JARC

مقاله علمی -پژوهشی

بهینه‌سازی برجذب رنگ آنیونی قرمز کنگو بر چندسازه روی اکسید/نقطه‌های کوانتومی کربنی با روش سطح‌پاسخ

فهیمه جامی[۱]، زهرا یاوری[۲و*] و حمیده سراوانی[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.
۲. استادیار گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.
۳. استاد گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

دریافت: دی ۱۴۰۳ بازنگری: اردیبهشت ۱۴۰۴ پذیرش: اردیبهشت ۱۴۰۴

https://doi.org/10.30495/JACR1.1404.1196793

چکیده

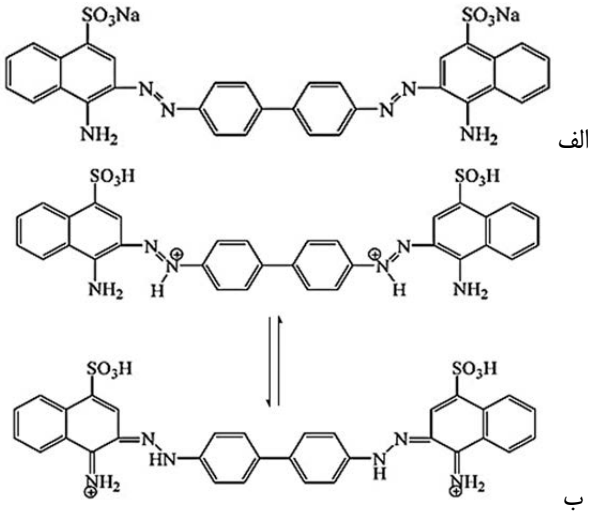
حذف آلاینده‌های رنگی از پساب واحدهای نساجی همواره چالش برانگیز است. فرایند برجذب، روش کارآمد و مناسبی برای حذف آلاینده‌ها است. در پژوهش حاضر، روی اکسید متخلخل با سنتز احتراقی در محلول تهیه و سپس، نقطه‌های کوانتومی کربنی، از آب لیمو و آب پیاز، داخل حفره‌ها و سطح روی اکسید بارگذاری شدند. پراش پرتو ایکس، سنتز روی اکسید در سامانه بلوری شش‌گوشه‌ای را تأیید کرد. چندسازه به‌دست‌آمده، برای حذف قرمز کنگو از محلول آبی به‌کارگرفته شد. تأثیر pH، زمان، دما و غلظت قرمز کنگو بر بازده حذف آن در حضور چندسازه سنتزی، به‌کمک طراحی آزمایش با نرم افزار Design Expert 12 و روش سطح‌پاسخ مطالعه شد. با گرما-دهی جاذب سیر از رنگ، روی اکسید بازیابی و دوباره نقطه‌های کوانتومی کربنی بر آن بارگذاری شدند. بیشینه درصد حذف آلاینده قرمز کنگو (برابر ۹۷/۳۹ درصد) در pH برابر با ۶، دما ۵۰ درجه سلسیوس، زمان ۳۰ دقیقه و غلظت اولیه رنگ ppm ۳۰ به‌دست آمد. پس از پنج بار بازیابی بستر اکسیدی، درصد حذف رنگ از ۸۸/۵۸ به ۶۷/۴۱ کاهش یافت. تعیین غلظت قرمز کنگو باقی‌مانده پس از برجذب، با طیف‌سنجی UV-Vis نشان داد که چندسازه دو جزئی روی اکسید و نقطه‌های کوانتومی کربنی می‌تواند برای حذف مؤثر آلاینده قرمز کنگو در پساب واحدهای نساجی به‌کارگرفته شود.

واژه‌های کلیدی: قرمز کنگو، جاذب متخلخل، نقطه کوانتومی کربنی، پساب نساجی، روش سطح‌پاسخ

* **عهده‌دار مکاتبات:** z_yavari@chem.usb.ac.ir

مقدمه

یکی از مصرف‌کنندگان عمده آب در روند تولید، واحدهای نساجی است. پساب این صنایع، مقدارهای قابل‌توجهی رنگدانه‌های آلی دارد [۱]. بیشتر رنگ‌های سنتزی، مولکولی با ساختار پیچیده و آروماتیک دارند که از دید زیست‌محیطی پایدار هستند و به‌آسانی، در طبیعت تجزیه نمی‌شوند [۲]. ترکیب رنگ‌زای بنزیدین دی‌آزو-بیس-۱-نفتیل‌آمین-۴-سولفونیک اسید، به‌طورمعمول به فرم نمک سدیمی است و با نام تجاری قرمز کنگو شناخته می‌شود. هنگام سنتز این ترکیب، پیوند بیس‌دی‌آزونیم‌بنزیدین به نفتیونیک اسید رخ می‌دهد [۳]. همچنین، قرمز کنگو به‌عنوان جوهر و شناساگر اسید-باز کاربرد دارد. زیرا به‌ترتیب، در محلول‌های اسیدی و قلیایی، به دو رنگ متفاوت آبی (شکل ۱-الف) و قرمز (شکل ۱-ب) دیده می‌شود [۴].



شکل ۱ ساختار قرمز کنگو در pH کمتر از ۵/۵ (الف) و بیشتر از ۵/۵ (ب) [۴]

قرمز کنگو، ساختار آنیونی و آزو دارد و در محیط‌های آبی و آلی به‌خوبی حل می‌شود. به‌دلیل سرطان‌زایی، کاربرد این رنگ محدود است؛ ولی در بعضی واحدهای نساجی همچنان از قرمز کنگو برای رنگرزی استفاده می‌شود. در محلول‌های آبی و آلی با شوری زیاد و یا pH کم، به‌دلیل وجود حلقه‌های آروماتیک در ساختار و انباشتگی π-π، قرمز کنگو تمایل به تجمع و ایجاد ریشال[1]های کوچک دارد [۵ و ۶]. قرمز کنگو می‌تواند عامل تحریک چشم و پوست، ایجاد عوارض تنفسی، گوارشی، خواب آلودگی، سرطان‌زایی، حساسیت و نیز لخته‌شدن خون، باشد. بنابراین، حذف قرمز کنگو از منابع آبی لازم است. بیشینه مقدار رنگ در زمان دفع پساب، برپایه استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست ۷۵ ppm است. حضور رنگ در محیط آبی مانع نفوذ نور به داخل آب می‌شود و نورسنتز را دچار اختلال می‌کند. ورود اکسیژن از هوا به آب کاهش یافته و انحلال‌پذیری گازهای گوناگون، در آب تغییر خواهد کرد. ازاین‌رو، مشکل‌های جبران ناپذیری بر بوم‌سازگان[2] منطقه وارد می‌شود. روش‌های متفاوتی برای حذف آلاینده‌های رنگی از آب به‌کارگرفته می‌شود. برای مثال، می‌توان به رسوب‌گذاری، مبادله یون، انعقاد و لخته‌گذاری، اکسایش و برجذب اشاره کرد. در انتخاب روش حذف آلاینده، عامل‌هایی مانند دبی پساب و

1. Micelle
2. Ecosystem

غلظت آلاینده در آن، درنظرگرفته می‌شود [۷ و ۸]. در این بین، فرایند برجذب به‌دلیل بازده قابل‌پذیرش، کم‌هزینه‌بودن، جاذب‌های متنوع و امکان حذف انواع متفاوت آلاینده‌ها در آب به‌ویژه رنگ‌ها به‌صورت گسترده کاربرد دارد [۹]. نقطه کوانتومی کربنی یک ساختار کربنی با شدت فلورسانس قابل‌توجه، سمی‌بودن کم، پایداری فیزیکو شیمیایی، پایداری نوری، مساحت سطح بالا و زیست‌سازگاری است و به‌آسانی سنتز می‌شود [۱۰]. این ساختار با اندازه نانو از اتم‌های کربن با هیبریدشدگی sp^2 تشکیل شده است. ساختار قفس مانند این ذره‌ها با شش‌گوشه‌ها و پنج‌گوشه‌ها شبیه دگرشکل[1] فولرن است. پژوهش‌هایی در مورد کاربرد نقطه‌های کوانتومی کربنی در حذف آلاینده‌های آب گزارش شده است [۱۱ تا ۱۴]. به‌کارگیری بستر متخلخل برای نقطه‌های کوانتومی کربنی، با بهبود اندازه ذره‌های جاذب، موجب سهولت در جمع‌آوری آن از داخل محلول می‌شود. روی اکسید یک پودر معدنی سفید رنگ و با انحلال‌پذیری ناچیز در آب است. روی اکسید در ساختارهای شش‌گوشه‌ای و مکعبی می‌تواند متبلور شود. روی اکسید با اندازه نانومتری و ساختار حفره‌دار، می‌تواند بستری مناسب برای جاذب‌های کربنی مانند نقطه‌های کوانتومی کربنی باشد و پایداری شیمیایی آن‌ها را افزایش دهد. روش‌های گوناگونی برای سنتز نانومتری اکسیدهای فلزی وجود دارد [۱۵ و ۱۶]. در این میان، سنتز احتراقی در محلول، یک روش کارآمد برای این منظور است. سنتز احتراقی در محلول، با واکنش شیمیایی سوخت و اکسنده انجام می‌شود. اکسنده نمک فلزی و سوخت ترکیب آلی مانند گلوکز، گلایسین، اوره یا سیتریک اسید، هستند. گرمادهی مخلوط اکسنده و سوخت، موجب تبخیر حلال و تشکیل ژل و به‌دنبال آن، سوخت و اکسنده دچار احتراق می‌شوند. گرمای احتراق و خروج گازهای CO_2، CO، H_2O و N_2 موجب می‌شود تا اکسید فلز به‌صورت حفره‌دار سنتز شود [۱۷]. سادگی تجهیزات، سرعت زیاد، کنترل‌پذیری فرایند و بازده بالا، مزایای این روش سنتزی هستند [۱۸]. در این مطالعه، نانو روی اکسید متخلخل، با روش احتراق محلول سنتز و نقطه‌های کوانتومی کربنی درون حفره‌ها و بر سطح آن قرار گرفت. چندسازه به‌دست‌آمده، برای حذف قرمز کنگو از محلول آبی استفاده شد. اثر pH، زمان، دما و غلظت رنگ بر درصد حذف، به کمک طراحی آزمایش با روش سطح‌پاسخ مطالعه شد. همچنین، بازیابی روی اکسید پس از حذف رنگ ارزیابی شد.

بخش تجربی

مواد و روش‌ها

نیترات روی شش آبه، اتیلن گلیکول، آمونیاک ۳۲/۷ درصد و نیتریک اسید، از شرکت مرک خریداری شدند. نمک سدیمی قرمز کنگو از سیگما–آلدریچ تهیه شد. در تنظیم pH محیط از محلول‌های M ۰/۱ هیدروکلریک اسید و سدیم هیدروکسید استفاده شد.

تهیه جاذب

پودر سفید رنگ روی اکسید حفره‌دار (pZnO) به‌کمک روش سنتز احتراقی در محلول تهیه شد [۱۹]. برای این کار محلول‌های نیترات روی و اتیلن گلیکول در آب، با حجم کلی ۲۰ میلی‌لیتر تهیه و مخلوط شدند. pH مخلوط به‌دست‌آمده با نیتریک اسید در حدود ۳ تا ۴ تنظیم شد. مخلوط برای ۲ ساعت در دمای ۸۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس گرمادهی شد تا هیدروژل ایجاد شد. این ژل در ۱۰۰ درجه سلسیوس گرمادهی و برپایه واکنش ۱ روی اکسید به‌دست‌آمد. پودر به‌دست آمده به‌عنوان بستر نقطه‌های کوانتمی کربنی در مرحله بعد استفاده شد.

$$Zn(NO_3)_2.6H_2O_{(aq)} + C_2H_6O_{2(aq)} \rightarrow ZnO_{(s)} + H_2O_{(g)} + N_{2(g)} + CO_{2(g)} \quad (۱)$$

نقطه‌های کوانتمی کربنی با روش گزارش‌شده در مرجع [۲۰] سنتز شدند. برای این منظور، لیمو و پیاز جداگانه آب‌گیری

1. Allotrope

و پارَک‌ها با صافش خارج شدند. آب لیمو غنی از سیتریک اسید به‌مقدار ۶ درصد جرمی–جرمی و آسکوربیک اسید با مقدار ۶۴ درصد جرمی–جرمی است. هر دو این اسیدها پیش‌سازهای مناسبی برای نقطه‌های کوانتمی کربنی هستند. از آب پیاز که منبع مهمی از ترکیب‌های گوگرد و آمونیم هیدروکسید است، برای افزودن ناجوراتم‌های نیتروژن و گوگرد به مقدار ناچیز به سطح کربن استفاده می‌شود، تا آب‌دوستی سطح چندسازه افزایش یافته و در مراحل بعدی، راحت‌تر در محیط آبی به‌کارگرفته شود. ۲۰ میلی‌لیتر آب لیمو و ۲ میلی‌لیتر از آب پیاز در ارلن مایر ۲۵۰ میلی‌لیتری مخلوط شدند. برای تهیه محلول ۲۵ درصد آمونیم هیدروکسید، از اختلاط آمونیاک و محلول M ۰/۱ سدیم هیدروکسید استفاده شد. محلول آمونیم هیدورکسید تهیه‌شده به‌همراه ۸ میلی‌لیتر آب دوبار تقطیر و ۵ میلی‌گرم از روی اکسید سنتزشده به مخلوط آب لیمو و آب پیاز افزوده شدند. مخلوط به‌دست‌آمده برای ۶ دقیقه در ماکروویو با توان W ۱۱۰۰ قرار داده شد. در ادامه به آن ۱۰۰ میلی‌لیتر آب دوبار تقطیر افزوده و رسوب به‌دست‌آمده به لوله گریزانه منتقل شد. رسوب با گریزانه و با سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه، جدا و دو مرتبه آبکشی شد. رسوب به‌دست‌آمده (CQDs-pZnO) به‌عنوان جاذب استفاده شد.

آزمایش‌های جذب

طراحی آزمایش با نرم افزار Design Expert 12 و روش RSM[1] انجام شد. عامل‌های pH، غلظت رنگ (C_0)، زمان (t) و دما (T)، در سه سطح متفاوت و در محدوده α± تنظیم شد (جدول ۱). ۲۲ آزمایش با pH، غلظت رنگ، زمان و دما معین طراحی شد. سه مقدار pH انتخابی در طراحی آزمایش بر مبنای تغییر رنگ قرمز کنگو در pH برابر با ۵/۵ انتخاب شدند. مقدار ۰/۰۰۷ گرم جاذب و سرعت هم‌زدن ۱۰۰ rpm برای هر آزمایش در نظر گرفته شد.

جدول ۱ سطوح متغیرها و کدگذاری در طراحی آزمایش

متغیر	واحد	-α	+α	کد گذاری		
				+۱	۰	−۱
pH	-	۴/۶۴	۱۱/۳۶	۶	۸	۱۰
C_0	ppm	۳/۱۸	۳۶/۸۲	۱۰	۲۰	۳۰
t	min	۳/۱۸	۳۶/۸۲	۱۰	۲۰	۳۰
T	°C	۲۳/۱۸	۵۶/۸۲	۳۰	۴۰	۵۰

بازیابی جاذب

چندسازه CQDs-pZnO سیرشده از رنگ، پس از هر آزمایش، با گریزانه جدا و جمع‌آوری شد. رسوب به‌دست‌آمده در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس به‌مدت ۵ ساعت قرار گرفت تا رنگ آلی جذب‌شده و نقطه‌های کوانتومی کربنی بر بستر، تحت اتمسفر کوره، اکسید و پودر pZnO بازیابی شد. دوباره نقطه‌های کوانتومی کربنی از آب لیمو و آب پیاز بر pZnO بارگذاری شدند. از چندسازه به‌دست‌آمده (CQDs-pZnO)، در چرخه‌های بعدی استفاده و کارایی آن برای حذف قرمز کنگو بررسی شد.

دستگاه‌ها

روی اکسید به‌کمک دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) مدل D8 Bruker Advance با تابش Cu Kα با طول موج ۰/۱۵۴۰۶ نانومتر و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل KYKY EM3900 M شناسایی شد. میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل Philips XL30 مجهز به طیف‌سنج پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) SMAX برای تأیید بارگذاری نقطه‌های کوانتومی کربنی بر سطح روی اکسید به‌کارگرفته شد. تعیین غلظت قرمز کنگو در محلول آبی به‌کمک طیف‌نورسنج UV-160 ساخت شرکت Shimadzu ژاپن انجام شد. pH متر شرکت HANNA مدل 213 Microprocessor برای تنظیم pH محلول‌های آبی

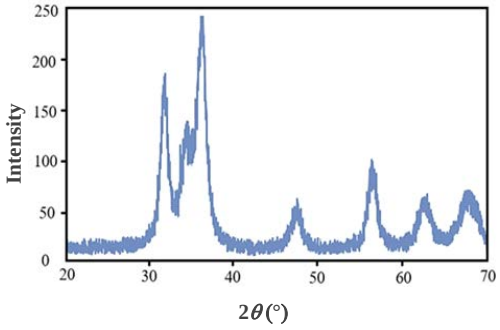
1. Response surface methodology (RSM)

پیش از فرایند حذف به‌کارگرفته شد. مساحت سطح روی اکسید با روش BET[1] از راه جذب نیتروژن اندازه‌گیری شد.

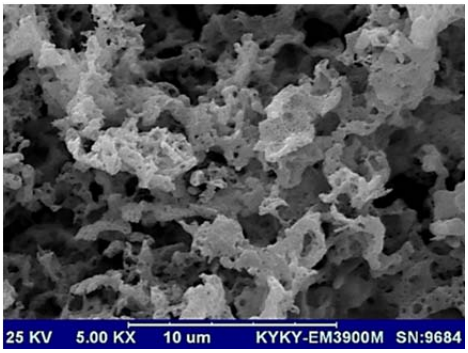
نتیجه‌ها و بحث

شناسایی نمونه‌های سنتزی

الگوی XRD پودر نمونه پودری سنتزشده (pZnO) در شکل ۲-الف نشان داده شده است. این الگو با الگوی ZnO شش‌گوشه‌ای مرجع با شماره JCPDS برابر با ۲۵۵۱-۰۷۰-۰۱ همخوانی دارد. پهنای قله‌ها بیان‌گر بلوری بودن نمونه سنتزی است. عدم حضور قله اضافی، خلوص نمونه را تایید می‌کند. محل خط زمینه، گویای این است که مقدار ZnO اَریخت در پودر سنتزی ناچیز است.



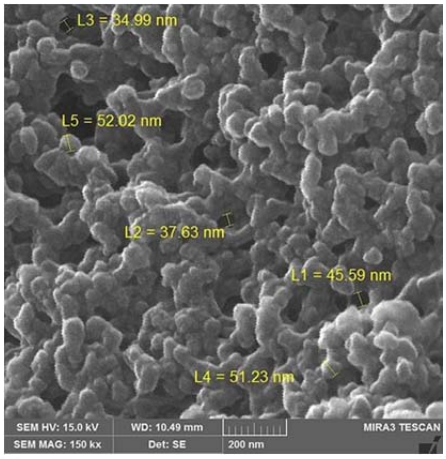
(الف)



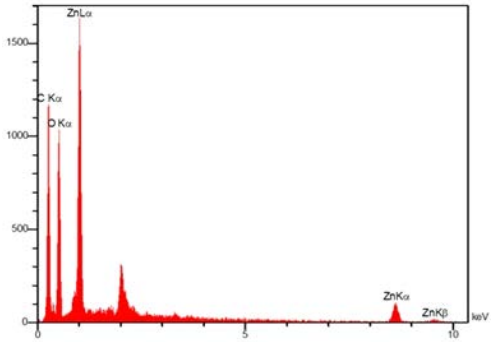
(ب)

شکل ۲ الگوی XRD (الف) و تصویر SEM (ب) نمونه روی اکسید سنتزشده

شکل ۲-ب، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) پودر pZnO سنتزشده را نشان می‌دهد. تجمع ذره‌های پودر pZnO که در هنگام احتراق سوخت تشکیل‌شده در تصویر قابل‌مشاهده است. هنگام خروج گازهای احتراقی، کانال‌هایی بین تجمع ذره‌ها ایجاد شده‌اند که از چسبیدن ذره‌های فعال کربن روی سطح (در مرحله بعد) جلوگیری می‌کنند. ریخت‌شناسی ذره‌های سنتزشده pZnO نشان می‌دهد که این ذره‌ها گزینه و بستری مناسب، به‌ترتیب برای فرایند برجذب و نقطه‌های کوانتومی کربنی خواهند بود. تصویر FESEM نمونه CQDs-pZnO در شکل ۳-الف دیده می‌شود.



(الف)



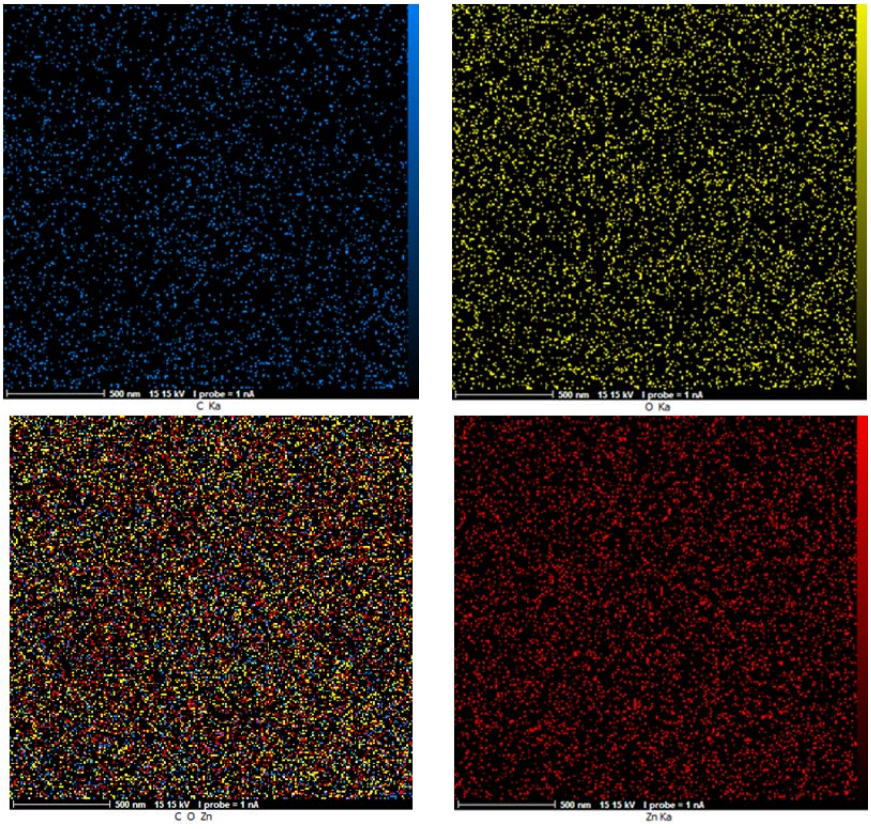
(ب)

شکل ۳ تصویر FESEM (الف) و طیف EDX (ب) نمونه CQDs-pZnO

بارگذاری نقطه‌های کوانتومی کربنی بر سطح بستر موجب سطح مخمل‌گونه ذره‌ها، شده است. همچنین، چندسازه

1. Brunauer–Emmett–Teller (BET)

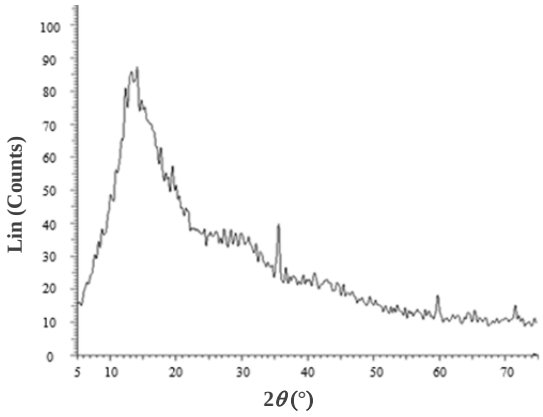
CQDs-pZnO ساختاری متخلخل دارد و اندازه حفره‌ها در مقیاس نانو است. ازاین‌رو، می‌تواند در فرایندهای برجذب رنگ از پساب، به‌کارگرفته شود. چالش اصلی در به‌کارگیری نقطه‌های کوانتومی کربنی، پراکندگی بالای آن‌ها در آب به‌دلیل گروه‌های کربوکسیلی سطح کربن است [۲۱] که می‌تواند پایداری جاذب را تحت الشعاع قرار دهد. ازاین‌رو، برای اطمینان از کارایی چندسازه سنتزشده (CQDs-pZnO)، این نمونه در آب قرار گرفت. سپس، تجزیه عنصری EDS برای بررسی حضور کربن در این چندسازه انجام شد. شکل ۳–ب، طیف EDS نمونه CQDs-pZnO را نشان می‌دهد که برپایه آن، درصدهای جرمی عنصرهای کربن، اکسیژن و روی به ترتیب، ۴۹/۰۹، ۳۸/۹۳ و ۱۱/۹۹ به‌دست آمد. به این ترتیب، حضور کربن بر بستر انتخابی پس از غوطه‌وربودن در آب تأیید شد. به بیان دیگر، پایداری نقطه‌های کوانتمی کربنی در چندسازه سنتزی، در آب، حفظ شده است. شکل ۴، نگاشت عنصری جاذب سنتزشده CQDs-pZnO را نشان می‌دهد. برپایه این شکل، کربن بر سطح pZnO به‌صورت یکنواخت حضور دارد. شکل ۴–د، نشان می‌دهد به‌کارگیری امواج ماکروویو برای بارگذاری نقطه‌های کوانتمی کربنی به همه نقاط، تأثیرگذار است.



شکل ۴ نگاشت پراکندگی اکسیژن (الف)، کربن (ب)، روی (ج) و کربن–اکسیژن–روی (د) در نمونه CQDs-pZnO

شکل ۵ الگوی XRD چندسازه CQDs-pZnO را نشان می‌دهد. قله مربوط به کربن موجود در چندسازه در 2θ کمتر از ۳۰ درجه به‌صورت یک قله پهن، قابل‌مشاهده است. از طرفی با توجه به نتیجه‌های EDS، ۴۹/۰۹ درصد جرمی چندسازه را

کربن تشکیل داده که مقدار قابل‌توجهی است. ازاین‌رو، بیشتر قله‌های شاخص الگوی روی اکسید (شکل ۲–الف) با این قله پهن همپوشانی دارند.



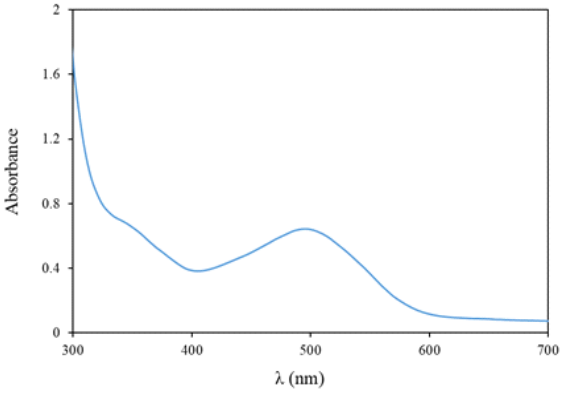
شکل ۵ الگوی XRD چندسازه CQDs-pZnO

نتیجه‌های طراحی آزمایش

طیف جذبی قرمز کنگو در شکل ۶ نشان شده است. غلظت رنگ باقی‌مانده (C_e) در محلول پس از انجام فرایند، به کمک طیف‌سنج UV-Vis با توجه به شدت جذب در طول موج (λ) بیشینه ۴۹۵ نانومتر تعیین شد. برپایه شکل ۶، دو نوار جذبی برای قرمز کنگو وجود دارد. در طول موج ۳۴۰ نانومتر انتقال‌های π-π* حلقه آروماتیک و در طول موج ۴۹۵ نانومتر انتقال n-π* زوج الکترون غیرپیوندی نیتروژن در کروموفور –N=N- گروه آزو رخ می‌دهند [۲۲].

که در آن، C_0 و C_e به‌ترتیب غلظت‌های اولیه و باقیمانده رنگ در محلول، برحسب ppm یا mg/l هستند.

طراحی آزمایش حذف قرمز کنگو با جاذب CQDs-pZnO و به‌کارگیری روش سطح‌پاسخ و مدل مرکب مرکزی برای عامل‌های pH، دما، زمان و غلظت رنگ به همراه درصد حذف رنگ به‌عنوان پاسخ، در جدول ۲ آمده است. داده‌های آماری نشان دادند که بهترین برازش داده‌های تجربی با مدل درجه دوم است. درستی عبارات موجود در مدل به‌کمک مقادیر p تعیین شد. برای مدل درجه دوم مقدار p پایین تر از ۰/۰۵ بود و این مدل تأیید شد. سطح اطمینان ۰/۹۵ و آلفا ۰/۰۵ بود و با درنظرگرفتن اینکه مقدار p باید پایین‌تر از آلفا باشد؛ در مدل مذکور، مقدار p پایین‌تر از ۰/۰۰۰۱ بود.



شکل ۶ طیف جذبی UV-Vis محلول آبی قرمز کنگو

پاسخ برای طراحی آزمایش به‌صورت درصد حذف رنگ است که به‌کمک معادله ۲ تعیین شد.

$$\text{حذف درصد رنگ} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \qquad (۲)$$

جدول ۲ نتیجه‌های آزمایش‌های انجام‌شده برپایه مدل مرکب مرکزی برای حذف قرمز کنگو

آزمایش	درصد حذف رنگ	غلظت تعادلی (C_e)	عامل‌ها			
			زمان (D)	غلظت اولیه رنگ (C)	دما (B)	pH (A)
۱	۹۰/۰۰	۱	۳۰	۱۰	۵۰	۶
۲	۶۱/۶۷	۱۱/۵۰	۱۰	۳۰	۵۰	۱۰
۳	۷۰/۱۰	۵/۹۸	۲۰	۲۰	۴۰	۸
۴	۶۳/۲۷	۱۱/۰۲	۳۰	۳۰	۳۰	۱۰
۵	۶۵/۶۰	۶/۸۸	۲۰	۲۰	۴۰	۸
۶	۹۰/۱۰	۲/۹۷	۳۰	۳۰	۵۰	۶
۷	۶۵/۵۰	۳/۴۵	۱۰	۱۰	۳۰	۶
۸	۲۷/۸۰	۷/۲۲	۳۰	۱۰	۳۰	۱۰
۹	۶۷/۳۵	۶/۵۳	۲۰	۲۰	۴۰	۸
۱۰	۶۸/۰۰	۶/۴۰	۲۰	۲۰	۴۰	۸
۱۱	۸۱/۴۳	۵/۵۷	۱۰	۳۰	۳۰	۶
۱۲	۵۰/۱۰	۴/۹۹	۱۰	۱۰	۵۰	۱۰
۱۳	۶۱/۱۵	۷/۷۷	۲۰	۲۰	۲۳	۸
۱۴	۸۱/۸۱	۳/۶۴	۲۰	۲۰	۴۰	۵
۱۵	۴۸/۸۸	۱۰/۲۲	۳	۲۰	۴۰	۸
۱۶	۷۰/۰۰	۶/۰۰	۲۰	۲۰	۴۰	۸
۱۷	۶۹/۸۱	۰/۹۶	۲۰	۳	۴۰	۸
۱۸	۹۷/۳۹	۰/۹۶	۲۰	۳۷	۴۰	۸
۱۹	۶۷/۸۵	۶/۴۳	۲۰	۲۰	۴۰	۸
۲۰	۷۰/۰۱	۶/۰۰	۲۰	۲۰	۴۰	۱۱
۲۱	۷۱/۵۸	۵/۶۸	۳۷	۲۰	۴۰	۸
۲۲	۷۷/۹۰	۴/۴۲	۲۰	۲۰	۵۷	۸

برای ارزیابی درستی مدل انتخابی، از تحلیل وردایی (نتایج ANOVA) و آزمون عدم برازش[1] استفاده شد. هر چه متغیرهای مربوط به آزمون F بیشتر و متغیر مربوط به مقدار p برای جمله‌ای کمتر باشد، آن جمله از نقطه نظر آماری اهمیت بالاتری دارد. برپایه جدول ۳، مقدار $p < ۰/۰۵$ شرایط مدل موردقبول را نمایش می‌دهد و مقدارهای بالاتر از ۰/۰۵ بیان می‌کند که شرایط مدل، قابل‌توجه نیست. معنی‌داربودن نتیجه این آزمون، دلالت می‌کند که نقاط در اطراف مدل به‌خوبی قرار نگرفته و مدل انتخابی قادر به پیش‌گویی متغیرهای تابع نیست. به عبارت دیگر، عدم برازش کمتر مطلوب است. برپایه نتیجه‌های جدول ۳، مدل انتخابی مقدار F کمتر در مقایسه با سایر مدل‌ها دارد و با نرم افزار تأیید می‌شود. در ادامه، صحت مدل به کمک مقدارهای R^2 بررسی شد.

1. Lack of Fit

مقدار R^2 تنظیم‌شده بیشتر از ۰/۹ و پیش‌بینی‌شده بالاتر از ۰/۸ منجر به تأیید مدل می‌شود. برای این مطالعه، R^2 تنظیم‌شده ۰/۹۷۸۹ بود و مدل ۹۷ درصد داده‌ها را پوشش داد.

جدول ۳ تحلیل وردایی مدل درجه دوم برای برجذب قرمز کنگو بر جاذب CQDs-pZnO

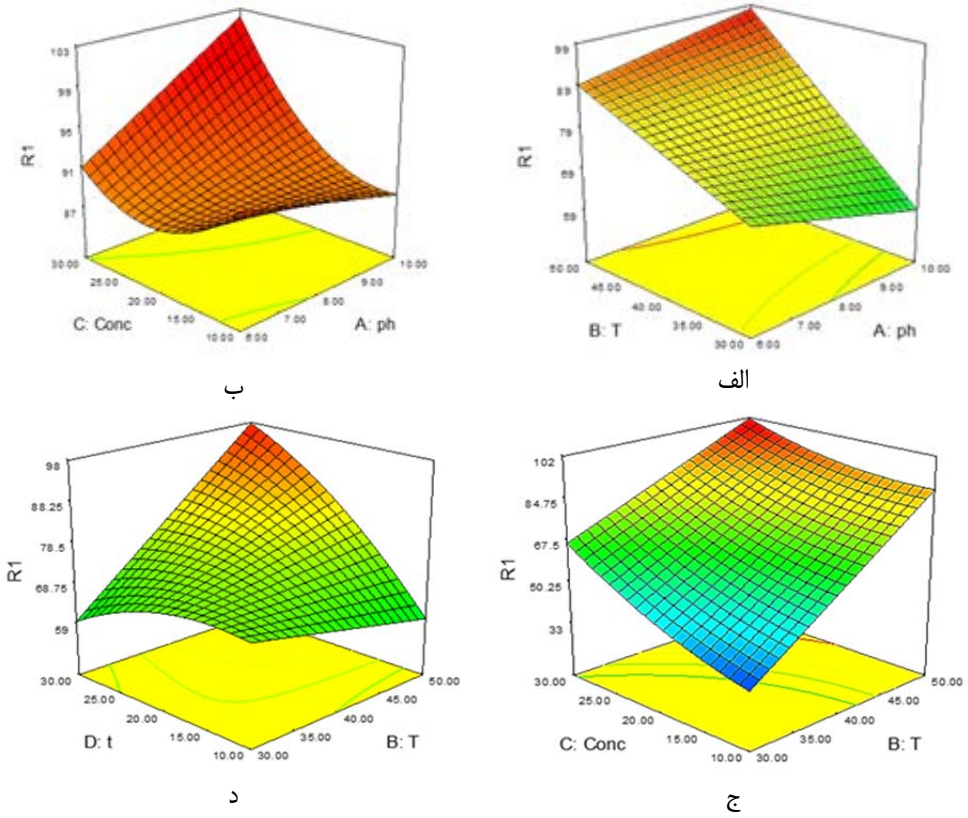
منبع	مجموع مربع‌ها	df (درجه آزادی)	میانگین مربع‌ها	مقدار F	مقدار p	
مدل	۴۵۰۹/۸۱	۱۰	۴۵۰۹/۸۱	۴۶/۳۸	<۰/۰۰۰۱	معنادار
A-pH	۶۹/۶۲	۱	۶۹/۶۲	۷/۱۶	۰/۰۲۳۳	
B-دما	۴۹۲/۹۵	۱	۴۹۲/۹۵	۵۰/۶۹	<۰/۰۰۰۱	
C-غلظت	۸۷۶/۷۴	۱	۸۷۶/۷۴	۹۰/۱۶	<۰/۰۰۰۱	
D-زمان	۲۵۷/۶۵	۱	۲۵۷/۶۵	۲۶/۴۹	۰/۰۰۰۴	
AB	۸۹/۲۲	۱	۸۹/۲۲	۹/۱۷	۰/۰۱۲۷	
AC	۱۲۰/۱۳	۱	۱۲۰/۱۳	۱۲/۳۵	۰/۰۰۵۶	
BC	۱۹۷/۴۱	۱	۱۹۷/۴۱	۲۰/۳	۰/۰۰۱۱	
BD	۴۷۸/۷۱	۱	۴۷۸/۷۱	۴۹/۲۳	<۰/۰۰۰۱	
C^2	$۲/۴۲ \times ۱۰^{۲+}$	۱	۲۴۲/۴۶	۲۴/۹۳	۰/۰۰۰۵	
D^2	۲۸۵/۷۵	۱	۲۸۵/۷۵	۲۹/۳۸	۰/۰۰۰۳	
باقی‌مانده	۹۷/۲۵	۱۰	۹/۷۲			
عدم برازش	۸۴/۵	۶	۱۴/۰۸	۴/۴۲	۰/۰۸۶	بی‌معنا
خطای خالص	۱۲/۷۵	۴	۳/۱۹			
مجموع	۴۷۳۷/۷۴	۲۱				

چند جمله‌ایی به‌دست‌آمده از این بررسی، در معادله ۳ آورده شده است. A، B، C و D به‌ترتیب بیانگر pH، دما، غلظت رنگ و زمان هستند.

$$R = ۶۹/۴۰ - ۳/۵۱ \times A + ۶/۰۱ \times B + ۸/۰۱ \times C + ۶/۷۵ \times D + ۵/۱۹ \times A \times B + ۳/۸۸ \times A \times C - ۴/۹۷ \times B \times C + ۱۲/۰۲ \times B \times D + ۳/۹۶ \times C^2 - ۴/۳۰ \times D^2 \quad (۳)$$

بررسی‌های نرم‌افزاری بهنجار بودن آزمایش‌های طراحی شده را تایید کرد. همچنین، با فرض ثابت‌بودن وردایی، پراکندگی تصادفی نتیجه‌ها قابل‌قبول بود.

برپایه مطالعه‌های نرم افزاری، نقطه بهینه برای حذف قرمز کنگو بر سطح جاذب CQDs-pZnO به صورت pH برابر ۹/۷۶، دمای۹۶/ ۴۹ درجه سلسیوس، غلظت ۲۶/۹۸ ppm و زمان ۲۹/۸۳ دقیقه با درصد حذف ۹۷/۵۶ بود. اثر متقابل عوامل مؤثر بر حذف قرمز کنگو بر سطح جاذب CQDs-pZnO در شکل ۷ آورده شده است.



شکل ۷ نمودارهای سه بعدی تأثیر pH و دما (الف)، pH و غلظت رنگ (ب)، دما و غلظت رنگ (ج)، دما و زمان (د) بر فرایند برجذب قرمز کنگو از محلول آبی بر جاذب CQDs-pZnO

برپایه شکل‌های ۷-الف و ب، تأثیر دما و غلظت رنگ بر فرایند بیشتر از pH است. pH محلول، نقش بسزایی در ساختار مولکول رنگ و جاذب کربنی دارد. قرمز کنگو مولکولی دوقطبی است که در گستره pH موردمطالعه یعنی ۶ تا ۸ به فرم آنیونی است. تغییرهای pH در بررسی حاضر، گسترده نیست. ازاین‌رو، اثر تغییر pH بر درصد حذف ناچیز است. نمک سدیمی قرمز کنگو در آب، pH برابر ۱۰ دارد، که پیش از تنظیم pH ثبت‌شده بود. در این pH، قرمز کنگو آنیونی با بار سطحی منفی است. بنابراین، دافعه الکترواستاتیک مولکول رنگ و گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار مانند کربوکسیلیکی، کربونیلی و فنلی در سطح جاذب کربنی مانع از برجذب رنگ خواهد شد. پس کاهش pH مطلوب خواهد بود. کاهش pH فقط در گستره قرمز برای رنگ انجام شد. زیرا کاهش بیشتر pH موجب می‌شود که مولکول رنگ به آبی، تغییر رنگ دهد و خورندگی افزایش یابد.

همان‌طور که در بخش پیش بیان شد، استفاده از آب پیاز موجب افزودن اتم‌های نیتروژن و گوگرد به سطح کربن می‌شود و آب‌دوستی چندسازه را بهبود می‌بخشد. ازاین‌رو، در محیط آبی، آبپوشی چندسازه دور از انتظار نخواهد بود. برهم‌کنش پیوندهای π مولکول رنگ با ناجوراتم‌ها در ساختار کربن و با مولکول آب برجذب‌شده، پیوند هیدروژنی گروه‌های آزو و آمین با مولکول آب و نیتروژن دوپه‌شده در سطح چندسازه، و در نهایت برهم‌کنش الکترواستاتیک گروه سولفونیکی قرمز کنگو

[۲۳] با سطح چندسازه، برجذب رنگ بر سطح CQDs-pZnO را افزایش می‌دهد.

کاف نوار روی اکسید در حدود ۳٫۱۷۵ eV است که بیانگر نیم‌رسانابودن آن است [۲۴]. تابش محیطی موجب برانگیخته‌شدن الکترون و تشکیل زوج الکترون–حفره می‌شود. به‌طورمعمول حفره با اکسایش آب، تولید رادیکال هیدروکسیل می‌کند. در اثر ترکیب الکترون با مولکول اکسیژن، رادیکال پراکسید ایجاد می‌شود که می‌تواند به اکسایش مولکول رنگ، کمک کند. سطح بالای روی اکسید و ذره‌های کوانتمی به افزایش امکان برجذب و جذب نور کمک می‌کند.

شکل‌های ۷–ج و د نشان می‌دهد که اثر دما بر فرایند به‌ترتیب در مقایسه با غلظت رنگ و زمان، بیشتر و قابل‌توجه‌تر است. درصد حذف آلاینده در دمای بالا مانند ۵۰ درجه سلسیوس بهبود یافته که نشان‌دهنده گرماگیربودن برجذب قرمز کنگو بر سطح CQDs-pZnO است. با افزایش زمان تماس، تعادل بین دو فاز جامد و مایع رخ می‌دهد. غلظت بالاتر رنگ، موجب کاهش قطبش غلظتی و رسیدن به تعادل، تسریع می‌شود. کارایی حذف قرمزکنگو با CQDs-pZnO با روش‌های دیگر، در جدول ۴ مقایسه شده است [۲۵ تا ۳۰]. نتیجه‌ها بیانگر کارایی قابل‌قبول جاذب CQDs-pZnO است.

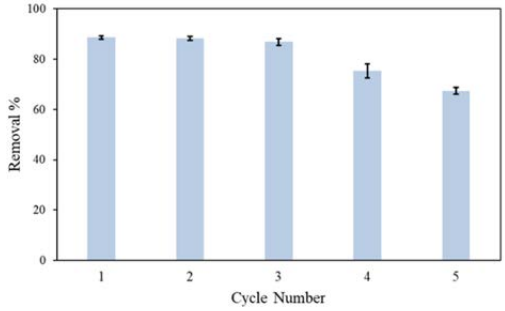
جدول ۴ مقایسه کارایی حذف قرمزکنگو با CQDs-pZnO و روش‌های دیگر

نوع روش	جاذب/فوتوکاتالیست/غشا	درصد حذف رنگ	مراجع
برجذب	پودر دانه سورجانا	۶۵٫۰۰	[۲۵]
اُزونی‌کردن	–	۶۰ <	[۲۶]
برجذب	زغال الیاف نارگیل	۷۰٫۰۰	[۲۷]
برجذب	کربن فعال آزمایشگاهی	۷۹٫۸۰	[۲۸]
	خاکستر باگاس	۹۰٫۰۰	
برجذب	زیروژل آنلین پلی‌پیرول سیلیکا	۹۰ ≈	[۲۹]
برجذب	گِل سرخ (پسماند بوکسیت در صنعت آلومینیم) فعال‌شده	۸۵٫۰۰	[۳۰]
برجذب	CQDs-pZnO	۹۷٫۳۹	کار حاضر

بررسی بازیابی جاذب

برای بررسی کارایی CQDs-pZnO پس از بازیابی گرمایی، درصد حذف قرمزکنگو در pH برابر با ۶، دمای ۵۰ درجه سلسیوس، غلظت ppm ۳۰ و زمان ۳۰ دقیقه برای پنج چرخه، محاسبه شد. ازآنجاکه بارگذاری نقطه‌های کوانتومی کربنی بر بستر اکسیدی، یک فرایند تصادفی است و مقدار بارگذاری در هر بار می‌تواند متفاوت باشد، برای هر چرخه بازیابی، آزمایش ۳ بار تکرار شد. کارایی CQDs-pZnO در چرخه‌های متفاوت همراه با خطای محاسبه‌شده، در شکل ۸ دیده می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در ابتدا، برای ۳ چرخه متوالی، درصد حذف رنگ تغییر قابل‌توجهی نداشته است؛ ولی کاهش درصد حذف در چرخه‌های چهارم و پنجم مشهود است. برپایه اندازه‌گیری مساحت سطح روی اکسید با روش BET در کار پیشین [۱۹]، مساحت سطح روی اکسید برابر $۲۹٫۸۴\ m^{۲}.g^{-۱}$ بود که پس از ۵ چرخه متوالی به $m^{۲}.g^{-۱}$ ۲۰٫۵۹ رسید. احتمال می‌رود این کاهش ناشی از تفجوشی[1] ذره‌های بستر اکسیدی هنگام گرمادهی در کوره باشد.

1. Sintering



شکل ۸ تغییر میانگین درصد حذف قرمز کنگو با CQDs-pZnO بازیابی‌شده همراه با انحراف استاندارد برای ۳ بار تکرار در هر چرخه

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، pZnO با روش احتراق محلول، برای ایجاد ساختاری متخلخل سنتز و با روش‌های XRD و SEM شناسایی شد. مخلوط آب پیاز و آب لیمو به‌عنوان پیش‌سازهای طبیعی و ارزان در سنتز CQDs استفاده شدند. بارگذاری CQDs بر بستر pZnO هم‌زمان با سنتز نقطه‌های کربنی، به کمک امواج ماکروویو صورت گرفت. این روش به‌دلیل سرعت و بازده بالا انتخاب شد. با روش‌های FESEM، نگاشت عنصری و EDS، تولید چندسازه CQDs-pZnO با ابعاد نانو و پراکندگی قابل‌قبول ذره‌ها، اثبات شد. در ادامه، حذف قرمز کنگو با جاذب CQDs-pZnO مطالعه شد و مدل درجه دوم با برازش قابل‌قبول با نتیجه‌های آزمایشگاهی، انتخاب شد. بیشترین درصد حذف آلاینده در pH برابر با ۶، دما ۵۰ درجه سلسیوس، زمان ۳۰ دقیقه و غلظت رنگ ppm ۳۰، برابر ۹۷/۳۹ درصد به‌دست آمد. با توجه به اینکه در پساب واحدهای نساجی غلظت رنگ به‌طورتقریبی ppm ۱۰۰ و غلظت مجاز قرمز کنگو در پساب برای رهاسازی در محیطزیست پایین‌تر از ppm ۷۵ باید باشد. به‌کارگیری CQDs-pZnO با درصد حذف بالاتر از ۹۵ درصد در شرایط بهینه، یک گزینه کارآمد برای حذف رنگ بشمار می‌آید. بازیابی گرمایی pZnO، با قراردادن CQDs-pZnO سیر از رنگ در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس و اکسایش هم‌زمان رنگ آلی و نقطه‌های کربنی تا باقی‌ماندن pZnO انجام شد. نقطه‌های کوانتومی کربنی از پیش‌سازهای ارزان لیمو و پیاز، دوباره بر بستر بارگذاری و برای حذف قرمزکنگو به‌کارگرفته شد. نتیجه‌ها نشان داد در سه چرخه ابتدایی، CQDs-pZnO افت کارایی قابل‌توجهی نداشت، ولی در چرخه‌های بالاتر کاهش درصد حذف رنگ مشاهده شد.

مراجع

[1] Solaiman JM, Rajamohan N, Yusuf M, Kamyab H. Nanocomposite ceramic membranes as novel tools for remediation of textile dye waste water – A review of current applications, machine learning based modeling and future perspectives. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2024;12(2):112353. **doi: org/10.1016/j.jece.2024.112353**

[2] Moyo S, Makhanya BP, Zwane PE. Use of bacterial isolates in the treatment of textile dye wastewater: A review. Heliyon. 2022;8(6):e09632. **doi: org/10.1016/j. heliyon.2022.e09632**

[3] Falade AO, Eyisi OA, Mabinya LV, Nwodo UU, Okoh AI. Peroxidase production and ligninolytic potentials of fresh water bacteria Raoultella ornithinolytica and Ensifer adhaerens. Biotechnology reports. 2017;16:12-7. **doi: org/10.1016/j.btre.2017.10.001.**

[4] Omidi S, Kakanejadifard A. Eco-friendly synthesis of graphene–chitosan composite hydrogel as efficient adsorbent for Congo red. RSC Advances. 2018;8(22):12179-12189. **doi: org/10.1039/C8RA00510A**

[5] Chan SL, Chan YP, Abdullah AH, Ong ST. Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies of a new potential biosorbent for the removal of Basic Blue 3 and Congo Red dyes: Pineapple (Ananas comosus) plant stem. Journal of the Taiwan Institute of Chemical

Engineers. 2016;61:306-315. **doi: org/10.1016/j.jtice.2016.01.010**

[6] Siddiqui SI, Allehyani ES, Al-Harbi SA, Hasan Z, Abomuti MA, Rajor HK, et al. Investigation of Congo red toxicity towards different living organisms: A review. Processes. 2023;11(3):807. **doi: org/10.3390/pr11030807**

[7] Gong R, Zhang X, Liu H, Sun Y, Liu B. Uptake of cationic dyes from aqueous solution by biosorption onto granular kohlrabi peel. Bioresource Technology. 2007;98(6):1319–1323. **doi: org/10.1016/j.biortech.2006.04.034**

[8] Li P, Luo Y, Ming F, Zheng J, Pan Zh, Wang R, He Y, et al. Aeration strategies for microalgae in wastewater treatment: Enhancing pollutant removal and community dynamics. Journal of Environmental Management. 2025;377:124629. **doi: org/10.1016/j.jenvman.2025.124629**

[9] Ranjbari E, Hadjmohammadi MR, Kiekens F, De Wael Bleau, K. Mixed hemi/ad-micelle sodium dodecyl sulfate coated magnetic iron oxide nanoparticles for the efficient removal and trace determination of rhodamine-B and rhodamine-6G. Analytical Chemistry. 2015;87:7894-7901. **doi: org/10.1021/acs.analchem.5b01676**

[10] Munusamy S, Mandlimath TR, Swetha P, Al-Sehemi AG, Pannipara M, Koppala S, et al. Nitrogen-doped carbon dots: Recent developments in its fluorescent sensor applications. Environmental Research. 2023;231:116046. **doi: org/10.1016/j.envres.2023.116046**

[11] Tadesse A, RamaDevi D, Hagos M, Battu G, Basavaiah K. Synthesis of nitrogen doped carbon quantum dots/magnetite nanocomposites for efficient removal of methyl blue dye pollutant from contaminated water. RSC advances. 2018;8(16):8528-36. **doi: org/10.1039/C8RA00158H**

[12] Shi W, Guo F, Wang H, Liu C, Fu Y, Yuan S, Huang H, Liu Y, Kang Z. Carbon dots decorated magnetic ZnFe2O4 nanoparticles with enhanced adsorption capacity for the removal of dye from aqueous solution. Applied Surface Science. 2018;433:790-7. **doi: org/10.1016/j.apsusc.2017.10.099**

[13] Zhang M, Yao Q, Lu C, Li Z, Wang W. Layered double hydroxide–carbon dot composite: high-performance adsorbent for removal of anionic organic dye. ACS Applied Materials & Interfaces. 2014;6(22):20225-33. **doi: org/10.1021/am505765e**

[14] Nayak S, Prasad SR, Mandal D, Das P. Carbon dot cross-linked polyvinylpyrrolidone hybrid hydrogel for simultaneous dye adsorption, photodegradation and bacterial elimination from waste water. Journal of Hazardous Materials. 2020;392:122287. **doi: org/10.1016/j.jhazmat.2020.122287**

[15] Shahmirzaee M, Shafiee Afarani M, Arabi AM, Iran Nejhad A. In situ crystallization of $ZnAl_2O_4$/ZnO nanocomposite on alumina granule for photocatalytic purification of wastewater. Research on Chemical Intermediates. 2017;43:321-40.**doi: org/10.1007/s11164-016-2624-6**

[16] Afzal S, Ullah S, Shahid M, Najam T, Shaaban IA, Shah SS, Nazir MA. Metal oxide nanoparticles: Synthesis and applications in energy, biomedical, and environment sector. Journal of the Chinese Chemical Society. 2025;72(2):96-123. **doi: org/10.1002/jccs.202400347**

[17] Hosseini SA, Davodian M, Abbasian AR. Remediation of phenol and phenolic derivatives by catalytic wet peroxide oxidation over Co-Ni layered double nano hydroxides. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2017;75:97-104. **doi: org/10.1016/j.jtice.2017.03.001**

[18] Varma A, Mukasyan AS, Rogachev AS, Manukyan KV. Solution combustion synthesis of nanoscale materials. Chemical Reviews. 2016;116(23):14493-586. **doi: org/10.1021/acs.chemrev.6b00279**

[19] Kaedi F, Yavari Z, Shafiee Afarani M, Noroozifar M. Synergistic influence of spongy ZnO on catalytic activity of nano-catalyst Pd toward electrooxidation of liquid fuels. Journal of Porous

Materials. 2020;27(4):1203-11. **doi: org/10.100 /s10934-020-00903-2**

[20] Monte-Filho SS, Andrade SI, Lima MB, Araujo MC. Synthesis of highly fluorescent carbon dots from lemon and onion juices for determination of riboflavin in multivitamin/mineral supplements. Journal of Pharmaceutical Analysis. 2019;9(3):209-16.**doi: org/10.1016/j.jpha.2019.02.003**.

[21] Massad-Ivanir N, Bhunia SK, Raz N, Segal E, Jelinek R. Synthesis and characterization of a nanostructured porous silicon/carbon dot-hybrid for orthogonal molecular detection. NPG Asia Materials. 2018;10(1):e463. **doi: org/10.1038 /am.2017.233.**

[22] Selvaraj R, Shetty SA, Murugesan G, Goveas LC, Varadavenkatesan T, Vinayagam R. Eco-friendly synthesis of silver nanoparticles from rubber fig leaves and their application in the catalytic degradation of Congo Red dye. Materials Technology. 2025;40(1):2498585. **doi: org/10.1080/10667857.2025.2498585**

[23] Adebayo MA, Jabar JM, Amoko JS, Openiyi EO, Shodiya OO. Coconut husk-raw clay-Fe composite: Preparation, characteristics and mechanisms of Congo red adsorption. Scientific Reports. 2022;12(1):14370. **doi: org/10.1038/s41598-022-18763-y**

[24] Junaid M, Hussain SG, Abbas N. Band gap analysis of zinc oxide for potential bio glucose sensor. Results in Chemistry. 2023;5:100961. **doi: org/10.1016/j.rechem.2023.100961**.

[25] Patel H, Vashi RT. Removal of Congo Red dye from its aqueous solution using natural coagulants. Journal of Saudi Chemical Society. 2012;16(2):131-6. **doi: org/10. 1016/j.jscs.2010.12.003.**

[26] Gharbani P, Tabatabaii SM, Mehrizad A. Removal of Congo red from textile wastewater by ozonation. International Journal of Environmental Science & Technology. 2008;5:495-500. **doi: org/10.1007/BF03326046**

[27] Namasivayam C, Kavitha D. Removal of Congo Red from water by adsorption onto activated carbon prepared from coir pith, an agricultural solid waste. Dyes and pigments. 2002;54(1):47-58. **doi: org/10.1016/S0143-7208 (02)00025-6**

[28] Mall ID, Srivastava VC, Agarwal NK, Mishra IM. Removal of congo red from aqueous solution by bagasse fly ash and activated carbon: kinetic study and equilibrium isotherm analyses. Chemosphere. 2005;61(4):492-501.**doi: org/10.1016/j.chemosphere.2005.03.065**

[29] Pavan FA, Dias SL, Lima EC, Benvenutti EV. Removal of Congo red from aqueous solution by anilinepropylsilica xerogel. Dyes and Pigments. 2008;76(1):64-9. **doi: org/10.1016/j.dyepig.2006.08.027**

[30] Tor A, Cengeloglu Y. Removal of congo red from aqueous solution by adsorption onto acid activated red mud. Journal of hazardous materials. 2006;138(2):409-15. **doi: org/10.1016/j.jhazmat.2006.04.063**

Optimizing surface adsorption of Congo red anionic dye on zinc oxide/carbon quantum dots composite by response surface method

F. Jammi[1], Z. Yavari[2,*], H. Saravani[3]

1. MSc. Student of Department of Chemistry, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.
2. Assistant prof. of Department of Chemistry, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.
3. Professor of Department of Chemistry, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

Abstract: The removal of colored pollutants from textile effluent is a significant challenge. The adsorption process is an efficient and suitable method for removing pollutants. In the present study, porous zinc oxide was prepared by solution combustion synthesis method, and then, carbon quantum dots by using lemon and onion juices were loaded into the cavities and surface of the prepared zinc oxide. X-ray diffraction analysis confirmed the synthesis of zinc oxide in the hexagonal crystal system. The obtained composite was used to remove Congo red from the aqueous solution. The effects of pH, time, temperature and Congo red concentration on its removal efficiency in the presence of as-synthesized composite was studied with experimental design by using Design Expert 12 software and response surface methodology. By heating the adsorbent saturated with dye, zinc oxide was recovered and the carbon quantum dots were added to the recovered zinc oxide. The maximum removal percentage of Congo red pollutant (97.39%) was achieved at pH of 6, 50 °C, 30 minutes, and initial 30 ppm of dye concentration. After five times of recovery of the oxide substrate, the dye removal percentage decreased from 88.58 to 67.41%. Determining the concentration of Congo red remaining after adsorption by UV-Vis spectroscopy showed that the two-components composite of zinc oxide and carbon quantum dots could be used for effective removal of the Congo red pollutant from the wastewater of textile units.

Keywords*:* Congo red, Porous adsorbent, Carbon quantum dot, Textile effluent, Response surface methodology

*** Corresponding author Email:**
z_yavari@chem.usb.ac.ir