶۰۱	۲۳/۲۶۸	۲۸/۰۱۴
R^2	۰/۸۷۵	۰/۸۱۶	۰/۸۵۶	۰/۸۷۰	۰/۸۷۱	۰/۸۸۲	۰/۸۸۴
مدل سینتیک هو							
K_2 (g/mg min)	۲/۱۴۸	۱/۱۸۷	۰/۶۴۷	۰/۵۰۹	۰/۴۱۷	۰/۳۹۶	۰/۳۴۸
q_e (mg/g)	۰/۲۰۶	۰/۱۰۳	۰/۵۱۹	۰/۰۳۴۳	۰/۰۲۵۷	۰/۰۲۰۲	۰/۰۱۶۸
R^2	۰/۹۹۶	۰/۹۹۷	۰/۹۹۷	۰/۹۹۶	۰/۹۹۷	۰/۹۹۶	۰/۹۹۴
مدل سینتیک نفوذ بین ذره‌ای							
K ($mg/g/min^{1/2}$)	۲/۷۰۲	۲/۲۱۲	۱/۵۸۵	۱/۱۲۳	۰/۶۷۳۶	۰/۳۲۵	۰/۱۴۷
C (mg/g)	۲۰/۹۶	۱۸/۳۱	۱۶/۹۰	۱۳/۶۰	۱۰/۰۶۸	۵/۲۳۸	۲/۸۳۴
R^2	۰/۹۵۴	۰/۹۵۹	۰/۹۶۰	۰/۹۴۷	۰/۹۴۴	۰/۹۲۹	۰/۹۱۴

۴- بحث و نتیجه گیری

مکانیسم حذف آلاینده توسط نانوذره از نوع شیمیایی است. در pH های اسیدی، تراکم یون H^+ بر روی سطح نانوذره افزایش یافته و به‌این ترتیب میزان حذف رنگ AB92 که یک رنگ آنیونی است افزایش می‌یابد (سمرقندی و همکاران، ۱۳۸۹). علاوه‌بر این نانوذره دارای سیلیس و اکسید آهن است که در محلول‌های آبی به‌صورت یون‌های Fe و Si^{2+} حضور دارد. در pH پایین و در حضور یون H^+ ، گروه‌های سیلیس موجود در ساختار نانوذره با گرفتن پروتون از H^+ تبدیل به گونه‌های Si^{3+} می‌شوند. هم‌چنین در محیط اسیدی، سطح اکسیدهای آهن مثبت شده که این دلایل باعث افزایش تعداد یون‌های منفی رنگ بر روی سطح نانوذره و جذب رنگ می‌شود (Shahmoradi et al., 2015). در مطالعه‌ای، pH بهینه معادل ۳ برای حذف رنگ اسید آبی ۹۲ بود (Balarak et al., 2016). هم‌چنین در مطالعه Shanthi et al. (2014) برای حذف رنگ توسط ضایعات پوست Sterculia quadrifida مقدار pH بهینه معادل ۲ بود که با این مطالعه مطابقت دارد.

همان‌طور که در نتایج بیان شده، با افزایش دوز نانوذره $Fe_2O_3@SiO_2$ کارایی حذف رنگ AB92 افزایش می‌یابد. علت افزایش راندمان با افزایش جرم جاذب، وجود تعداد بالای سایت‌های فعال نانوذرات است که تعداد یون‌های رنگ به‌دام افتاده در فاز جاذب را افزایش می‌دهد (احمدآبادی و همکاران، ۱۳۹۵). به‌عبارت دیگر در واقع سطح موجود برای جذب تبادلی که در اختیار رنگ است افزایش می‌یابد و با افزودن دوز مشخصی از نانوذره، حداکثر جذب رنگ حاصل می‌شود (Li et al, 2017). هم‌چنین افزایش بیشتر مقدار نانوذره (با توجه به ثابت بودن غلظت رنگ) و در نتیجه افزایش سایت‌های فعال آزاد، باعث خالی ماندن تعدادی از سایت‌ها شده و عدم اشغال آن‌ها می‌شود. به‌همین خاطر درصد جذب تقریبا ثابت مانده و ظرفیت جذب کاهش می‌یابد (احمدآبادی و همکاران، ۱۳۹۵). اما دلیل کاهش ظرفیت جذب با افزایش دوز نانو ذره، کاهش نسبت رنگ اسید بلو جذب شونده به مقدار نانوذره و هم‌چنین اشباع نشدن برخی از سایت‌های موجود در سطح جاذب است (Fazlzadeh et al., 2017). تجمع مولکولی جاذب در دوزهای بالاتر منجر به افزایش طول مسیر انتشار و کاهش سطح تماس می‌شود (قاجاریه و همکاران، ۱۳۹۶). مطالعات انجام شده توسط احمدآبادی و همکاران (۱۳۹۵) و Rahdar et al. (2016) در کاهش رنگ بازیک رد ۱۸و متیلن بلو با استفاده از جاذب‌های طبیعی نشان داد که با افزایش غلظت نانو ذره کارایی حذف افزایش می‌یابد.

غلظت رنگ یکی دیگر از پارامترهای مهم و مطرح در فرایند حذف رنگ است و با افزایش غلظت اولیه رنگ AB92 راندمان حذف رنگ توسط نانوذره به‌علت اشباع شدن سایت‌های خالی موجود بر روی سطح نانوذره در غلظت‌های بالای رنگ کاهش می‌یابد. شکل ۶ نشان داد که راندمان حذف رنگ با گذشت زمان تماس برای تمام غلظت‌ها (۱۰-۱۵۰ mg/L) افزایش یافت. هم‌چنین نتایج نشان داد که زمان رسیدن به تعادل برای تمام غلظت‌های رنگ یکسان است و میزان حذف در ابتدای فرآیند احتمالا به‌دلیل وجود سایت‌های خالی بسیار بالا برروی سطح نانوذرات و افزایش احتمال برخورد مولکول‌های رنگ با سطح نانوذره بالا است. لذا جذب سریع رخ می‌دهد و با گذشت زمان این سایت‌ها به‌طور تدریجی توسط مولکول‌های رنگ اشغال شده و میزان جذب به‌دلیل وجود نیروی دافعه بین مولکول‌های رنگ موجود بر روی سطح نانوذره و رنگ موجود در محلول کاهش می‌یابد. این یافته را مطالعات انجام شده توسط Osma et al. (2007) و Bazrafshan et al. (2015) نیز تایید می‌کند. در مطالعه Balarak et al. (2016) زمان تماس بهینه برای حذف رنگ اسید آبی ۹۲، ۹۰ دقیقه بوده است.

نتایج معادلات سینتیکی نشان داد که سینتیک مدل شبه

درجه دوم برای این فرایند با بالاترین ضریب همبستگی، معتبرتر است. ایزوترم‌های جذب، مهم‌ترین پارامتر در طراحی سیستم‌های جذب و توصیف کننده رابطه بین غلظت ماده جذب شونده و ظرفیت جذب یک جاذب است (غفوری و نقی‌زاده، ۱۳۹۴). اساس ایزوترم‌ها در توصیف رفتارهای جزء جذب شونده و جاذب و هم‌چنین ارائه مهم‌ترین طرح از نوع جذب است. در مدل لانگمویر، یک لایه از مولکول‌های ماده حل شده، جذب جاذب شده و در تمامی سطوح جاذب، مقدار انرژی جذب یکسان و پیوندهای جذب، برگشت‌پذیر فرض می‌شوند. در مدل فروندلیچ، مناطق موجود روی سطح جسم جاذب، یکنواخت نبوده و قدرت جذب متفاوتی دارند. ایزوترم دوبینین-رادوشکویچ ماهیت فرایند جذب را مشخص نمود (Bazrafshan et al., 2015). ضریب همبستگی مدل دوبینین-رادوشکویچ که بالاتر از سایر مدل‌ها بود، نشان می دهد که مدل دوبینین-رادوشکویچ برای توصیف تعادل جذب رنگ اسید بلو ۹۲ بر روی نانوذره $Fe_2O_3@SiO_2$ مناسب است. مطالعات مشابه دیگری که محققان در زمینه حذف رنگ اسیدآبی ۹۲ انجام داده اند در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: نتایج مطالعات مشابه حذف رنگ اسید آبی ۹۲ توسط جاذب‌های مختلف

مرجع	شرایط بهینه	سینتیک جذب	ایزوترم جذب	جاذب
Shanthi et al. (2014)	pH: 2 غلظت رنگ: ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر	سینتیک درجه دوم	لانگمویر	Sterculia quadrifida Seed Shell Waste
Balarak et al. (2016)	pH: 3 زمان تماس: ۹۰ دقیقه غلظت رنگ: ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر دوز جاذب: ۷ گرم بر لیتر	سینتیک درجه دوم	لانگمویر	Modified Azolla Filicoloides
Khalighi et al. (2012)	pH: 2 زمان تماس: ۹۰ دقیقه غلظت رنگ: ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر دوز جاذب: ۰/۱ گرم بر لیتر	سینتیک درجه دوم	بت	Modified Diatomite by Nickel Oxide Nanoparticles
مطالعه حاضر	pH: 2 زمان تماس: ۹۰ دقیقه غلظت رنگ: ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر دوز نانوذره: ۰/۱ گرم بر لیتر	سینتیک درجه دوم	دوبینین-رادوشکویچ	$Fe_2O_3@SiO_2$ nanoparticle

۵- نتیجه گیری

این تحقیق نشان داد که نانوذره $Fe_2O_3@SiO_2$ می‌تواند یک جاذب موثر در حذف رنگ اسید بلو ۹۲ از پساب‌های نساجی باشد. ۰/۱ g/l نانوذره مورد مطالعه به‌عنوان مقدار بهینه جاذب و غلظت بهینه رنگ ۱۰ mg/l بود. نتایج بیانگر این مطلب است که مدل شبه درجه دوم برای چنین فرایند جذبی مناسب بوده و کارایی فرایند با دوز جاذب و زمان تماس، رابطه مستقیم و با غلظت رنگ‌زا و pH رابطه معکوس داشت. نتایج حاصل از مطالعات ایزوترمی نشان داد که ضریب همبستگی معادله ایزوترمی دوبینین-رادوشکویچ در حد نسبتاً بالایی (R^2=۰/۹۸۹) قرار دارد. می‌توان نتیجه گرفت که نانوذره $Fe_2O_3@SiO_2$ در حذف رنگ‌زای اسید بلو ۹۲ از پساب‌های نساجی کارایی بالایی دارد.

۶- مراجع

احمدآبادی، م.، رهدار، س.، و تقوی، م.، (۱۳۹۵)، "بررسی حذف رنگ بازیک رد ۱۸ از محلول‌های آبی با استفاده از خاکستر پوست بادام زمینی"، *مجله طنین سلامت*، ۴(۲)، ۲۱-۳۲.

باقرپور سرد صحرا، ف.، شریعتی نیا، ز.، شکرریز، ش.، و محمودی، ن.م.، (۱۳۹۴)، "سنتز نانوذرات مخلوط اکسیدهای فلزی لانتان ـ روی ـ آلومینات با روش احتراقی و تاثیرشان در رنگ‌بری رنگ‌زاهای اسید آبی ۹۲ و راکتیو آبی"، *علوم و فناوری رنگ*، ۹(۲)، ۱۴۵-۱۵۷.

رضایی مفرد، م.ح.، میران زاده، م.ب.، پورقلی، م.، اکبری، ح.، و دهقانی، ر.، (۱۳۹۲)، "بررسی تأثیر روش‌های اکسیداسیون پیشرفته بر حذف رنگ از فاضلاب صنایع نساجی"، *مجله علمی پژوهشی فیض دانشگاه علوم پزشکی کاشان*، ۱۷(۱)، ۳۲-۳۹.

عبدالله زاده، ح.م، علیزاده، ب.، خسروی، د.، و فضل زاده، م.، (۱۳۹۵)، "بررسی کارایی نانورس اصلاح شده با EDTA در حذف هیومیک اسید از محلول‌های آبی"، *مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران*، ۲۶(۱۳۹)، ۱۱۱-۱۲۵.

سمرقندی، م.ح.، نوری سپهر، م.، ضرابی، م.، نوروزی م.، شاهرخی، ا.، و امرائی، ف.، (۱۳۸۹)، "بررسی کارایی و مکانیسم حذف رنگ اسید بلاک ۱ با استفاده از جاذب معدنی پامیس"، *فصلنامه سلامت و محیط زیست*، ۳(۴)، ۳۹۹-۴۱۱.

علی‌دادی، ح.، کریمیان، ح.، بذرافشان، ا.، نجف پور،ع.ا.، و رافع، ش.، (۱۳۹۳)، "بررسی کارایی نانولوله کربن چند جداره و خاکستر حاصل از زائدات درخت خرما در حذف رنگ از فاضلاب نساجی"، *مجله پژوهش در بهداشت محیط*، ۱(۱)، ۱۹-۱۰.

غفوری، م.، نقی زاده، ع.، (۱۳۹۴)، "بررسی ایزوترم، سینتیک و ترمودینامیک فرآیند حذف اسید هیومیک توسط نانوکیتوزان از محیطهای آبی"، دانشگاه علوم پزشکی بیرجند، ۳(۲۳)، ۲۳۴-۲۲۲.

قاجاریه، ع.، فریزاده، خ.، و حسین‌خانی، م.، (۱۳۹۶)، "استفاده از نانوذرات آهن در سنتز هیدروژل مهره‌های مغناطیسی جهت حذف رنگ‌زای بازیک آبی ۱۵۹ از محیطهای آبی"، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۸(۵)، ۱۲-۲۱.

Abou-Gamra, Z.M., and Ahmed, M.A., (2015), "TiO_2 nanoparticles for removal of malachite green dye from waste water", *Advances in Chemical Engineering and Science*, 5(03), 373.

Ahmadi, S., Igwegbe, C.A., and Rahdar, S., (2019), "The application of thermally activated persulfate for degradation of Acid Blue 92 in aqueous solution", *International Journal of Industrial Chemistry*, 10(3), 249-260

Alizadeh, M., Mahvi, A.H., and Mansoorian, H.J., (2014), "The survey of electrocoagulation process for removal dye reactive orange 16 from aqueous solutions using sacrificial iron electrodes", *Iranian Journal of Health, Safety and Environment*, 1(1), 1-8.

Balarak, D., Mandavi, Y., Bazrafshan, E. and Mahvi, A.H., (2016), "Kinetic, isotherms and thermodynamic modeling for adsorption of acid blue 92 (ab92) from aqueous solution by modified azolla filicoloides", *Fresenius Environmental Bulletin*, 25(5), 1322-1331.

Bazrafshan, E., Kord Mostafapour, F., Rahdar, S., and Mahvi, A.H., (2015), "Equilibrium and thermodynamics studies for decolorization of Reactive Black 5 (RB5) by adsorption onto MWCNTs", *Desalination and Water Treatment*, 54(8), 2241-2251.

Duan, J., and Su, B., (2014), "Removal characteristics of Cd (II) from acidic aqueous solution by modified steel-making slag", *Chemical Engineering Journal*, 246, 160-167.

Kaur, H., and Kaur, R., (2014), "Removal of rhodamine-B dye from aqueous solution onto pigeon dropping: Adsorption, kinetic, equilibrium and thermodynamic studies", *Journal of Materials and Environmental Science*, 5(6), 1830-1838.

Khalighi, S.R., Khosravi, N.M., Badii, K.H., and Yousefi, L.N., (2012), "Adsorption of acid blue 92 dye on modified diatomite by nickel oxide nanoparticles in aqueous solutions", Progress in Color, Colorants and Coating, 5, 101-116.

Li, P., Lin, K., Fang, Z. and Wang, K., (2017), "Enhanced nitrate removal by novel bimetallic Fe/Ni nanoparticles supported on biochar", *Journal of Cleaner Production*, 151, 21-33.

Osma, J.F., Saravia, V., Toca-Herrera, J.L., and Couto, S.R., (2007), "Sunflower seed shells: A novel and effective low-cost adsorbent for the removal of the diazo dye reactive black 5 from aqueous solutions", *Journal of Hazardous Materials*, 147(3), 900-905.

Park, S.I., Lim, J.H., Kim, J.H., Yun, H.I., Roh, J.S., Kim, C.G., and Kim, C.O., (2004), " Effects of surfactant on properties of magnetic fluids for biomedical application", *Physica Status Solidi* (b), 241(7), 1662-1664.

Rahdar, S., Igwegbe, C.A., Ghasemi, M., and Ahmadi, S., (2019a), "Degradation of aniline by the combined process of ultrasound and hydrogen peroxide (US/H_2O_2)", *MethodsX*, 6, 492-499.

Rahdar, S., Rahdar, A., Zafar, M.N., Shafqat, S.S., and Ahmadi, S., (2019b), "Synthesis and characterization of MgO supported Fe–Co–Mn nanoparticles with exceptionally high adsorption capacity for Rhodamine B dye", *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 3800-3810.

Rahdar, A., Rahdar, S., Ahmadi, S., and Fu, J., (2019c), "Adsorption of ciprofloxacin from aqueous environment by using synthesized nanoceria", *Ecological Chemistry and Engineering*, 26(2), 299-311.

Shahmoradi, B., Maleki, A., and Byrappa, K., (2015), "Removal of disperse orange 25 using in situ surface-modified iron-doped TiO_2 nanoparticles", *Desalination and Water Treatment*, 53(13), 3615-3622.

Shanthi, P., Karthik, M., Venkatachalam, K.J., and Karthikeyan, S., (2014), "Adsorption of acid blue 92 from aqueous solution using an activated carbon prepared from sterculia quadrifida seed shell waste", *Journal of Water and Environmental Nanotechnology*, 3(4), 96-104.

Srivastava, S., Sinha, R., and Roy, D., (2004), "Toxicological effects of malachite green", *Aquatic Toxicology*, 66(3), 319-329.

Srivastava, V.C., Mall, I.D., and Mishra, I.M., (2006), "Equilibrium modelling of single and binary adsorption of cadmium and nickel onto bagasse fly ash", *Chemical Engineering Journal*, 117(1), 79-91.

Tahir, S.S., and Rauf, N., (2006)," Removal of a cationic dye from aqueous solutions by adsorption onto bentonite clay", *Chemosphere*, 63(11), 1842-1848.

Taimoory, S.M., Rahdar, A., Aliahmad, M., Sadeghfar, F., Hajinezhad, M.R., Jahantigh, M., Shahbazi, P., and Trant, J.F., (2018), "The synthesis and characterization of a magnetite nanoparticle with potent antibacterial activity and low mammalian toxicity", *Journal of Molecular Liquids*, 265, 96-104.