دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال سوم، شماره‌ی ۱۳
زمستان ۱۳۹۱، صفحات ۶۹-۶۳

تخریب فوتوکاتالیتیکی رنگ آبی راکتیو۲۱ با نور مرئی القایی به‌وسیله نانوذرات TiO_2

پریسا رسولی‌ونه‌آباد
گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، ایران
Ailarrasouli@yahoo.com

علی مهری زاد
گروه شیمی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، ایران
Ali.mehrizad@yahoo.com

چکیده
تحقیق حاضر، کارائی نانوذرات تیتانیم دی اکسید را در مجاورت نور مرئی و نور مرئی القائی در حذف رنگ آبی راکتیو ۲۱ از محلول‌های آبی بررسی می‌کند. آزمایشات تجربی در یک جعبه مجهز به لامپ مرئی و فلورسنت (مرئی القائی) برای مطالعه اثر پارامترهای مختلفی مثل مدت زمان تابش، مقدار کاتالیزور، pH، غلظت اولیه و دما انجام شد. نتایج آزمایشات نشان داد که سیستم نانوذرات تیتانیم دی اکسید-نور مرئی القائی کارائی بیشتری نسبت به سیستم نانوذرات تیتانیم دی اکسید-نور مرئی دارد. بررسی پارامترهای عملیاتی نشان داد که در سیستم نانوذرات تیتانیم دی اکسید-نور مرئی القائی در مدت زمان تابش دهی ۱۰ دقیقه، مقدار ۱ گرم از کاتالیزور و در محیط قلیائی (pH= ۹) راندمان حذف رنگ بالغ بر ۴۰٪ اتفاق می‌افتد. هم‌چنین نتایج نشان داد که افزایش غلظت رنگ باعث کاهش راندمان حذف می‌شود. مطالعات سینتیکی نیز نشان داد که حذف رنگ آبی راکتیو ۲۱ توسط سیستم نانوذرات تیتانیم دی اکسید-نور مرئی القائی از مدل مرتبه صفر تبعیت می‌کند. به عبارت دیگر، سرعت حذف رنگ مستقل از غلظت آن می‌باشد.

کلید واژه‌ها: نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید، رنگ آبی راکتیو۲۱، فلورسنت.

مقدمه

آب یکی از فراوان‌ترین ترکیبات روی زمین بوده و از عوامل ضروری برای حیات کلیه جانداران اعم از انسان، حیوان و گیاه است. غالب واکنش‌های حیاتی در محیط آبی جریان می‌یابند. به طور کلی آب یک حلال عمومی است و بدون آن کلیه اعمال حیاتی جانداران متوقف خواهد شد. موارد مصرف آب در زندگی امروزه بشر بسیار متنوع است که از آن جمله به مصارف آشامیدنی، کشاورزی، دامپروری، تولید نیرو، مصارف مختلف صنعتی، مصارف مختلف شهری و غیره می‌توان اشاره کرد. تولید فاضلاب‌های صنعتی و بهداشتی و نفوذ آن‌ها به منابع آب و از طرفی محدودیت در منابع آب قابل استفاده در صنعت، کشاورزی و شرب، جوامع بشری را به استفاده بهینه از این منابع و نیز استفاده مجدد از آب‌های تصفیه شده واداشته است[۱،۲].

حذف آلودگی‌های آلی و معدنی نامطلوب از آب در چندین سال اخیر جزء نگرانی‌های مهم بشری بوده است. این آلودگی‌ها ممکن است از منابع مختلفی از جمله تخلیه نادرست پساب خروجی صنایع شیمیایی مختلف مانند پتروشیمی و پالایشگاه‌های نفت خام، نساجی، کاغذسازی و غیره ایجاد شوند. تقریبا ۱ الی ۲۰ درصد کل رنگ‌های تولیدی در جهان طی فرایند رنگرزی از دست رفته و وارد پساب‌ها می‌شوند[۳]. در صورتی که چنین پساب‌هایی بدون تصفیه وارد محیط‌زیست شوند اکوسیستم آبی را به‌طور نامطلوبی تحت تاثیرقرار می‌دهند[۶]. واردشدن چنین پساب‌های رنگی به محیط زیست سبب آلودگی وسیع گردیده و سرمنشاء تولید محصولات جانبی از طریق اکسیداسیون، هیدرولیز، و سایر و اکنش‌های شیمیایی می‌باشد[۴].

رنگ‌های راکتیو فتالوسیانین[1] از مهم‌ترین رنگ‌های مورد استفاده در صنایع رنگرزی و نساجی می‌باشند که در واقع کمپلکس‌های فلزی هستند که در ایجاد رنگ‌های آبی و سبز مورد استفاده قرار می‌گیرند. اغلب چنین رنگ‌هایی از مشتقات فتالوسیانین مس می‌باشند (مثل رنگ راکتیو آبی ۲۱[2]) و به دلیل حضور فلز مس در این رنگ‌ها، سمی و خطرناک هستند که حتی در غلظت‌های پائین نیز برای سلامتی موجودات زنده، به‌ویژه انسان مضر می‌باشند. بنابراین حذف چنین ترکیباتی از محیط‌های آبی بسیار ضروری به نظر می‌رسد.

برای حذف آلاینده‌های رنگی از روش‌های مختلف فیزیکی (مثل فیلتراسیون غشائی، میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون، جذب سطحی، انعقاد و ته نشینی) و شیمیائی (مثل روش‌های بیولوژیکی و فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته) استفاده شده است.

در بین روش‌های مختلف حذف آلاینده‌های زیست محیطی، انتخاب فناوری‌های ساده و کم هزینه که ضمن بالا بودن کارایی، پیاده‌سازی آن‌ها در مقیاس صنعتی نیز امکان‌پذیر بوده و دارای قابلیت تخریب کامل آلاینده‌ها و تبدیل آن‌ها به مواد بی‌ضرر باشد حائز اهمیت است که در این میان، فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته[3] با توجه به عملکرد ساده، راندمان بالا و قابلیت حذف گسترده وسیعی از ترکیبات شیمیایی، به عنوان یک روش اقتصادی و کارآمد محسوب می‌شود. از جمله فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته فرایند فوتوکاتالیزوری[4] است که در این روش از یک کاتالیزور مناسب در مجاورت تابشی با طول موج معین استفاده می‌شود. نانوذرات تیتانیوم دی اکسید از جمله کاتالیزورهای متداول مورد استفاده در فرایندهای فوتوکاتالیزوری هستند که در مجاورت تابش ماوراءبنفش نقش فوتوکاتالیزوری خود را ایفا می‌نمایند.

فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته،روش‌های جدید باراندمان بالایی هستندکه طیف وسیعی ازترکیبات آلی و غیرآلی راکه دربرابر روش‌های مرسوم مقاوم‌اند را اکسید و تخریب می‌کنند. فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته جزو فرایندهای کارآمد برای تصفیه آب و هوا شناخته می‌شوند.

به‌طور کلی تغییر در سرعت واکنش‌های شیمیایی به کمک یک ماده فعال نوری (فوتوکاتالیزور) به فرایندهای

1-Phthalocyanine

2-Reactive blue 21
3-Advanced Oxidation Processes (AOPs)
4-Photocatalysis

فوتوکاتالیزوری موسوم است. فوتوکاتالیزورها اکسیدهای فلزی نیمه رسانایی هستند که از نظر آرایش الکترونی دارای یک لایه ظرفیت پر با انرژی کم و یک لایه رسانائی خالی با انرژی بالا هستند.

با توجه به این‌که در مورد ارزیابی کارائی فوتوکاتالیزوری نانوذرات تیتانیوم دی اکسید در مقابل تابش مرئی مطالعات بسیار اندکی صورت پذیرفته است لذا در این تحقیق در نظر است حذف رنگ راکتیو آبی ۲۱ با استفاده از نانوذرات تیتانیم دی اکسید در حضور نور مرئی و نور مرئی القائی مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا اثر پارامترهای کلیدی هم‌چون pH، غلظت اولیه رنگ و مقدار کاتالیزور مورد مطالعه قرار خواهد گرفت و سینتیک واکنش نیز بررسی خواهد شد.

بخش تجربی

مواد مورد استفاده

رنگ راکتیو آبی ۲۱ شرکت Merck، نانوذرات تیتانیم دی اکسید شرکت Degussa با متوسط اندازه ذرات کمتر از nm ۲۱، مساحت سطح ویژه m^2/g ۵۰-۱۵ و خلوص ۹۹/۵٪، هیدروکلریک اسید شرکت Merck، سدیم هیدروکسید شرکت Merck، اتانول شرکت Merck، استون شرکت Merck، آب مقطر.

دستگاه‌های مورد نیاز

اسپکتروفتومتر UV-Vis مدل DR 5000 شرکت HACH، pH متر دیجیتالی مدل 3110 شرکت WTW، ترازوی دیجیتالی با دقت g ۰/۰۰۱ مدل PCB100-3 شرکت KERN PCB، همزن مغناطیسی با قابلیت تنظیم دما و دور همزن مدل ZMS74 شرکت زاگ شیمی، دستگاه سانتریفوژ مدلCE.148 شرکت شیمی فان، جعبه مجهز به لامپ اشعه مرئی، میکروفیلتر با قطر منافذ ۲۲ میکرومتر.

روش کار

اثر فوتوکاتالیزوری نانوذرات تیتانیم دی اکسید تحت نور مرئی و نور مرئی القائی در حذف رنگ راکتیو آبی ۲۱ مطالعه شده است. بدین ترتیب که بعد از تهیه محلول مادر و تعیین طول موج جذب ماگزیمم (λ_{max}) راکتیو آبی ۲۱، اثر پارامترهای مؤثر بر فرایند حذف رنگ از محلول‌های آبی (مدت زمان تابش دهی، مقدار کاتالیزور، pH و غلظت اولیه) بررسی شد. ابتدا g ۰/۱ از پودر راکتیو آبی ۲۱ را در بالن حجمی با آب مقطر حل کرده و سپس به حجم mL ۱۰۰ رساندیم تا محلولی از راکتیو آبی ۲۱ به غلظت mg/L ۱۰۰۰ به عنوان محلول مادر تهیه شود. هم‌چنین به منظور تهیه محلول‌هایی با غلظت‌های مورد نظر از راکتیو آبی ۲۱، حجم مشخصی از محلول مادر انتخاب و با آب مقطر به حجم رسانده شد. درحال حاضر برای اندازه‌گیری تغییرات غلظت راکتیو آبی ۲۱ از مشخصات جذبی این ماده در ناحیه UV-Vis استفاده شده است و این‌که طول موج انتخابی برای تعیین میزان جذب در اسپکتروفتومتر، طول موج ماگزیمم (λ_{max}) آن بود، لذا محلول راکتیو آبی ۲۱ با غلظت mg/L ۱۰۰ تهیه شد و به کمک دستگاه اسپکتروفتومتر UV-Vis طیف جذبی ترکیب در محدوده nm ۸۰۰-۲۰۰ گرفته شد طول موج Max ترکیب راکتیو آبی ۲۱ nm ۳۳۸ بود. آزمایش‌های حذف رنگ راکتیو آبی ۲۱ به روش ناپیوسته[5] در یک فوتوراکتور شامل لامپ فلورسنت (تابش نور مرئی القائی)، همزن مغناطیسی و کریستالیزور ۵۰۰ میلی‌لیتری انجام شد. تغییرات غلظت راکتیو آبی ۲۱ در طول زمان نسبت به پارامترهای مختلف نظیر مقدار کاتالیزور، pH محلول و غلظت اولیه راکتیو آبی ۲۱ مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور مقایسه بهتر تأثیر عامل مورد بررسی، عوامل دیگر در شرایط پایه، ثابت نگه داشته شد. شرایط پایه برای پارامترهای بررسی شده، بسته به نوع آزمایش، عبارت بود از مقدار g ۰/۱از نانوذرات تیتانیم دی اکسید، غلظت اولیهmg/L ۱۰۰از محلول راکتیو آبی ۲۱،pH برابر با ۶/۸ (pH محلول مادر) و دمای ^oC ۲۵. در هر آزمایش، مقدار

5-Batch

۲۵۰ mL از محلول راکتیو آبی ۲۱ (با غلظت و pH معین) در کریستالیزور ۵۰۰ mL ریخته شد و بعد از اضافه نمودن کاتالیزور در دمای معین همزده شد. در طول فرایند و در فواصل زمانی معین، نمونه برداری از ظرف انجام شد و ابتدا از کاغذ صافی عبور داده شدند و سپس به کمک دستگاه سانتریفوژ نمونه‌ها صاف شدند. با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مقدار جذب[6] محلول صاف شده تعیین و غلظت آن محاسبه شد. برای بررسی اثر تابش در فرایند حذف رنگ راکتیو آبی ۲۱ از محلول‌های آبی به کمک نانوذرات تیتانیم دی اکسید، دو آزمایش، یکی حذف رنگ مورد نظر با کمک نانوذرات TiO_2 در حضور نور مرئی و دیگری حذف رنگ با کمک نانوذرات TiO_2 در حضور نور مرئی القائی انجام شد. برای این منظور ۰/۱ g از Nano-TiO_2 به ۲۵۰ mL از محلول راکتیو آبی ۲۱ با غلظت mg/L ۱۰۰ و pH≈ ۶/۸ در دمای ۲۵ °C اضافه شد. مخلوط حاصل به مدت ۱۱۰ دقیقه بر روی همزن مغناطیسی همزده شد و در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه نمونه برداری از آن انجام گرفت. برای مطالعه اثر مقدار کاتالیزور در میزان حذف رنگ راکتیو آبی ۲۱، آزمایشات در دو مقدار مختلف Nano-TiO_2 (۰/۰۱ و ۰/۱ g) و یکسان بودن سایر عوامل (۲۵۰mL محلول راکتیو آبی ۲۱ با غلظت ۱۰۰ mg/L و pH≈ ۶/۸ در دمای ۲۵ °C) دنبال شد. به منظور بررسی اثر pH محلول در میزان حذف رنگ، محلول‌هایی با pH برابر ۳، ۷ و ۹ با هیدروکلریک اسید و سدیم هیدروکسید و به کمک دستگاه pH متر تهیه شد. در این مرحله،pH محلول به عنوان تنها متغیر آزمایش بوده و آزمایشات با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها (۲۵۰mL محلول راکتیو آبی ۲۱با غلظت ۱۰۰ mg/L، ۰/۱ g Nano-TiO_2 و دمای ۲۵ °C) انجام شد. برای بررسی اثر غلظت اولیه محلول راکتیو آبی ۲۱ در میزان حذف آن، محلول‌هایی با غلظت ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ mg/L تهیه شد و بعد از اضافه نمودن کاتالیزور، آزمایشات دنبال شد. در این آزمایش‌ها تنها متغیر، غلظت اولیه محلول بوده و بقیه پارامترها (۰/۱ g Nano-TiO_2، pH≈ ۶/۸ و دمای ۲۵ °C) ثابت در نظر گرفته شد.

نتایج وبحث‌ها

بررسی عوامل در حذف آبی راکتیو ۲۱ طی فرایند Nano-TiO_2 در حضور نور مرئی و نور مرئی القائی

در این قسمت، بررسی عوامل موثر در حذف آبی راکتیو ۲۱ طی فرایند Nano-TiO_2 در حضور نور مرئی و نور مرئی القائی و تعیین شرایط بهینه انجام گرفت.

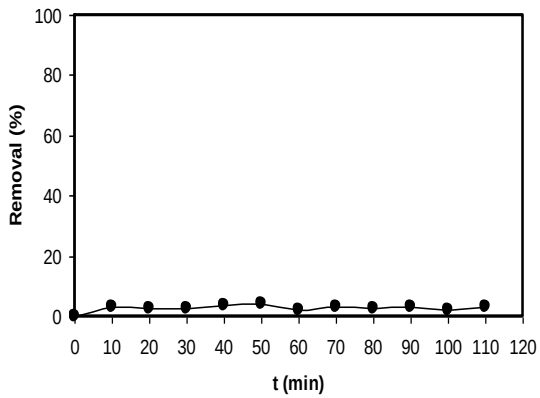
مطالعه اثر Nano-TiO_2 در حضور نور مرئی و نور مرئی القائی

در این مرحله، تأثیر Nano-TiO_2 در حضور نور مرئی و نور مرئی القائی بر روی حذف رنگ راکتیو آبی ۲۱ بررسی شده است.

بررسی اثر Nano-TiO_2 در حضور نور مرئی

نتایج حاصل از اثر نانوذرات تیتانیم دی اکسید در حضور نور مرئی در حذف رنگ راکتیو آبی ۲۱ در شکل۱ آورده شده است.

با توجه به شکل ۱ ملاحظه می‌شود که حداکثر راندمان حذف رنگ راکتیو آبی ۲۱ توسط نانوذرات تیتانیم دی اکسید در حضور نور مرئی به میزان حدود ۴ ٪ می‌باشد که همین مقدار اندک حذف رنگ را هم به فرایند جذب سطحی رنگ بر روی نانوذرات تیتانیم دی اکسید می‌توان نسبت داد.



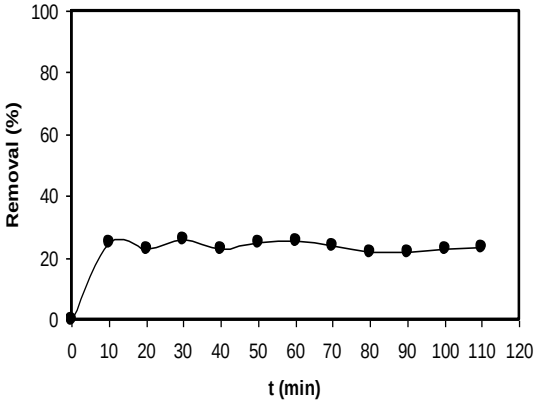
شکل۱: اثر Nano-TiO_2 در حذف راکتیو آبی ۲۱ در حضور نور مرئی
(C_0=۱۰۰ mg/L; m=۰/۱ g/۲۵۰mL; pH=۶/۸; T= ۲۵ °C)

6 -Absorbance

بررسی اثر $Nano\text{-}TiO_2$ در حضور نور مرئی القائی

نتایج حاصل از اثر نانوذرات تیتانیم دی اکسید در حضور نور مرئی القائی در حذف رنگ راکتیو آبی ۲۱ از محلول‌های آبی در شکل ۲ ارائه شده است.

از شکل ۲ نتیجه می‌شود که فرایند راندمان حذف راکتیو آبی ۲۱ توسط سیستم نانو تیتانیم دی اکسید–نور مرئی القائی به مراتب بیشتر از سیستم نانو تیتانیم دی اکسید–نور مرئی است. با توجه به نتایج این قسمت، در ادامه، اثر پارامترهای مؤثر بر فرایند حذف رنگ راکتیو آبی ۲۱ توسط نانوذرات تیتانیم دی اکسید در حضور نور نورئی القائی بررسی می‌شود.



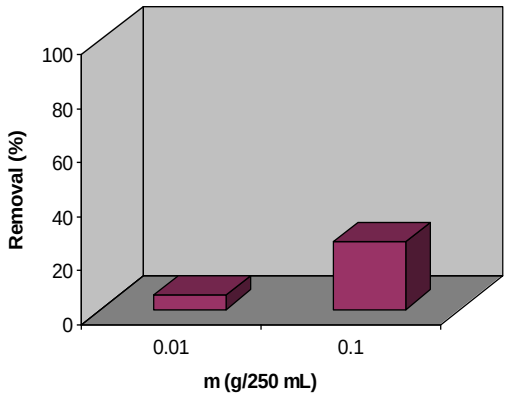
شکل ۲: اثر $Nano\text{-}TiO_2$ در حذف راکتیو آبی ۲۱ در حضور نور مرئی القائی

(C_0=۱۰۰ mg/L; m=۰/۱ g/۲۵۰mL; pH=۶/۸; T= ۲۵ °C)

بررسی اثر مقدار کاتالیزور

به منظور بررسی اثر مقدار کاتالیزور در حذف رنگ راکتیو آبی ۲۱، آزمایشات در حضور دو مقدار مختلف از $Nano\text{-}TiO_2$ (۰/۰۱ و ۰/۱ گرم) انجام شد که نتایج حاصل در شکل (۴-۳) گزارش شده است.

با توجه به شکل ۳ ملاحظه می‌شود که تغییر در مقدار کاتالیزور تأثیر قابل توجهی در تغییر راندمان حذف داشته و در مقادیر بیشتر کاتالیزور (۰/۱ گرم از $Nano\text{-}TiO_2$) راندمان حذف افزایش می‌یابد. در واقع دلیل اصلی حذف رنگ از محلول‌های آبی توسط فرایند فوتوکاتالیزوری، حضور رادیکال‌های هیدروکسیل می‌باشد که نتایج حاصل از این قسمت نشان می‌دهد که در مقادیر بالای کاتالیزور مقدار قابل توجهی از این رادیکال‌ها تشکیل می‌شود که قادر به حذف مقدار بیشتری از رنگ می‌باشد.



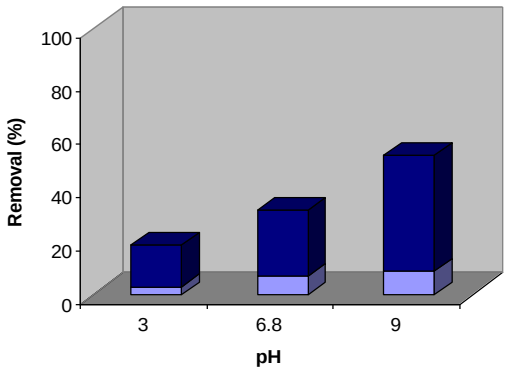
شکل ۳: اثر مقدار کاتالیزور در حذف راکتیو آبی ۲۱ توسط سیستم $Nano\text{-}TiO_2$ و نور مرئی القائی

(C_0=۱۰۰ mg/L; pH=۶/۸; T= ۲۵ °C)

بررسی اثر pH

pH محلول از دیگر عوامل مؤثر بر فرایند فوتوکاتالیزوری می‌باشد و لذا جهت بررسی این اثر، محلول‌های اسیدی، خنثی (pH خود محلول رنگ) و قلیایی از راکتیو آبی ۲۱تهیه شد و تاثیر pH در میزان حذف رنگ توسط سیستم نانو تیتانیم دی اکسید–نور مرئی القائی بررسی شد که نتایج در شکل ۴ آورده شده است.

با توجه به نتایج مندرج در شکل ۴ ملاحظه می‌شود که با افزایش pH محلول راندمان حذف رنگ راکتیو آبی ۲۱ نیز افزایش می‌یابد که دلیل آن را به افزایش میزان رادیکال‌های هیدروکسیل می‌توان نسبت داد.



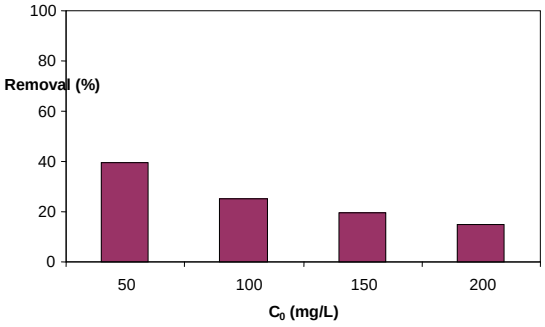
شکل ۴: اثر مقدار pH در حذف راکتیو آبی ۲۱ توسط سیستم $Nano\text{-}TiO_2$ و نور مرئی القائی

(C_0=۱۰۰ mg/L; m=۰/۱ g/۲۵۰ mL; T= ۲۵ °C)

بررسی اثر غلظت اولیه راکتیو آبی ۲۱

از نقطه نظر کاربردی بررسی غلظت اولیه رنگ در بازده حذف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین غلظت‌های مختلفی از رنگ شامل ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ mg/L تهیه شد و بعد از اضافه نمودن کاتالیزور، آزمایشات دنبال شد که نتایج در شکل ۵ گزارش شده است.

با توجه به نمودار (۴-۵) ملاحظه می‌شود که افزایش مقدار غلظت اولیه رنگ، موجب کاهش راندمان حذف می‌شود. در توجیه این پدیده می‌توان گفت، چون علی‌رغم افزایش غلظت رنگ و به تبع آن افزایش مولکول‌های رنگ، مقدار ثابتی از رادیکال‌های هیدروکسیل در محیط وجود دارند و لذا با افزایش غلظت رنگ، راندمان حذف رنگ کاهش می‌یابد.



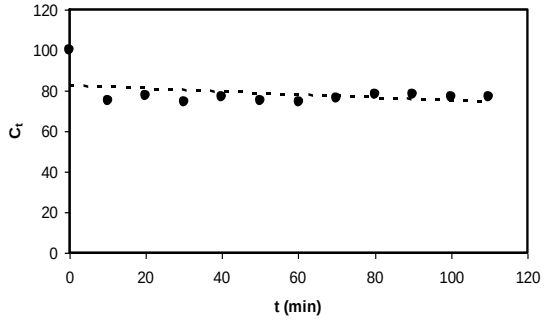
شکل ۵: اثر مقدار غلظت اولیه راکتیو آبی ۲۱ در حذف آن توسط سیستم Nano-TiO_2 و نور مرئی القائی

(m=۰/۱ g/۲۵۰ mL; pH=۶/۸; T= ۲۵ °C)

مطالعات سینتیکی

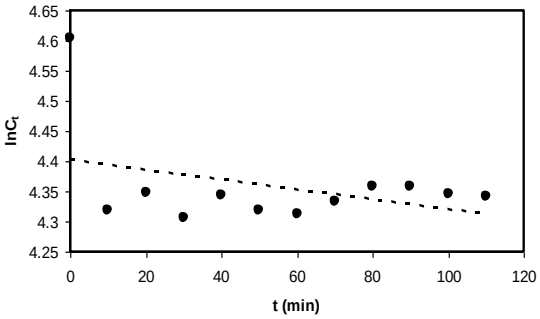
جهت بررسی میزان تغییرات غلظت رنگ نسبت به زمان می‌توان از بررسی‌های سینتیکی بهره برد. در این راستا مدل-های سینتیکی مرتبه صفر، اول، دوم و سوم مطالعه شد که نتایج حاصل به ترتیب در شکل‌های۶ الی ۹ آورده شده است.

با توجه به مقادیر ضریب همبستگی مندرج در جدول ۱، نتیجه می‌شود که سینتیک حذف رنگ راکتیو آبی ۲۱ توسط نانوذرات تیتانیم دی اکسید در حضور نور نورئی القائی از مدل مرتبه صفرم تبعیت می‌کند. به عبارت دیگر سرعت حذف رنگ مستقل از غلظت رنگ می‌باشد.



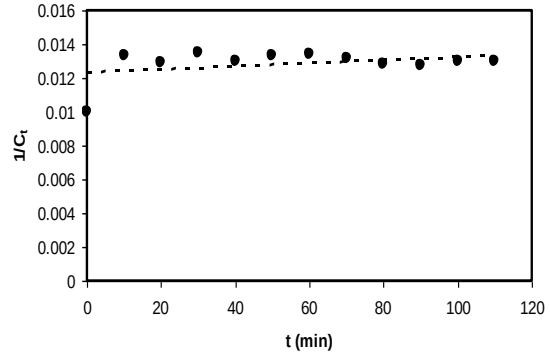
شکل ۶: سینتیک مرتبه صفر

(C_0=۱۰۰ mg/L; m=۰/۱ g/۲۵۰mL; pH=۶/۸; T= ۲۵ °C)



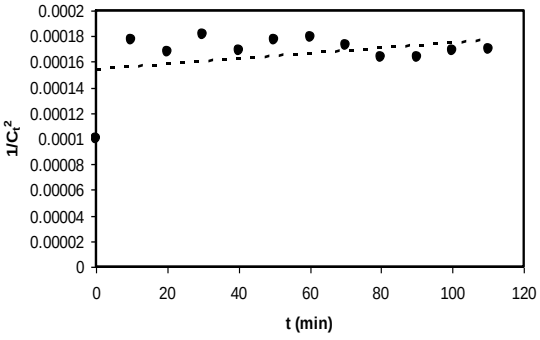
شکل ۷: سینتیک مرتبه اول

(C_0=۱۰۰ mg/L; m=۰/۱ g/۲۵۰mL; pH=۶/۸; T= ۲۵ °C)



شکل ۸: سینتیک مرتبه دوم

(C_0=۱۰۰ mg/L; m=۰/۱ g/۲۵۰mL; pH=۶/۸; T= ۲۵ °C)



شکل ۹: سینتیک مرتبه سوم

(C_0=۱۰۰ mg/L; m=۰/۱ g/۲۵۰mL; pH=۶/۸; T= ۲۵ °C)

جدول ۱- مقادیر ضریب همبستگی نمودارهای سینتیکی

مدل سینتیکی	R^2
مرتبه صفر	۰/۹۶
مرتبه اول	۰/۷۸
مرتبه دوم	۰/۸۵
مرتبه سوم	۰/۸۱

نتیجه‌گیری

نتایج آزمایشات نشان داد که سیستم نانوذرات تیتانیم دی اکسید-نور مرئی القائی کارائی بیشتری نسبت به سیستم نانوذرات تیتانیم دی اکسید-نور مرئی دارد. بررسی پارامترهای عملیاتی نشان داد که در سیستم نانوذرات تیتانیم دی اکسید-نور مرئی القائی در مدت زمان تابش دهی ۱۰ دقیقه ، مقدار ۱ گرم از کاتالیزور و در محیط قلیائی (pH= ۹) راندمان حذف رنگ بالغ بر ۴۰٪ اتفاق می‌افتد. هم‌چنین نتایج نشان داد که افزایش غلظت رنگ باعث کاهش راندمان حذف می‌شود. مطالعات سینتیکی نیز نشان داد که حذف رنگ آبی راکتیو ۲۱ توسط سیستم نانوذرات تیتانیم دی اکسید- نور مرئی القائی از مدل مرتبه صفر تبعیت می‌کند. به عبارت دیگر، سرعت حذف رنگ مستقل از غلظت آن می‌باشد.

منابع

1- Daneshvar, N., Rabbani, M., Modirshahla, N., Behnajady, M.A., Kinetic modling of photocatalytic degradation of acid red 27 in UV/TiO_2 process, *J. Phtochem. Photobiol. A: Chem*., 2004. 157, 39-45.

2- Daneshvar, N., Salari, D., Khataee, A.R., photocatalytic degradation of azo dye acid red 14 in water: investigation of the effect of operational parameters, *J. Phtochem. Photobiol. A: Chem*., 2003. 157, 111-116.

3- Zollinger(ED),H., Color Chemistry. Synthesis, properties and Applications of organic Dyes and pigments, *Zndreviseded*., VCH,1991.

4- prado,A.G.S., Bolzon,L.B., Pedroso,C.P., Moura,A.O., Costa,L.L., Nb_2O_5 as efficient and recyclable photocatalyst for indigo carmine degradation, *AppL, catal. B: Environ*. 2008. 82, 219-224.

5- Khataee, A.R., Zarei, M., Asl, S.K., Photocatalytic treatment of a dye Solution using immobilized TiO_2 nanoparticles combined with photoelectron-Fenton process: Optimization of operational parameters, *Journal of Electroanalytical chemistry*., 2010. 648, 143-150.