بهینه‌سازی تخریب نوری رنگ‌زای اسید بلو ۱۱۳ بر روی نانو کاتالیزور آنا تاز TiO_2 با استفاده از روش سطح پاسخ

سجاد طالبی، ناز چائی بخش لنگرودی*، زینب مرادی شوئیلی

گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۷/۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۱۲

چکیده

زمینه و هدف : در دهه‌های گذشته، با توسعه روش‌های تصفیه مناسب برای از بین بردن آلاینده‌های مختلف، تلاش‌های بسیاری به‌منظور بهبود تصفیه پساب‌ها صورت گرفته است . بیشترین مطالعات در این زمینه بر روی فوتوکاتالیزورهای ناهمگن متمرکزشده است که اغلب از اکسیدهای نیمه‌هادی، مانند دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) استفاده می‌کنند. این روش مفید بر اساس تجزیه آلاینده طی یک واکنش شیمیایی‌بر روی سطح یک فوتوکاتالیزور است که با نوری با طول‌موج معین فعال‌شده است. کارآمدی در از بین بردن آلاینده‌های آلی پایدار مانند رنگ‌های آزو، پایداری نوری و بی‌اثری نسبت به محیط شیمیایی، از TiO_2 یک ماده مهم فوتوکاتالیزور ساخته است. در این مطالعه، تخریب نوری رنگ نساجی صنعتی اسید بلو ۱۱۳ (AB113)، با استفاده از نانو ذرات آنا تاز TiO_2 و تابش اشعه ماوراءبنفش (UV-A)، در یک محیط ناهمگن آبی انجام‌شده است.

مواد و روش‌ها: فرایند فوتوکاتالیزوری به‌وسیله طیف‌سنجی UV–visible و مقادیر مختلف کاتالیزور (۰/۰۶۰ – ۰/۰۱۰ mg)، شرایط pH (۸–۳) و زمان تماس (۳۰–۲ دقیقه) برای غلظت ۲۵ mg/L از رنگ موردنظر دنبال شد. روش سطح پاسخ بر اساس طراحی سه متغیر سه سطح Box-Behnken برای مطالعه و بهینه‌سازی فرایند فوتوکاتالیزوری استفاده شد. اثرات متقابل سه پارامتر عملیاتی ازجمله زمان تابش، pH و مقدار کاتالیزور در تخریب رنگ موردبررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: بهره‌وری حذف رنگ به‌دقت به‌وسیله یک معادله درجه دوم با R^2 برابر ۰/۹۶۴۹ مدل‌سازی شد. شرایط بهینه برای حذف رنگ در زمان ۲۹/۷۸ دقیقه، pH برابر ۶/۵۶ و مقدار کاتالیزگر ۴۲/۰۰ میلی‌گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر از محلول به دست آمد. در این شرایط، ۹۵/۳٪ از رنگ حذف شد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که نانو ذرات آنا تاز TiO_2 فعالیت کاتالیزوری خوبی را در تخریب رنگ AB113 تحت تابش UV نشان می‌دهند. بنابراین، تخریب نوری رنگ با استفاده از نانو ذرات آنا تاز TiO_2 در شرایط بهینه، می‌تواند به‌طور مؤثری برای تصفیه پساب‌های صنعتی رنگی استفاده شود.

کلمات کلیدی: فوتوکاتالیزور، تخریب رنگ، نانو ذرات آنا تاز TiO_2، اسید بلو ۱۱۳، طراحی Box-Behnken

* **نویسنده مسئول:** گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

ایمیل: nchaibakhsh@guilan.ac.ir - **شماره تماس:** ۰۱۳-۳۳۳۶۷۲۶۲

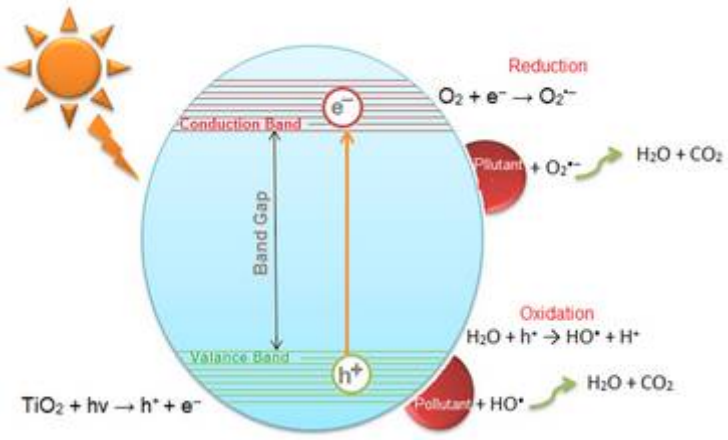
[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.149]

مقدمه

در سال‌های اخیر، نگرانی‌های زیست‌محیطی در مورد آلودگی و کاهش منابع آب، از عمده‌ترین چالش‌های بشر محسوب می‌شوند. رنگ‌ها یکی از بزرگ‌ترین گروه‌های آلاینده پساب‌های نساجی و سایر فرایندهای صنعتی هستند. با توجه به اثرات سوء رنگ‌های آلی بر سلامت انسان، فن‌آوری‌های متعددی برای تصفیه پساب رنگی به کار گرفته‌شده است که از آن جمله می‌توان انعقاد و لخته سازی، تصفیه زیستی، تصفیه الکتروشیمیایی، فیلتراسیون غشایی، تبادل یونی، جذب، اکسیداسیون شیمیایی و فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) را نام برد.[۱] اکسیداسیون فوتوکاتالیزوری یکی از تکنیک‌های مؤثر و شناخته‌شده برای کاهش اثرات منفی آلاینده‌های محیط‌زیست محسوب می‌شود.[۲]

فرایند فوتوکاتالیزوری شامل تسریع یک واکنش شیمیایی در حضور موادی به نام فوتوکاتالیزور است، که می‌توانند نور کوانتایی با طول‌موج مناسب را ، با توجه به ساختار نواری اوربیتال‌های خود، جذب نمایند. معمولاً نیمه‌هادی‌هایی مانند TiO_2، به علت شکاف نواری نازک و ساختار الکترونی متمایز (نوار هدایت اشغال نشده و نوار ظرفیت اشغال‌شده) به‌عنوان فوتوکاتالیزور انتخاب می‌شوند .[۳] در فوتوکاتالیزورهای نیمه‌هادی، الکترون‌ها از نوار ظرفیت نیمه‌هادی به کمک نوری با بالاترین تطابق انرژی با شکاف نوار، به نوار هدایت برانگیخته می‌شوند که منجر به ایجاد جفت حفره مثبت (h^+) و الکترون (e^-) می‌شود (شمای ۱). الکترون‌های نوار هدایت عوامل کاهنده خوب (+۰/۵ تا ۱/۵ V-) هستند درحالی‌که حفره‌ها در نوار ظرفیت (h^+) عوامل اکسنده قوی (+۱/۰ تا +۳/۵ V) می‌باشند. الکترون‌ها در نوار هدایت می‌توانند O_2 را به رادیکال‌های سوپر اکسید ($O_2^{\bullet-}$) کاهش دهند (٤). برهم‌کنش $O_2^{\bullet-}$ با حفره‌ها در نوار ظرفیت اکسیژن یکتایی ($^1O_2$) را تولید می‌کند. واکنش بعدی حفره‌های نوار ظرفیت با گروه‌های H_2O یا OH^- جذب‌شده بر روی سطح، منجر به تشکیل رادیکال‌های هیدروکسیل (•OH)، پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و رادیکال پروتونه شده سوپر اکسید (•HOO) می‌شود. در طی فرایند فوتوکاتالیزوری، جفت‌های الکترون/حفره آزاد و گونه‌های اکسنده واکنش‌پذیر مانند $HO_2^{\bullet}$، $HO^{\bullet}$ و $O_2^{\bullet-}$ با آلاینده‌های جذب‌شده روی سطح مانند ترکیبات معدنی و آلی واکنش می‌دهند که سرانجام منجر به تخریب آن‌ها می‌شود.[۵] فرایند فوتوکاتالیزوری اغلب در دمای اتاق انجام می‌شود و آلودگی آلی به‌طور عمده به آب (H_2O) و کربن دی‌اکسید (CO_2) تبدیل می‌شود.[۶]



شکل ۱: مکانیسم تخریب فوتوکاتالیزوری به‌وسیله TiO_2.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.149]

دستاورد برجسته فوجیشیما و هوندا در سال ۱۹۷۲ در واکنش فوتوالکتروشیمیایی شکستن مولکول آب به H_2 و O_2، منجر به کاربردهای گسترده نانو موادی نظیر TiO_2 به‌عنوان نانوفوتوکاتالیزورهای نیمه‌هادی در تصفیه محیط‌زیست و ذخیره و تبدیل انرژی شد.[۷] تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2) یکی از نیمه‌هادی‌هایی است که به علت ویژگی‌های منحصربه‌فردی مانند قیمت پایین، ایمنی، پایداری بالا، عدم سمیت و توانایی اکسایش دسته وسیعی از آلاینده‌ها در دمای محیط، به‌عنوان فوتوکاتالیزور موردتوجه قرارگرفته است.[۸] آنا تاز (چهاروجهی)، روتیل (چهار وجهی) و بروکیت (اورتورومبیک) سه چندشکلی شناخته‌شده TiO_2 هستند. آنا تاز و بروکیت، فازهای پایدار متا (شبه پایدار) هستند، و روتیل ازنظر ترمودینامیکی پایدار است. فازهای آنا تاز و بروکیت TiO_2 در دمای بیش از ^{o}C ۶۰۰ به‌صورت برگشت‌ناپذیر و گرمازا به روتیل تبدیل می‌شوند.[۹] شکل آنا تاز با توجه به تحرک بالاتر جفت الکترون/حفره، و تراکم بیشتر هیدروکسیل سطح ، فعال‌ترین چندشکلی TiO_2 در فرایند فوتوکاتالیزوری می‌باشد. در مقابل، عملکرد فوتوکاتالیستی نانو ذرات TiO_2 روتیل قابل توجه نیست، و فعالیت فاز بروکیت به‌طور کامل بررسی نشده است. تعدادی از عوامل، مانند سطح، اندازه ذرات، نسبت چندشکلی، نوع ناخالصی، غلظت نقص، روش سنتز و خلوص فاز، به شدت فعالیت فوتوکاتالیزوری نانو ذرات TiO_2 را تحت تأثیر قرار می‌دهد.[۱۰]

فعالیت کاتالیزوری TiO_2 بر اساس جذب فوتون باانرژی مناسب و ایجاد انتقال‌دهنده بار (حفره، h^+ و الکترون، e^-) است، بنابراین با توجه به شکاف نواری ۳/۲ eV برای ساختار آنا تاز، در ناحیه نور فرابنفش طیف الکترومغناطیس (nm $\lambda \leq ۳۸۷/۵$) فعال می‌باشد.[۱۱] ویژگی‌های TiO_2 شامل جذب نور، انتقال بار و جذب سطحی به میزان زیادی به نقص‌های ساختاری آن مربوط می‌شود که نقش مهمی را در عملکرد فوتوکاتالیزوری TiO_2 ایفا می‌کند.[۱۲]

در مطالعه حاضر، برای اولین بار، نانو ذرات آنا تاز TiO_2 بدون هیچ تغییری و با استفاده از تابش فرابنفش در رنگ‌بری پساب حاوی ماده رنگ‌زای اسید بلو ۱۱۳ (AB113) به کار گرفته شد. افزون بر این، برای نخستین بار، روش سطح پاسخ (RSM) با طراحی Box-Behnken برای بهینه‌سازی و افزایش راندمان حذف رنگ از فتوکاتالیزور، استفاده شد. روش RSM یک روش آماری کارامل و مقرون‌به‌صرفه در بررسی اثر پارامترهای مختلف بر روی نتایج تصفیه می‌باشد. بهینه‌سازی به روش RSM دارای چندین مزیت عمده نسبت به روش بهینه‌سازی متعارف یک متغیر در یک‌زمان (OVAT) می‌باشد، مانند نیاز به زمان و آزمایش‌های کمتر، و توجه به اثر متقابل پارامترهای مستقل.[۱۳] افزون بر این، اثر پارامترهای عملیاتی مؤثر بر روی رنگزدایی کارامل رنگ‌زای کاتیونی AB113 ، نظیر مقدار کاتالیزگر (mg ۶۰/۰ – ۱۰/۰)، شرایط pH (۸–۳) و زمان تماس (۳۰–۲ دقیقه) برای غلظت mg/L ۲۵ از رنگ موردنظر با استفاده از روش بهینه‌سازی سطح پاسخ مطالعه شده و شرایط بهینه به دست آمد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های فوتوکاتالیزوری

فتوکاتالیزور مورداستفاده در این مطالعه پودر تجاری TiO_2 در ابعاد نانو و در شکل کریستالی آنا تاز با درجه خلوص بیش از ۹۹٪ بوده که از شرکت سیگما آلدریچ خریداری شد. راکتور فتوشیمیایی شامل یک بشر حاوی TiO_2 معلق در محلول و رنگ AB113 بوده که در محفظه‌ای که به‌طور مداوم تهویه می‌شود، قرار می‌گیرد. مخلوط حاصل به‌وسیله همزن مغناطیسی در طول تابش هم‌رده شد. تابش مصنوعی توسط یک لامپ Kr UV ۴۰۰ وات (اسرام) فراهم شد. حدود ۹۰٪ از قدرت تابش در ناحیه UV-A (۴۰۰–۳۱۵ نانومتر) و حدود ۱۰ درصد در

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.149]

ناحیه UV-B (۳۱۵-۲۸۰ نانومتر) بود. فاصله بین لامپ و راکتور ۳۰ سانتی‌متر بوده و قبل از تابش، نمونه به مدت ۵ دقیقه برای ایجاد تعادل جذب و دفع بین سطح کاتالیست و مولکول‌های رنگ هم زده شد.[۱۴]

روش حذف رنگ

رنگ AB113 به عنوان یک مدل برای رنگ نساجی تجاری، از شرکت مرک آلمان خریداری شد. یک محلول رنگ از انحلال ۲۵ mg/L از رنگزای AB113 در آب مقطر آماده شد. pH محلول در محدوده ۸-۳ با افزودن HCl و NaOH رقیق و با استفاده از دستگاه pH متر تنظیم شد (pH متر مدل Line WinLab®Data؛ Windaus). در محدوده pH انتخاب‌شده، AB113 آبی‌رنگ بوده و حداکثر جذب را در طول‌موج ۵۶۵ نانومتر دارد (۱۵). دویست میلی‌لیتر از این محلول اولیه در بشر ۲۵۰ میلی‌لیتر ریخته شد، و مقادیر مختلف کاتالیزور با توجه به طراحی سطح پاسخ تعیین‌شده که در جدول۱ آمده است، اضافه گردید. پس از تابش در دمای اتاق برای یک دوره معینی از زمان، حذف ذرات فتوکاتالیزور به‌وسیله سانتریفوژ انجام شد. سپس، کاهش جذب محلول به‌وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل UV 2100، شیموتزو، ژاپن) در طول‌موج ماکزیمم AB113 (۵۶۵ nm) اندازه‌گیری شد. درصد حذف رنگ به کمک معادله (۱) محاسبه شد:

$$\text{درصد حذف رنگ} = \frac{A_A AA}{A_A} \times 100 \qquad (۱)$$

در این معادله A_o جذب نمونه قبل از انجام آزمایش و A جذب نمونه بعد از انجام آزمایش می‌باشد.

مدل‌سازی و بهینه‌سازی حذف رنگ

برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی حذف رنگ از روش سطح پاسخ با طراحی Box-Behnken دارای سه متغیر و سه سطح استفاده شد. متغیرهای مستقل در این مطالعه شامل مقدار کاتالیزگر، شرایط pH و زمان تماس بودند که در سه سطح در محدوده۱۰ تا ۶۰ میلی‌گرم برای کاتالیزور، ۳ تا ۸ برای pH و ۲ تا ۳۰ دقیقه برای زمان آزمایش شدند. مجموع کل آزمایش‌های درروش طراحی Box-Behnken، ۱۷ آزمایش می‌باشد که در جدول ۱ نشان داده‌شده است. از داده‌های روش طراحی Box-Behnken جهت تعیین تناسب معادلات رگرسیون چندجمله‌ای درجه دوم به‌صورت زیر استفاده شد:

$$A = A_A + \Sigma^A_{AA} A_A A_A + A \,^A_{AA} A_A A^A_A + A \Sigma^{AAA}_{AA} \Sigma^A_{AAAA} A_A A_A A_A A_{AA} \qquad (۲)$$

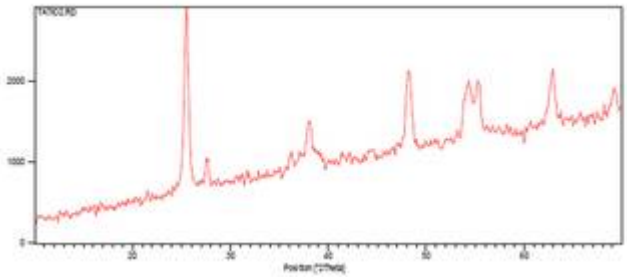
که در آن y پاسخ (حذف رنگ)، x متغیرهای مستقل، و β ضرایب مدل می‌باشند.

یافته‌ها

فوتوکاتالیزور مورداستفاده در این مطالعه، ابتدا به وسیله تکنیک های مختلف طیف سنجی مورد شناسایی و بررسی قرار گرفت. پیک‌های شاخص در طیف پراش اشعه ایکس (XRD) در زوایای 2θ برابر ۲۵/٤، ۳٦/۲، ۳۸/۰، ٤۸/۳، ٥٤/۷، ٥٥/۸ و ٦۳/۰ درجه به ترتیب مربوط به صفحات (۱۰۱)، (۱۰۳)، (۰۰٤)، (۲۰۰)، (۱۰٥)، (۲۱۱) و (۲۰٤) هستند (شکل ۱) که تأییدکننده فاز خالص آنا تاز نانو ذرات TiO_2 می‌باشد.[۱۶و۱۷]

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

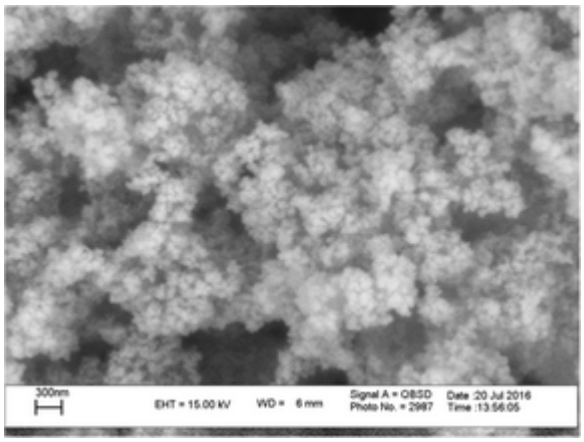
[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.149]



شکل ۱: طیف پراش اشعه ایکس (XRD) نانو کاتالیزور TiO_2

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، نانو ذرات کره‌ای شکل در اندازه‌های nm ۲۷-۱٤ را نشان داد (شکل ۲). بر طبق تصاویر به‌دست‌آمده، نانو ذرات TiO_2 مورداستفاده در این مطالعه تجمع یافته نیستند که این امر مزیتی برای افزایش بازده فعالیت فوتوکاتالیزوری می‌باشد.

طیف‌سنجی FT□IR نانو ذرات TiO_2 در شکل ۳ نشان داده‌شده است.



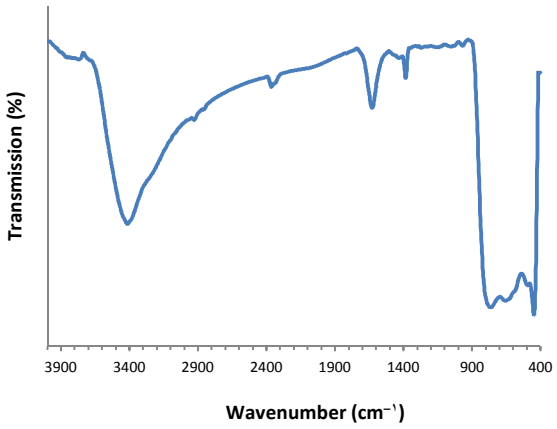
شکل ۲: تصویر SEM نانو کاتالیزور TiO_2

نوار پهن در ناحیه $Cm^{□1}$ ۶۰۰-۵۰۰ مربوط به ارتعاش کششی پیوند Ti–O می‌باشد (۱۸). نوار ظاهرشده در $Cm^{□1}$ ۱٤۰۰ مربوط به ارتعاش Ti□O□Ti می‌باشد.[۱۹] نوارهای مشخص در ۱٦٤۲ و $Cm^{□1}$ ۳٤۵۱ مربوط به گروه‌های OH مولکول‌های آب جذب‌شده بر روی سطح هستند.

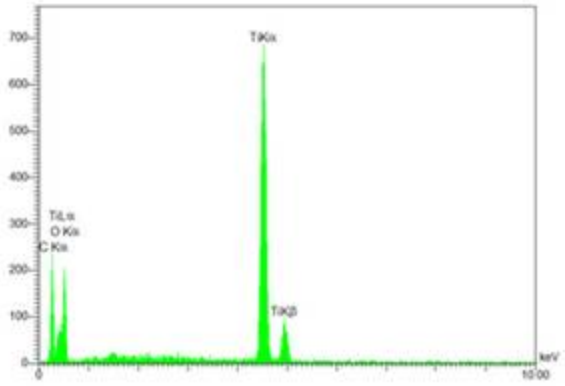
افزون بر این، پیک‌های ظاهرشده در طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS یا EDX) مربوط به اتم های Ti و O بوده و خلوص فوتوکاتالیزور را نشان می‌دهد (شکل ٤).

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

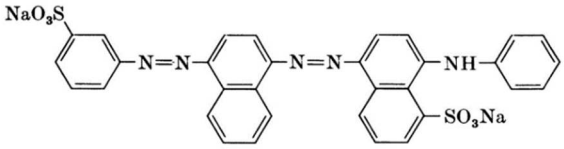
[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.149]



شکل ۳: طیف FT□IR نانو ذرات TiO_2



شکل ٤: طیف EDX فوتوکاتالیزور TiO_2



شکل ۵: ساختار شیمیایی رنگ‌زای AB113

مدل‌سازی و آنالیز آماری

شکل ۵ شمای ساختاری رنگ‌زای AB113 را نشان می‌دهد. AB113 یکرنگ آزو تجاری و متداول است که به‌طور گسترده‌ای در رنگرزی چرم، پشم، پلی آمید و ابریشم مورداستفاده قرار می‌گیرد.[۲۰] افزون بر این، در سال‌های اخیر، به میزان وسیعی به‌عنوان هدف تخریب برای اندازه‌گیری فعالیت فوتوکاتالیزورها موردتوجه قرارگرفته است.[۲۱-۲۳]

ماتریس طراحی متغیرها و درصد حذف رنگزا به‌دست‌آمده در جدول ۱ نشان داده‌شده است. تطبیق داده‌های تجربی به‌دست‌آمده با مدل‌های مختلف و آنالیز واریانس آن‌ها نشان می‌دهد که بهترین مدل برای توصیف حذف رنگ مدل درجه دوم با معادله زیر می‌باشد:

حذف رنگ (٪) = +72.56 +6.53 A +9.73 B +15.87 C □10.26 A2 □5.86 B^2□4.24 C^2 +0.16 AB +5.43 AC □2.69 BC

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

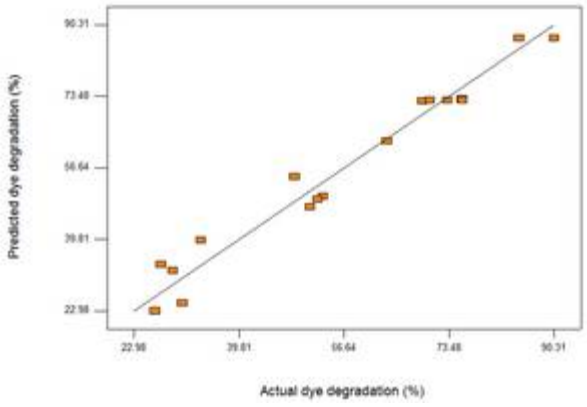
[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.149]

(۳)

که در آن A، B و C به ترتیب مقدار کاتالیزگر، pH و زمان می‌باشند. ضریب تعیین (R^2) مدل به‌دست‌آمده ۰/۹۶۴۹ بوده و مدل در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار می‌باشد (p-value= 0.0002). نتایج حاصل از آنالیز واریانس که در جدول ۲ ارائه‌شده است نشان می‌دهد که هر سه متغیر انتخاب‌شده دارای اثر معنی‌دار بر حذف رنگ می‌باشند. تطابق داده‌های حذف رنگ تجربی و پیشگویی شده توسط مدل در شکل ٦ نشان داده‌شده است.

جدول ۱: نتایج ماتریکس طراحی آزمایش‌های انجام‌شده برای حذف رنگ‌زای AB113

شماره آزمایش	مقدار نانو کاتالیزگر(میلی‌گرم)	pH	زمان (دقیقه)	درصد حذف رنگ
۱	۳۵/۰۰	۵/۵۰	۱٦/۰۰	۷۵/٦۵
۲	٤۹/۸۷	٦/۹۹	۷/٦۸	۵۳/۲٦
۳	٤۹/۸۷	٤/۰۱	۷/٦۸	۳۰/۷۳
٤	۲۰/۱۳	٤/۰۱	۲٤/۳۲	۵۲/٤۱
۵	٤۹/۸۷	٤/۰۱	۲٤/۳۲	۷۵/۵٦
٦	۳۵/۰۰	۳/۰۰	۱٦/۰۰	۳۳/۷۲
۷	۳۵/۰۰	۵/۵۰	۳۰/۰۰	۸٤/٦۸
۸	۲۰/۱۳	٦/۹۹	۲٤/۳۲	٦۳/۵۳
۹	۱۰/۰۰	۵/۵۰	۱٦/۰۰	۲۹/۲٤
۱۰	۲۰/۱۳	٤/۰۱	۷/٦۸	۲٦/۳٤
۱۱	۳۵/۰۰	۸/۰۰	۱٦/۰۰	٦۹/۷۰
۱۲	۲۰/۱۳	٦/۹۹	۷/٦۸	۵۱/۲۰
۱۳	۳۵/۰۰	۵/۵۰	۱٦/۰۰	۷۳/۲۰
٤۱	٦۰/۰۰	۵/۵۰	۱٦/۰۰	٤۸/۷۳
۱۵	۳۵/۰۰	۵/۵۰	۲/۰۰	۲۷/۳۳
۱٦	٤۹/۸۷	٦/۹۹	۲٤/۳۲	۹۰/۳۱
۱۷	۳۵/۰۰	۵/۵۰	۱٦/۰۰	۷۰/٤۰



شکل ۶: تطابق داده‌های حذف رنگ تجربی و پیشگویی شده توسط مدل

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.149]

جدول ۲: نتایج آنالیز واریانس مدل درجه دوم به‌دست‌آمده

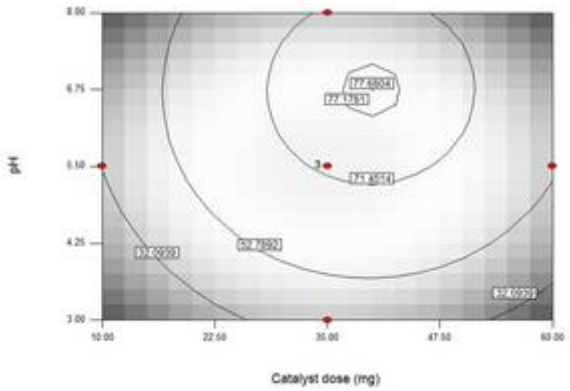
منبع	مجذور مربعات	درجه آزادی	متوسط مربعات	F value	P value
مدل	٦٨٩٨/٨٩	٩	٧٦٦/٥٤	٢١/٣٦	٠/٠٠٠٣
A، (مقدار کاتالیزور)	٥٨٢/٠٦	١	٥٨٢/٠٦	١٦/٢٢	٠/٠٠٥٠
B، (pH)	١٢٩٢/٩٠	١	١٢٩٢/٩٠	٣٦/٠٢	٠/٠٠٠٥
C، (زمان)	٣٤٣٩/٤٦	١	٣٤٣٩/٤٦	٩٥/٨٣	٠/٠٠٠١
A^2	١١٨٧/٢٣	١	١١٨٧/٢٣	٣٣/٠٨	٠/٠٠٠٧
B^2	٣٨٦/٧٢	١	٣٨٦/٧٢	١٠/٧٧	٠/٠١٣٤
C^2	٢٠٣/١٢	١	٢٠٣/١٢	٥/٦٦	٠/٠٤٩٠
AB	٠/٢١	١	٠/٢١	٠/٠٠٥٨	٠/٩٤١٠
AC	٢٣٦/٣١	١	٢٣٦/٣١	٦/٥٨	٠/٠٣٧٢
BC	٥٧/٨٩	١	٥٧/٨٩	١/٦١	٠/٢٤٤٧
باقیمانده	٢٥١/٢٤	٧	٣٥/٨٩		
عدم تطابق	٢٣٧/٤٣	٥	٤٧/٤٩	٦/٨٨	٠ /١٣١٧
خطای خالص	١٣/٨٠	٢	٦/٩٠		
تصحیح کل	٧١٥٠/١٢	١٦			

بحث

تأثیر پارامترهای واکنش بر حذف رنگ

اثر pH و مقدار کاتالیزگر بر میزان حذف رنگ

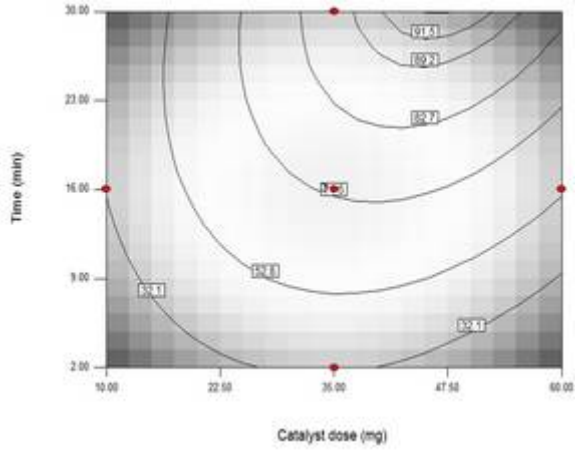
مقدار pH محلول واکنش معمولاً یکی از پارامترهای مهم بر حذف اکسایشی آلودگی‌های آلی محسوب می‌شود. برای اندازه‌گیری اثر مقدار نانو کاتالیزگر بر میزان حذف رنگ، یک سری آزمایش‌های بر روی محلول رنگی با غلظت اولیه ثابت ۵۰ mg/L، pH=۳ و دمای ۲۵ °C انجام شد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود بر اساس نتایج حاصل در این مطالعه، با افزایش مقدار کاتالیزگر به دلیل افزایش سایتهای فعال برای تولید رادیکال‌های آزاد و انجام واکنش تخریب مولکول‌های رنگ، میزان راندمان حذف رنگ افزایش می‌یابد.[۱۴] بنابراین بیشترین مقدار حذف رنگ در بیشترین مقدار کاتالیزگر قابل‌مشاهده است.



شکل ۷: تأثیر مقدار pH و مقدار کاتالیزگر بر کارایی حذف رنگ (در شرایط ثابت: غلظت محلول رنگی ۵۰ mg/L، دمای ۲۵ °C، مقدار کاتالیزگر ۲۷/۵۰ mg، pH= ۳ و زمان ۲۰ دقیقه)

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.149]

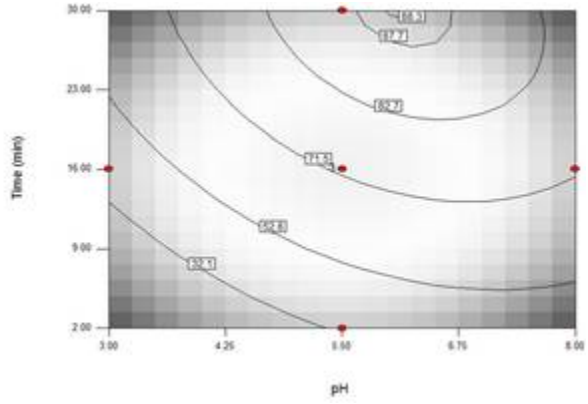


شکل ۸: تأثیر زمان تماس و مقدار کاتالیزگر بر کارایی حذف رنگ (در شرایط ثابت: غلظت محلول رنگی mg/L ۵۰، دمای C˚ ۲۵، مقدار کاتالیزگر mg ۲۷/۵۰، pH= ۳ و زمان ۲۰ دقیقه)

اثر زمان‌بر میزان حذف رنگ

نتایج حاصل از تأثیر زمان تماس بر میزان حذف رنگ AB113 در شکل ۸ به‌صورت نمودار کنتور اثر دو متغیر زمان و مقدار کاتالیزگر نمایش داده‌شده است. زمان تماس یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تأثیرگذار بر فرآیندهای اکسیداسیون فنتون است. در این نمودار مشاهده می‌شود که بیشترین درصد حذف رنگ AB113 مربوط به زمان ۳۰ دقیقه است که به دلیل داشتن فرصت کافی برای تولید بیشتر رادیکال‌های آزاد و تماس آن‌ها با مولکول‌های رنگ قابل توصیف است.[۱۴] نتایج حاصل از تأثیر pH بر میزان حذف رنگ AB113 در شکل ۹ به‌صورت نمودار کنتور اثر دو متغیر زمان و pH نمایش داده‌شده است. بیشترین میزان حذف رنگ در بیشترین زمان و pH برابر ۶/۵ مشاهده می‌شود.

بازده فوتوکاتالیزوری نانو ذرات آنا تاز TiO_2 برای واکنش رنگ‌بری محلول mg/L ۲۵ از رنگ‌زای AB113 در طی زمان دنبال شد. با استفاده از روش سطح پاسخ، شرایط بهینه برای حصول بالاترین راندمان حذف رنگ پیشگویی شد.



شکل ۹: تأثیر زمان تماس و مقدار پی اچ بر کارایی حذف رنگ (در شرایط ثابت: غلظت محلول رنگی mg/L ۲۵، دمای C˚ ۲۵، مقدار کاتالیزور mg ۳۵)

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.149]

این شرایط شامل زمان ۲۹/۸۷ دقیقه، مقدار کاتالیزگر ۴۲/۰۰ میلی‌گرم و pH برابر ٦/٥٦ می‌باشد و راندمان حذف رنگ پیشگویی شده توسط مدل ۹۳/۰۸ درصد است. راندمان واقعی حذف رنگ در این شرایط ۹۵/۳۰ درصد می‌باشد که انحراف کمی از مقدار پیشگویی شده دارد. آزمایش‌های کنترلی نشان داد که در غیاب کاتالیزور حذف قابل‌ملاحظه‌ای مشاهده نمی‌شود و در طی ۱۲۰ دقیقه، تنها ۲۰٪ حذف رنگ مشاهده شد. درحالی‌که در حضور نانو کاتالیزور آنا تاز TiO_2 در کمتر از ۳۰ دقیقه حذف رنگ به بیش از ۹۵٪ رسید. این مشاهده تأیید می‌کند که حذف رنگ‌بر اساس جذب مستقیم بر روی سطح کاتالیزور نیست.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که فرآیند اکسیداسیون فوتوکاتالیزوری به‌وسیله نانو ذرات آنا تاز TiO_2 یک روش مناسب برای حذف رنگ‌های آزو در محلول‌های آبی است. راندمان حذف رنگ به عوامل زیادی ازجمله مقدار کاتالیزگر، شرایط pH و مدت‌زمان انجام فرایند بستگی دارد. در این مطالعه با استفاده از مدل درجه دوم حاصل از روش سطح پاسخ، بیشترین مقدار حذف رنگ AB113 در شرایط بهینه مقدار کاتالیزگر ۴۲/۰۰ میلی‌گرم، pH برابر ٦/٥٦ و زمان ۲۹/۸۷ دقیقه حاصل شد. راندمان حذف رنگ در این شرایط برابر ۹۵/۳٪ به دست آمد. با توجه به نتایج حاصل، این روش می‌تواند به‌عنوان یک روش کارامل برای تصفیه پساب‌های حاوی رنگ بکار رود.

سپاسگزاری

نویسندگان مراتب تقدیر و تشکر خود را از دانشگاه گیلان و گروه شیمی برای حمایت از این پروژه تحقیقاتی، ابراز می‌دارند.

منابع

1. Hanifehpour1. Y, Soltani B, Amani-Ghadim AR, Hedayati B, Khomami B, Joo SW. Synthesis and characterization of samarium-doped ZnS nanoparticles: A novel visible light responsive photocatalyst. Mater Res Bul 2016; 76: 411-421.
2. Bai W, Cai L, Wu C, Xiao X, Fan X, Chen K, Lin J. Alcohothermal synthesis of flower-like ZnS nano-microstructures with high visible light photocatalytic activity. Mater Lett 2014; 124: 177–180.
3. Ng M, Kho ET, Liu S, Lim M, Amal R. Highly adsorptive and regenerative magnetic TiO_2 for natural organic matter (NOM) removal in water. Chem Eng J 2014; 246: 196–203.
4. Lin YH, Hsueh HT, Chang CW, Chu H. The visible light-driven photodegradation of dimethyl sulfide on S-doped TiO_2: Characterization, kinetics, and reaction pathways. Appl Catal B Environ 2016; 199: 1-10.
5. Etacheri V, Valentin CD, Schneider J, Bahnemann D, Pillai SC. Visible-Light Activation of TiO_2 Photocatalysts: Advances in Theory and Experiments. J Photochem Photobiol C Photochem 2015; 25: 1–29.
6. Nath RK, Zain MFM, Jamil M. An environment-friendly solution for indoor air purification by using renewable photocatalysts in concrete: A review. Renew Sustain En Rev 2016; 62: 1184–1194.
7. Fujishima A, Honda K. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. Nature. 1972; 238: 37− 38.
8. Chen Q, Wu S, Xin Y. Synthesis of Au-CuS-TiO_2 nanobelts photocatalyst for efficient photocatalytic degradation of antibiotic oxytetracycline. Chem Eng J 2016; 302: 377–387.
9. Kandiel TA, Robben L, Alkaimad A, Bahnemann D. Brookite versus anatase TiO_2 photocatalysts: phase transformations and photocatalytic activities. Photochem Photobiol Sci 2013; 12: 602-609.
10. Zhang J, Zhou P, Liu J, Yu J. New understanding of the difference of photocatalytic activity among anatase, rutile and brookite TiO_2. Phys Chem Chem Phys 2014; 16: 20382-20386.
11. Hanaor DAH, Sorrell CC. Review of the anatase to rutile

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.149]

phase transformation. J Mater Sci 2011; 46: 855–874.

12. Šuligoj A, Štangar UL, Ristić A, Mazaj M, Verhovšek D, Tušar NN. TiO_2–SiO_2 films from organic-free colloidal TiO_2 anatase nanoparticlesas photocatalyst for removal of volatile organic compounds fromindoor air. Appl Catal B Environ 2016; 184: 119–131.
13. Wani TA, Ahmad A, Zargar S, Khalil NY, Darwish IA. Use of response surface methodology for development of new microwell-based spectrophotometric method for determination of atorvastatin calcium in tablets. Chem Centr J 2012; 6: 134–143.
14. Chaibakhsh N, Ahmadi N, Zanjanchi MA. Optimization of photocatalytic degradation of neutral red dye using TiO_2 nanocatalyst via Box-Behnken design. Desal Water Treat 2016; 57: 9296-9306.
15. Pandiyarajan T, Mangalaraja RV, Karthikeyan B, Sathishkumar P, Mansilla HD, Contreras D, Ruiz J. UV-A light-induced photodegradation of Acid Blue 113 in the presence of Sm-doped ZnO nanostructures. Appl Phys A Mater Sci Proces 2015; 119 (2): 487-495
16. Lin XH, Wu Y, Xiang J, He D, Li SF. Elucidation of mesopore-organic molecules interactions in mesoporous TiO_2 photocatalysts to improve photocatalytic activity. Appl Catal B Environ 2016; 199: 64–74.
17. Borges ME, Sierra M, Cuevas E, García RD, Esparza P. Photocatalysis with solar energy: Sunlight-responsive photocatalyst based on TiO_2 loaded on a natural material for wastewater treatment. Solar En 2016; 135:527-35.
18. Beranek R, Kisch H. Tuning the optical and photoelectrochemical properties of surface-modified TiO_2. Photochem Photobiol Sci 2008; 7(1):40-48.
19. Šuligoj A, Štangar UL, Ristić A, Mazaj M, Verhovšek D, Tušar NN. TiO_2–SiO_2 films from organic-free colloidal TiO_2 anatase nanoparticles as photocatalyst for removal of volatile organic compounds from indoor air. Appl Catal B Environ 2016; 184:119-31.
20. Moura DC, Quiroz MA, Silva DR, Salazar R, Martínez-Huitle CA. Electrochemical degradation of Acid Blue 113 dye using TiO_2-nanotubes decorated with PbO_2 as anode. Environ Nanotechn Monit Manag 2016; 5: 13–20.
21. Shokohi R, Jafari SJ, Siboni M, Gamar N, Saidi S. Removal of Acid Blue 113 (AB113) dye from aqueous solution by adsorption onto activated red mud: a kinetic and equilibrium study. Sci J Kurdistan U Med Sci 2011; 16: 55-65.
22. Zazouli MA, Cherati JY, Balarak D, Ebrahimi M, Mahdavi Y. Investigating the Removal Rate of Acid Blue 113 from Aqueous Solution by Canola (Brassica Napus). J Mazandaran U Med Sci 2013; 22: 71− 78.
23. Zayani G, Bousselmi L, Pichat P, Mhenni F, Ghrabi A. Photocatalytic degradation of the Acid Blue 113 textile azo dye in aqueous suspensions of four commercialized TiO_2 samples. J Environ Sci Health A Toxic/Hazard Sub Environ Eng 2008;43 (2): 202-209.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.149]

Optimization of Photodegradation of Acid Blue 113 Dye on Anatase TiO_2 Nanocatalyst Using Response Surface Methodology

Sajad Talebi, Naz Chaibakhsh Langroudi*, Zeinab Moradi-Shoeili

Department of Chemistry, Faculty of Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

** E-mail: nchaibakhsh@guilan.ac.ir*

Received: 28 Sep 2016 ; Accepted: 31 Jan 2017

ABSTRACT

Background: Over the last decades, many efforts have been made to improve the wastewater purification by developing suitable treatment methods for various pollutants removal. Most studies in this field have focused on heterogeneous photocatalysis which use semiconductor oxides, such as titanium dioxide (TiO_2). This useful technique is based on the pollutant decomposition by means of a chemical reaction occurring on a photocatalytic surface activated by light with a specific wavelength. The efficiency for removing of persistent organic pollutants such as azo dyes, photostability and inertness to chemical environment has made TiO_2 an important photocatalytic material. In this study, the photodegradation of an industrial textile dye Acid blue 113 (AB113), using anatase TiO_2 nanoparticles and ultraviolet (UV-A) radiation, has been performed in an aqueous heterogeneous medium.

Methods: The photocatalytic process was monitored by the UV–visible spectrometry, and different dosages of catalyst (10.00-60.00 mg), pH conditions (3-8), contact time (2-30 min), at the dye concentration of 25 mg/L were used. In addition, response surface methodology based on a three-variable three-level Box-Behnken design was employed to study and optimize the photocatalytic process. The interactive effects of three operational parameters including irradiation time, pH, and the catalyst amount on the dye degradation were analyzed.

Results: The dye degradation efficiency was accurately modeled by a quadratic equation with an R^2 of 0.9649. The optimum conditions for the dye removal were found at 29.78 min, pH 6.56 and catalyst dose of 42 mg in 100 mL of the solution. At this condition, 95.3% of the dye was removed.

Conclusion: The results show that anatase TiO_2 nanoparticles present excellent photocatalytic activity on the degradation of AB113 under UV irradiation. Therefore, the photodegradation of dyes using anatase TiO_2 nanoparticlesas can be efficiently used under optimum conditions for treatment of dye-containing industrial effluents.

Keywords: Photocatalyst; Dye degradation, Anatase TiO_2 nanoparticles, Acid blue 113, Box-Behnken design

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.149]