

Comprehensive Investigation of Photocatalytic Performance of La/TiO₂-Fe₂O₃ Composite in the Degradation of Five Different Dyes under Optimized pH and Time Conditions

Nastaran Parsafard

Department of Applied Chemistry, Kosar University of Bojnord, P. O. Code: 9453155168, North Khorasan, Bojnord, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 05-01-2025

Accepted: 15- 03-2025

Available online: 17-05-2025

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOI: 10.30509/jscw.2025.167442.1218

Keywords:

Dye

Photocatalytic Degradation

UV Light

Response Surface Methodology

ABSTRACT

This study investigates the photocatalytic performance of lanthanum-doped titanium dioxide/iron oxide catalyst in the photocatalytic removal of methyl red, alizarin red, methylene blue, methyl orange, and phenolphthalein dyes. This photocatalytic removal was done under different environmental acidity conditions (pH=3-11), reaction time (t=0-35 min) at a constant temperature of 45 °C, dye concentration equal to 10 ppm, and 0.25 g of catalyst. The results show that the photocatalytic activity strongly depends on the solution pH and reaction time. Response surface methodology optimization was employed to investigate the simultaneous effects of these two parameters on photocatalytic degradation efficiency. The best photocatalytic degradation efficiency for alizarin red dye was achieved at pH=3 and at a time of 35 min with 93.77%. The findings demonstrate the effectiveness of the La/TiO₂-Fe₂O₃ catalyst in enhancing the degradation of other dyes (methyl red (46.25%), methylene blue (42.37%), methyl orange (11.03%) and phenolphthalein (57.84%)) at pH=3 and provide valuable insights for the optimization of photocatalytic processes.

بررسی جامع عملکرد فوتوکاتالیزی کامپوزیت $\text{La/TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ در حذف پنج رنگزای مختلف در شرایط بهینه pH و زمان

نسترن پارسافرد

دانشیار، گروه شیمی کاربردی، دانشگاه کوثر بجنورد، خراسان شمالی، بجنورد، ایران، کدپستی: ۹۴۵۳۱۵۵۱۶۸.

چکیده

این پژوهش عملکرد فوتوکاتالیزی کاتالیزور است دی اکسید تیتانیوم/اکسید آهن دوپ شده با لانتانیم در حذف فوتوکاتالیزی رنگزاهای متیل رد، آلیزارین رد، متیلن بلو، متیل اورانژ و فنل فتالین را بررسی می‌کند. این حذف فوتوکاتالیزی در شرایط مختلف از لحاظ اسیدیته محیط (۳-۱۱ pH)، زمان انجام واکنش (۰-۳۵ min) در دمای ثابت ۴۵ °C، غلظت رنگزای برابر با ۱۰ ppm و ۰/۲۵ گرم کاتالیزور انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که فعالیت فوتوکاتالیزی به شدت به pH محلول و زمان واکنش بستگی دارد. برای بررسی اثرات هم‌زمان این دو عامل بر بازده تخریب فوتوکاتالیزی از روش بهینه‌سازی سطح پاسخ استفاده شد. بهترین بازده تخریب فوتوکاتالیزی برای رنگزای آلیزارین رد در pH= ۳ و در زمان ۳۵ دقیقه برابر با ۹۳/۷۷ درصد حاصل شد. یافته‌ها اثربخشی کاتالیزور $\text{La/TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ را در افزایش تخریب سایر رنگزاهای (متیل رد (۴۶/۲۵ درصد)، متیلن بلو (۴۲/۳۷ درصد)، متیل اورانژ (۱۱/۰۳ درصد) و فنل فتالین (۵۷/۸۴ درصد)) در pH= ۳ نشان می‌دهد و بینش‌های ارزشمندی را برای بهینه‌سازی فرایندهای فوتوکاتالیزی ارائه می‌کند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOI: 10.30509/jscw.2025.167442.1218

واژه‌های کلیدی:

رنگزا

تخریب فوتوکاتالیزی

نور UV

روش سطح پاسخ

۱- مقدمه

از بین رنگزاهای مختلف موجود، برخی از آنها به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی خود، توجه پژوهشگران زیادی را به خود جلب کرده‌اند. در ادامه، برخی از مهم‌ترین رنگزاهای آلاینده‌ها و اثرات مخربشان توضیح داده می‌شود. متیل رد^۱ (MR) یکی از رنگزاهای شناساگر pH با فرمول شیمیایی $\text{C}_{15}\text{H}_{15}\text{N}_3\text{O}_2$ است که برای تشخیص وضعیت pH در محیط‌های شیمیایی استفاده می‌شود. این رنگزا در شرایط اسیدی قرمز و در شرایط بازی زرد رنگ می‌شود. در زمینه شیمیایی، متیل رد می‌تواند آلاینده‌ای باشد که باید با دقت مدیریت شود. این ماده در برابر تجزیه نسبتاً مقاوم است و می‌تواند در فرایندهای تصفیه آب و هوا مشکل ایجاد کند. این رنگزا ممکن است با برخی مواد شیمیایی در محیط، واکنش داده و ترکیبات جدید ایجاد کند. برای مثال، در شرایط اسیدی، متیل رد می‌تواند با یون‌های فلزی در محیط واکنش داده و ترکیبات پیچیده‌تر ایجاد کند. تأثیری که متیل رد بر میکروب‌ها می‌گذارد، می‌تواند یک عامل اضافی در ارزیابی آلاینده‌ها باشد. این رنگزا ممکن است برخی انواع میکروب‌ها را تحت تأثیر قرار دهد و باعث تغییر در جمعیت میکروبی محیط شود. این امر می‌تواند تأثیری بر روی توازن اکوسیستم‌های دریایی یا آبی داشته باشد. متیل رد ممکن است در مصرف غیرمعمولی یا تماس مستقیم با پوست خطرناکی برای سلامت انسان ایجاد کند. این رنگزا به دلیل ساختار شیمیایی خاص خود، ممکن است با برخی سیستم‌های بدن واکنش نشان دهد و باعث مشکلات پوستی شود (۴-۱).

آلیزارین رد^۲ (AR) یکی از رنگزاهای آنتروکینونی با فرمول شیمیایی $\text{C}_{14}\text{H}_7\text{NaO}_7\text{S}$ است که در صنایع مختلف مانند نساجی، چرم‌سازی و نظایر آن استفاده می‌شود. این رنگزا به دلیل ساختار شیمیایی خود، مشکلات جدی در زمینه آلاینده‌ها ایجاد می‌کند. یکی از اصلی‌ترین چالش‌های مرتبط با استفاده از آلیزارین رد، عدم تجزیه‌پذیری زیستی آن در محیط‌های طبیعی است. این امر باعث می‌شود که این رنگزا به طور کامل توسط میکروب‌های موجود در خاک و آب‌های سطحی تجزیه نشود و در نتیجه، ماندگاری طولانی مدت در طبیعت داشته باشد. این رنگزا بر اکوسیستم‌های دریایی با کاهش نفوذ نور بر روی اکوسیستم‌های دریایی تأثیر منفی می‌گذارد. این امر می‌تواند به طور مستقیم بر روی تولیدات گیاهی و حیوانی در مناطق آلوده تأثیر بگذارد. آلیزارین رد ممکن است سمی، سرطان‌زا یا جهش‌زا باشد و خطرات جدی برای سلامت انسان و زندگی دریایی ایجاد کند. این رنگزا می‌تواند در صورت مصرف غلط یا تماس طولانی مدت با آن، بهداشت عمومی را تهدید کند (۷-۵).

متیلن بلو^۳ (MB) یک رنگزای مصنوعی و محلول در آب است که دارای فرمول شیمیایی $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S}$ می‌باشد. این ماده یک نمک کلرید آلی است که در زمره رنگ‌های تiazینی قرار می‌گیرد. این رنگزا می‌تواند اثرات نامطلوبی بر محیط زیست و انسان داشته باشد. این رنگزا یک فیتوتوکسین قوی است که می‌تواند به اکثر انواع باکتری‌ها و سایر میکروارگانیسم‌ها حمله کند. این امر می‌تواند به ویژه در شرایط گرم و آفتابی خطرناک‌تر شود. استفاده بیش از حد یا طولانی مدت از متیلن بلو می‌تواند تأثیری بر سیستم گوارشی انسان داشته باشد. این تأثیر می‌تواند شامل مشکلات گوارشی مانند تهوع، استفراغ و درد شکمی باشد (۱۰-۸).

متیل اورانژ (MO) و فنل فتالین (PH) دو رنگزای مصنوعی به ترتیب با فرمول شیمیایی $\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{N}_3\text{NaO}_3\text{S}$ و $\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$ هستند که برای تشخیص pH در محیط‌های شیمیایی استفاده می‌شوند. این رنگزاهای می‌توانند در آب‌های سطحی و زیرزمینی نفوذ کنند و باعث آلودگی آب شوند. این امر می‌تواند بر نظام‌های آبی تأثیر بگذارد. همچنین این رنگزاهای مصنوعی می‌توانند بر روی پوشش‌های زیر آب و رسوبات تأثیر بگذارند و باعث تغییر در محیط‌های دریایی شوند. مصرف روزمره غذاهای حاوی این رنگزاهای می‌تواند بر سلامتی انسان نیز تأثیر داشته باشد. در برخی موارد، این رنگزاهای حتی می‌توانند در صورت مصرف بیش از حد یا تماس مستقیم با پوست، باعث عوارض جسمانی شوند (۱۳-۱۱).

برای حل مشکلات مربوط به رنگزاهای حذف آنها از پساب‌های صنعتی، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. یکی از معمول‌ترین و مؤثرترین روش‌ها، روش حذف فوتوکاتالیزی است که به عنوان یکی از روش‌های پیشرفته برای حذف آلودگی‌های شیمیایی مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از کاتالیست‌ها به دلیل کارایی بالا و ایجاد کمتر آلاینده‌های ثانویه مزیت‌های زیادی نسبت به فرایندهای غیرکاتالیزی دارد. از میان کاتالیست‌های مختلفی که برای این فرایند استفاده می‌شود، اکسید تیتانیم (TiO_2) در گزارشات منتشر شده به عنوان یک کاتالیست نوری کارآمد معرفی شده است. این کاتالیست در حذف رنگزاهای مزایای چندگانه‌ای دارد که آن را به یک انتخاب مناسب برای این کار تبدیل کرده است. این ماده به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاص خود، عملکرد بسیار کارآمدی در فرایندهای کاتالیزی دارد. یکی از اصلی‌ترین مزایای اکسید تیتانیم در این زمینه، کارایی بالای آن در تبدیل انرژی نوری به انرژی شیمیایی است. این ویژگی اجازه می‌دهد تا اکسید تیتانیم به طور موفق در فرایندهای کاتالیزی شرکت کند و رنگزاهای را به سرعت حذف کند. علاوه بر این، پایداری طولانی مدت در شرایط واکنش یکی دیگر از مزایای مهم اکسید تیتانیم است. این پایداری به معنای نیاز به تعویض کمتر کاتالیست و در نتیجه کاهش هزینه‌های عملیاتی است. اکسید تیتانیم به دلیل عدم

³ Methylene blue¹ Methyl red² Alizarin red

کامپوزیت‌های فلزی-اکسیدی می‌توانند به عنوان جایگزینی مؤثر برای روش‌های سنتی حذف رنگ‌ها عمل کنند (۱۷).

در این پژوهش، با توجه به اهمیت روزافزون حذف آلاینده‌های آلی از محیط زیست، به بررسی قابلیت‌های کاتالیزی کامپوزیت $\text{La/TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ در حذف فوتوکاتالیزی پنج نوع رنگ‌زا شامل متیل رد، آلیزارین رد، متیلن بلو، متیل اورانژ و فنل فتالین پرداخته شد. برای دستیابی به شرایط بهینه حذف، از روش سطح پاسخ (RSM) برای بررسی و بهینه‌سازی همزمان تأثیر دو عامل کلیدی زمان واکنش و pH محیط بر روی پاسخ (بازده حذف) استفاده شد. نوآوری کار حاضر در چند جنبه کلیدی شامل استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) برای بهینه‌سازی همزمان عامل‌های مؤثر بر فرایند حذف، بررسی جامع پنج نوع رنگ‌زا مختلف با ساختارهای شیمیایی متفاوت، ارائه یک رویکرد سامانمند برای بهینه‌سازی شرایط فرایند حذف و توسعه یک روش علمی برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی بازده حذف رنگ‌ها می‌باشد. این رویکرد علمی امکان درک دقیق‌تر تعاملات بین عامل‌های مؤثر و دستیابی به شرایط بهینه فرایند را فراهم می‌نماید. با توجه به اهمیت روزافزون حذف آلاینده‌های آلی از محیط زیست، این مطالعه می‌تواند گام مهمی در توسعه روش‌های کارآمد برای حذف رنگ‌ها باشد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد شیمیایی و روش‌های شناسایی به کار برده شده

تمام مواد شیمیایی به کار برده شده در کار حاضر بدون خلص‌سازی بیشتر مورد استفاده قرار گرفتند. این مواد شامل کلرید آهن (III) هگزا هیدرات، ایزوپروپوکسید تیتانیم (IV)، آمونیوم هیدروکسید، متیل رد، آلیزارین رد، متیلن بلو، متیل اورانژ و فنل فتالین از شرکت سیگما آلدیج خریداری شدند.

تجزیه و تحلیل ترکیبی و ریخت‌شناسی کاتالیست سنتز شده با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR) مدل Nicolet ۱۰ S، الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) مدل Philips PW1730 با تابش $\text{CuK}\alpha$ ، تعیین مقدار لانتانیم با استفاده از فلورسانس پرتوی ایکس (XRF) مدل ۸۴۱۰ Rh 60kV، طیف‌سنج مرئی-فرابنفش بازتابی (UV-vis/DRS) مدل Evolution 300، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VEGA3، فلورسانس پرتو ایکس (XRF) مدل ۸۴۱۰ Rh 60 kV و جذب-واجذب نیتروژن (ELSORP Mini II) مورد بررسی قرار گرفت. جزئیات این روش‌های مشخصه‌یابی نیز در فایل پیوست آورده شده است.

۲-۲- روش کار

۲-۲-۱- روش تهیه کاتالیست $\text{La/TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$

۲-۲-۱-۱- تهیه $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$

روش تهیه کامپوزیت $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ شامل روش رسوب‌دهی هم‌زمان است که در منبع (۱۸) توضیح داده شده است. براساس این روش

تولید ضایعات خطرناک در فرایند کاتالیزی، یک انتخاب سازگار با محیط زیست است. در مقایسه با کاتالیست‌های دیگر، اکسید تیتانیم نسبتاً ارزان است. این امر باعث کاهش هزینه‌های عملیاتی در فرایندهای کاتالیزی می‌شود. علاوه بر این، قابلیت استفاده مجدد اکسید تیتانیم به طور مداوم برای حذف رنگ‌ها، بدون نیاز به جایگزینی هر چند وقت یک بار، مزیتی بزرگ در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، عدم نیاز به انرژی اضافی برای فعال کردن فرایند کاتالیزی، اکسید تیتانیم را به یک انتخاب اقتصادی تبدیل کرده است. امکان کنترل دقیق فرایند کاتالیزی با استفاده از اکسید تیتانیم یکی دیگر از مزایای مهم آن است. اکسید آهن (Fe_2O_3) نیز به عنوان یک کاتالیست نوری در حذف رنگ‌ها مزایای مشابهی دارد که آن را به یک انتخاب مناسب برای این کاربرد تبدیل کرده است (۱۵، ۱۴).

معمولاً برای اصلاح عملکرد فوتوکاتالیزی از فلزات مختلف استفاده می‌شود. لانتانیم از جمله فلزاتی است که تاکنون اثر آن بر روی $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ مورد بررسی قرار نگرفته است. لانتانیم با عمل به عنوان یک کاتالیست همراه، باعث کاهش سرعت بازترکیب الکترون‌ها و حفره‌ها در کامپوزیت می‌شود که این خاصیت منجر به افزایش کارایی واکنش‌های فوتوشیمیایی می‌گردد. همچنین، افزودن لانتانیم باعث تغییر در ساختار نوری کامپوزیت شده و جذب نور را در طیف مرئی و فرابنفش بهبود می‌بخشد، که این خود منجر به استفاده بهینه‌تر از انرژی نوری می‌شود. این اصلاح‌کننده همچنین بر ساختار سطحی کامپوزیت تأثیر گذاشته و مساحت فعال آن را افزایش می‌دهد، که این امر باعث بهبود پراکندگی ذرات و در نتیجه افزایش فعالیت فوتوکاتالیزی می‌شود. شواهد تجربی نشان می‌دهند که افزودن لانتانیم به کامپوزیت $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ منجر به کاهش سرعت بازترکیب حامل‌های بار شده و تولید رادیکال‌های آزاد را افزایش می‌دهد که این خود باعث بهبود عملکرد فوتوکاتالیزی می‌شود. نهایتاً باید گفت که لانتانیم با اصلاح ساختار الکترونیکی و فیزیکی کامپوزیت $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ، عملکرد فوتوکاتالیزی آن را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد و این بهبود از طریق سازوکارهای چندگانه اعمال می‌شود که منجر به افزایش کارایی کلی فرایند فوتوشیمیایی می‌گردد (۱۶).

در زمینه سنتز کامپوزیت‌های فوتوکاتالیزی، روش‌های مختلفی برای بهبود بازده حذف رنگ‌ها ارائه شده است. در کار حاضر کامپوزیت $\text{La/TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، مورد توجه قرار گرفته است. لانتانیم با عمل به عنوان یک کاتالیست همراه، باعث کاهش سرعت بازترکیب الکترون‌ها و حفره‌ها در کامپوزیت می‌شود که این خاصیت منجر به افزایش کارایی واکنش‌های فوتوشیمیایی می‌گردد. همچنین، افزودن لانتانیم باعث تغییر در ساختار نوری کامپوزیت شده و جذب نور را در طیف مرئی و فرابنفش بهبود می‌بخشد، که این خود منجر به استفاده بهینه‌تر از انرژی نوری می‌شود. تحقیقات اخیر نشان می‌دهند که این کامپوزیت می‌تواند با بازدهی بالایی در حذف رنگ‌ها عمل کند. اخیراً در مطالعه‌ای، کامپوزیت CuWO_4/NiO با بازدهی ۹۱/۹۳ درصد در حذف رنگ‌زای بنزوفنون نشان داده است. این نتایج نشان می‌دهد که

می‌توان به صورت خلاصه روش سنتز این کاتالیست را بدین صورت بیان کرد:

پیش‌ماده‌های کلرید آهن (III) هگزا هیدرات ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (۲ میلی‌گرم) و ایزوپروپوکسید تیتانیم ($\text{Ti}(\text{OCH}(\text{CH}_3)_2)_4$) (۲۰ میلی‌گرم) در ۱۰ میلی‌لیتر حلال (اتانول) حل شدند. سپس محلول حاصل با ۳ میلی‌لیتر هیدروکسید آمونیوم (NH_4OH) به عنوان عامل رسوب‌دهی مخلوط شد. افزودن NH_4OH باعث رسوب یون‌های فلزی از محلول می‌شود و منجر به تشکیل یک مخلوط جامد از ترکیبات آهن و تیتانیم می‌گردد. این مخلوط برای تشکیل فازهای مورد نظر از اکسید آهن- α (Fe_2O_3) و دی‌اکسید تیتانیم (TiO_2) دائماً هم زده شده و حرارت داده می‌شود. فرایند حرارت‌دهی در کاهش پیش‌ماده تیتانیم کمک می‌کند و تشکیل TiO_2 را تسهیل می‌نماید. پس از رسوب اولیه و هم زدن، مخلوط به طور داغ (600°C) برای ۲ ساعت تکلیس می‌گردد.

۲-۱-۲-۲- تهیه $\text{La/TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$

کامپوزیت $\text{La-TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ با استفاده از روش تلقیح^۱ سنتز شد. دو محلول جداگانه از پیش‌ماده‌های حاصل از مواد اولیه پایه و لاتانیم آماده شد. ۱۲/۵ میلی‌گرم نیترات لاتانیم هگزا هیدرات ($\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) به عنوان پیش‌ماده La در اتانول با غلظت ۱ wt% حل شد. این محلول به تدریج به مخلوط آبی $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ همراه با هم‌زدن در دمای اتاق به مدت ۲ ساعت اضافه شد. محلول حاصل در دمای 60°C به مدت ۲ ساعت هم زده شد. هیدروکسید آمونیوم به محلول اضافه شد تا رسوب‌دهی اکسیدهای فلزی شروع شود. جامد پودری حاصل به مدت ۱۲ ساعت در دمای 110°C خشک شد. نهایتاً، کاتالیست حاصل در دمای 300°C به مدت ۴ ساعت تکلیس شد. کاتالیست به دست آمده، $\text{La/TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ، به عنوان LTF نام‌گذاری شد.

۲-۲-۲- روش آزمون فوتوکاتالیزی

بررسی فعالیت‌های فوتوکاتالیزی کاتالیست سنتز شده در حذف رنگزاهای متیل رد (MR)، آلیزارین رد (AR)، متیلن بلو (MB)، متیل اورانژ (MO) و فنل فتالین (PH) از محلول ۱۰ ppm به عنوان یک مدل از پساب با لامپ UV با توان ۵۰۰ وات در مرکز یک جعبه تاریک مورد بررسی قرار گرفت. برای حفظ دمای محلول در حضور چراغ، یک ظرف دو جدار متصل به بن ماری جهت حفظ دما استفاده شد. علاوه بر این، خنک‌سازی محیط اطراف توسط یک فن در محفظه تاریک فراهم شد. دو عامل اصلی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند شامل pH محلول (بین ۳ تا ۱۱) و مدت زمان فرایند (بین ۰ تا ۳۵ دقیقه) می‌باشد.

از آنجائی که بسیاری از رنگزها در معرض نور UV، پایدار نیستند و خود به خود تخریب می‌شوند، میزان خودتخریبی تمام محلول‌های رنگزای

خالص به کار برده شده به صورت جداگانه و بدون حضور کاتالیست در معرض نور UV مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که خود تخریب رنگزها در شرایط آزمایش ناچیز است. متیلن بلو ۱۲ درصد تخریب پس از ۶۰ دقیقه و فنل فتالین ۱۵ درصد تخریب در شرایط مشابه داشته‌اند، در حالی که سایر رنگزها کمتر از ۱۰ درصد تخریب خودبه‌خودی نشان دادند. این نتایج بیانگر آن است که تمام نتایج گزارش‌شده در این کار مربوط به فعالیت فوتوکاتالیزی واقعی است و اثر خود تخریب در آن‌ها قابل چشم‌پوشی است.

۲۵/۰ گرم از هر کاتالیست در ۳۰ میلی‌لیتر محلول رنگزا با pH خاص ریخته شد. سپس این سوسپانسیون در تاریکی به مدت ۶۰ دقیقه هم زده شد تا تعادل جذب- و جذب در کاتالیست حاصل شود. پس از آن، سوسپانسیون حاصل تحت تابش قرار داده شد و در فواصل ۵ دقیقه‌ای از محلول نمونه‌گیری انجام و سپس با گریزان محلول شفاف روی رسوب جدا شد و با استفاده از یک طیف‌سنج در طول موج‌های خاص (به ترتیب ۴۴۳، ۵۹۱، ۶۶۷، ۴۶۴ و ۴۳۸ نانومتر برای MR، AR، MB، MO و PH) مورد بررسی قرار گرفت تا جذب رنگزها اندازه‌گیری شوند. در نهایت رنگزایی بالاترین بازده حذف را با این کاتالیست نشان داده است انتخاب شد و در مرحله بعد با استفاده از روش سطح پاسخ شرایط بهینه حذف در آن به صورت موردی مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۲-۳- عوامل مؤثر بر تخریب فوتوکاتالیزی

برای بررسی شرایط بهینه در تخریب فوتوکاتالیزی رنگزها آزمایش‌هایی طراحی شد. اثر pH در محدوده ۱۱-۳ و اثر زمان در محدوده ۰ تا ۳۵ دقیقه بر تخریب فوتوکاتالیزی $\text{La/TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی تأثیر این سیستم چند متغیره (شامل pH و زمان فرایند)، از روش سطح پاسخ^۲ (RSM) با طراحی مرکب مرکزی (CCD) بر اساس ۱۳ آزمایش استفاده شد. پاسخ (بازده تخریب فوتوکاتالیزی رنگزها (PDE)) با استفاده از نرم افزار Design Expert نسخه ۱۱ برای یافتن شرایط بهینه مورد تحلیل قرار گرفت.

$$\text{PDE}(\%) = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

در این معادله C_0 غلظت اولیه رنگزا و C_t غلظت در زمان t رنگزا است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شناسایی فوتوکاتالیست سنتز شده

به منظور بررسی ساختار فضایی کاتالیست سنتز شده، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) آن تهیه شد (شکل S1 فایل پیوست). تصویر مربوط به ذرات با اشکال نامنظم را نشان می‌دهد که به دلیل ساختار این فوتوکاتالیست که مخلوطی از دو اکسید متفاوت است،

³ Central composite design

⁴ Photodegradation efficiency

¹ Impregnation

² Response surface methodology

آناناز دارد. قله‌های موجود در $299/9$ ، $344/29$ ، $422/69$ ، $569/99$ و $919/62$ ° به صفحات بلوری آهن (III) نسبت داده می‌شوند که حضور اکسید آهن در کاتالیست را تأیید می‌کنند. علاوه بر این، عدم وجود قله‌های مشخصه گونه‌های لاتتانیوم در پراش پرتو ایکس، می‌تواند به دلیل پراکندگی بالای این گونه‌ها بر روی سطح کاتالیست کامپوزیت باشد، که ممکن است به تشکیل یک لایه نازک یا ادغام در شبکه سایر اجزا منجر شده باشد.

برای درک عملکرد کاتالیست در واکنش‌های فوتوکاتالیزی، خصوصیات ساختاری مانند مساحت سطح، حجم کل منفذ و میانگین قطر منفذ بسیار مهم هستند. روش‌های آنالیز ساختاری مانند BET و BJH این عامل‌ها را برای کاتالیزور LTF با دقت بررسی می‌نماید. ایزوترم BET در شکل S5 (فایل پیوست) نمایش داده شده است که اطلاعات مهمی درباره خواص ساختاری این کاتالیست ارائه می‌دهد. بر اساس این ایزوترم، کاتالیزور LTF دارای ویژگی‌های زیر است:

مساحت سطح ($S_{\text{BET}}=110.130 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$)

حجم منافذ کل ($V_p=0.021 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$)

میانگین قطر منافذ ($d_p=43.931 \text{ nm}$)

این ایزوترم از نوع III است که توسط اتحادیه بین‌المللی شیمی محض و کاربردی (IUPAC) برای مواد غیرمتخلخل یا ماکرو متخلخل دسته‌بندی شده است. با توجه به اطلاعات بدست آمده، کاتالیزور LTF دارای ساختار مزوحفره است. مزوحفره‌ها موادی هستند که منافذی با قطرهای بین ۲ تا ۵۰ نانومتر دارند. این ساختار مزوپور به دلیل مساحت سطح داخلی بزرگ و خواص انتقال جرم مطلوب، مناسب برای کاربردهایی مانند فرایند کاتالیزی است. مساحت سطح بالا در کاتالیزور LTF یک عامل مهم برای عملکرد فوتوکاتالیزی است. سطح بزرگتر به معنای دسترسی بیشتر برای واکنش‌ها است که به طور بالقوه منجر به بازده بالاتر در تبدیل آلاینده‌ها به محصولات بی‌ضرر می‌شود.

۳-۲- اثر pH محلول و زمان بر روی فعالیت فوتوکاتالیزی پنج رنگزای مختلف

در کار حاضر اثر pH (۳-۱۱) محلول رنگزاهای مختلف (MR، AR، MB، MO و PH) و همچنین اثر مدت زمان (۳۵-۰ دقیقه) با نور فرابنفش این محلول‌ها بر عملکرد کاتالیست LTF در دمای 45°C مورد بررسی قرار گرفت. هدف پخش حاضر، شناسایی رنگزا با بیشترین بازده حذف با کاتالیست حاضر جهت بهینه سازی CCD است.

همان‌طور که در شکل ۱a مشاهده می‌شود، نتایج نشان می‌دهند که درصد بازده حذف فوتوکاتالیزی برای محلول حاوی تمام رنگزها با زمان و افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهند که عملکرد کاتالیست LTF برای حذف رنگزای آلیزارین رد (AR) در محیط اسیدی ($\text{pH}=3$) نسبت به سایر رنگزها بیشتر است. این نتیجه احتمالاً به دلیل پروتون‌دار شدن گروه کربنیل موجود در ساختار آنتراکینون این رنگزا و در نتیجه افزایش الکتروفیلی اتم کربن می‌باشد. در نتیجه ساختار این رنگزا نسبت به حمله

این اشکال نامنظم و تجمع یافته دور از انتظار نیستند.

آزمون دیگری که برای شناسایی کاتالیست سنتز شده مورد استفاده قرار گرفت، طیف‌سنج مرئی-فرابنفش بازتابی (UV-vis/DRS) است که نتایج حاصل از این آزمون، جذب سطحی و درونی بازتاب نور توسط یک نمونه را نشان می‌دهد. شکل S2 (فایل پیوست) نشان‌دهنده باندهای جذبی در طول موج‌های تقریبی ۲۸۰ و ۳۵۰ نانومتر است. قله موجود در ۳۵۰ نانومتر، که برجسته‌ترین قله است، فاز روتایل دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) را نشان می‌دهد. این قله نشانه انتقال بار از سطح اکسیژن به اتم‌های تیتانیوم در شبکه TiO_2 است. این نوع انتقال‌ها برای فعالیت فوتوکاتالیزی TiO_2 بسیار مهم هستند، زیرا تولید جفت‌های الکترون-حفره در مواجهه با نور را تسهیل می‌کنند که برای شروع واکنش‌های اکسایش-کاهش ضروری هستند. علاوه بر قله‌های مشخصه TiO_2 ، این طیف قله پهنی را نشان می‌دهد که بالاتر از ۴۵۰ نانومتر قرار دارد. این جذب پهن با برهم‌کنش اکسید فلزی سطحی با TiO_2 همراه است. وجود این اکسید فلزی می‌تواند ساختار الکترونیکی TiO_2 را تغییر دهد و منجر به تغییراتی در طیف جذبی شود. این برهم‌کنش ممکن است بر قابلیت جذب نوری کاتالیزور کامپوزیت و دینامیک حامل الکترون و بازده فوتوکاتالیزی تأثیر بگذارد (۱۹).

جهت تأیید حضور فازهای مختلف در این فوتوکاتالیست، طیف FTIR آن تهیه شد (شکل S3 (فایل پیوست)). قله‌های مشخصه TiO_2 و فاز روتایل آن در 440 و 686 cm^{-1} ظاهر می‌شوند. این قله‌ها نشانه حضور فازهای تیتانیومی در این کاتالیزور هستند. علاوه بر این، قله‌های جذب در حدود 3400 و 1640 cm^{-1} نشان‌دهنده وجود گروه‌های هیدروکسیل مولکول‌های آب هستند. این گروه‌ها ممکن است به دلیل رطوبت داخل نمونه جامد باشد. در این طیف دو باند خاص در 418 و 598 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات پیوند Fe-O وجود دارد. شناسایی گروه‌های هیدروکسیل و باندهای Fe-O بر روی سطح کاتالیست تأکید می‌کند که این عوامل می‌توانند بر عملکرد کاتالیست تأثیر بگذارند. علاوه بر این، قله‌های 1040 ، 1310 ، 1320 و 1440 cm^{-1} در طیف FTIR این کاتالیست می‌توانند با گونه‌های کربنات لاتتانیوم مرتبط باشند. این قله‌ها با فرکانس‌های ارتعاشی مورد انتظار یون‌های کربنات، به‌ویژه پیوندهای C-O و O-H در ساختار کربنات‌ها همسو هستند (۱۸).

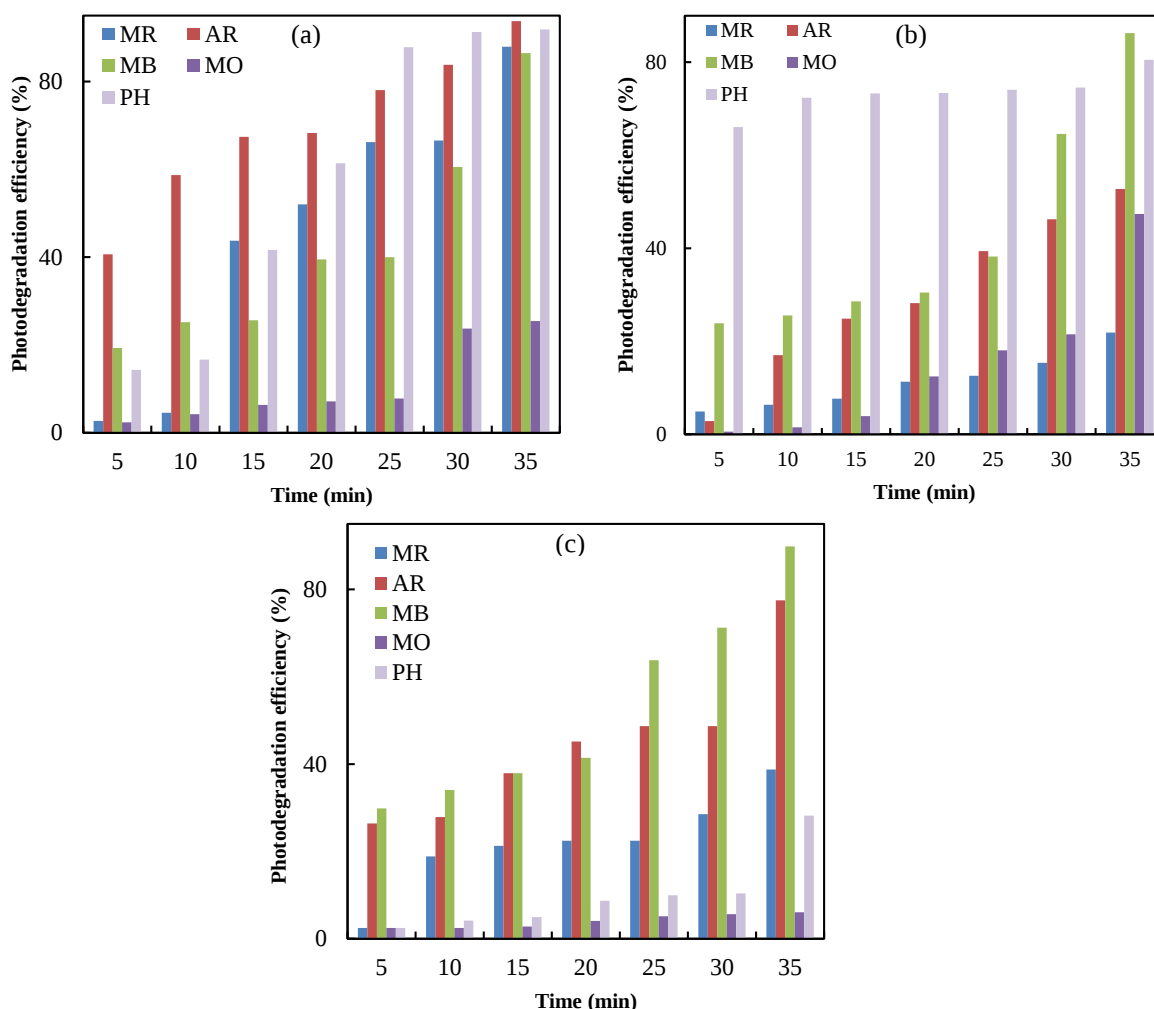
تعیین مقدار لاتتانیوم موجود در ساختار کاتالیست با استفاده از آنالیز XRF صورت گرفت. بر طبق این آنالیز مقدار لاتتانیوم موجود در ساختار برابر با ۰/۹۸ درصد وزنی بدست آمد. ساختار بلوری کاتالیست سنتز شده با استفاده از تجزیه و تحلیل XRD مورد بررسی قرار گرفت (شکل S4 (فایل پیوست)). الگوی XRD نشان‌دهنده حضور هر دو فاز آناناز و روتیل دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) در کاتالیزور است. این الگو قله‌ها را در $25/39^\circ$ (101)، $37/89^\circ$ (112) و $48/19^\circ$ (200) نشان می‌دهد که مشخصه فاز آناناز TiO_2 است. علاوه بر این، پیک‌های $27/54^\circ$ (110)، $35/49^\circ$ (101) و $53/99^\circ$ (211) نشان‌دهنده حضور فاز روتایل TiO_2 هستند. این دی اکسید تیتانیوم چندشکلی مقاومت بالاتری در برابر پرتو فرابنفش نسبت به

با نیروهای الکترواستاتیک مواجه شوند. عامل دیگر تولید رادیکال‌های فعال است که در محیط خنثی، تولید رادیکال‌های هیدروکسیل ($\text{OH}^\bullet$) به حداکثر می‌رسد. این رادیکال‌ها عامل اصلی اکسایش در فوتوکاتالیزورها هستند. این رادیکال‌ها در محیط خنثی به بهترین شکل عمل کرده و باعث سرعت بالاتر واکنش‌ها می‌شوند. جذب نور نیز از عوامل مؤثر بر بازده فرایند فوتوکاتالیزی است. کاتالیست‌های حاوی Fe_2O_3 جذب نوری را به طیف قابل توجهی از نور مرئی گسترش می‌دهند.

این ویژگی باعث می‌شود که این کاتالیست‌ها در شرایط روزانه (نور خورشید) فعال باشند، در حالی که کاتالیست‌های حاوی TiO_2 تنها، فقط در شرایط نوری محدوده UV فعال هستند. مطالعات ساختاری نشان داده‌اند که ورود Fe_2O_3 به ساختار کاتالیست TiO_2 منجر به تغییر در ساختار بلوری و اندازه ذرات کاتالیست می‌شود. این تغییرات ممکن است بر خواص فوتوکاتالیزی تأثیر بگذارند. علاوه بر این عوامل، محیط خنثی اجازه می‌دهد تا تعادل اکسایش-کاهش بهتری ایجاد شود، در حالی که در محیط‌های اسیدی و قلیایی، این تعادل ممکن است با واکنش‌های جانبی مختل شود.

نوکلئوفیلی توسط گونه‌های فعال تولید شده طی فرایند فوتوکاتالیزی نظیر رادیکال‌های هیدروکسیل افزایش می‌یابد. علاوه بر این پروتون‌دار شدن، شکستن حلقه‌های آروماتیک را افزایش می‌دهد و منجر به تجزیه مؤثرتر رنگزا می‌شود (۱۹).

نتایج (شکل ۱ b) نشان می‌دهند که حذف فوتوکاتالیزی رنگزای فنل فتالین توسط این کاتالیست در محیط خنثی بیشتر از محیط اسیدی و قلیایی است. این تفاوت به دلیل چندین عامل است. اولین عامل بار سطحی TiO_2 است. در محیط خنثی، سطح TiO_2 عمدتاً بی‌بار است، در حالی که در محیط‌های اسیدی و قلیایی، سطح مثبت یا منفی ایجاد می‌شود که باعث تغییر رفتار واکنش‌های شیمیایی می‌گردد. این امر به ویژه در مورد رنگزاهای فنل‌دار مهم است که معمولاً در pH های خنثی و اسیدی بهتر جذب می‌شوند، اما در محیط قلیایی، جذب آنها کاهش می‌یابد عامل دیگر واکنش‌های سطحی است. واکنش‌های فوتوکاتالیزی معمولاً در سطح کاتالیست رخ می‌دهند. در محیط خنثی، این واکنش‌ها به بهترین شکل انجام می‌شوند، در حالی که در محیط‌های اسیدی و قلیایی، ممکن است



شکل ۱: اثر زمان بر حذف فوتوکاتالیزی رنگزاهای مختلف توسط کاتالیست LTF در pH های (a) ۳، (b) ۷ و (c) ۱۱.

Figure 1: Effect of time on the photocatalytic removal of different pigments by LTF catalyst at pHs of (a) 3, (b) 7, and (c) 11.

این تفاوت‌های موجود در محیط‌های مختلف pH، منجر به عملکرد بهتر کاتالیست $\text{La/TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ در محیط خنثی نسبت به محیط‌های اسیدی و قلیایی می‌شود. این نتیجه مهم برای کاربردهای عملی کاتالیست‌ها در حذف آلودگی‌های آب بسیار مؤثر است، زیرا اکثر منابع آب طبیعی معمولاً در pH خنثی یا نزدیک به آن قرار دارند (۲۰، ۲۱). محیط قلیایی شرایط بهتری برای حذف رنگزای متیلن بلو در مقایسه با سایر رنگزها توسط کاتالیست LTF فراهم می‌کند (شکل 1c). ساختار این رنگزا شامل یک حلقه مرکزی فنوتیازین همراه با گروه دی متیل آمینو و یک اتم گوگرد است. در محلول قلیایی حلقه فنوتیازین یک گونه آنیونی با بار منفی ایجاد می‌کند. گونه‌های آنیونی نیز مستعد حمله توسط گونه‌های فعال تولید شده طی فرایند فوتوکاتالیستی مانند OH رادیکالی هستند. فرایند فوتوکاتالیزی گونه‌های فعالی مانند رادیکال‌های OH را در محیط‌های اسیدی و بازی تولید می‌کند که می‌تواند به طور مؤثر به ساختار رنگزا حمله و تخریب MB را تسهیل کند (۱۹).

به طور خلاصه عملکرد این کاتالیست در محیط‌های مختلف برای حذف رنگزهای مورد بررسی به شرح زیر است:

در محیط اسیدی:

$$\text{MO} > \text{MB} > \text{MR} > \text{PH} > \text{PDE}(\%) = \text{AR}$$

در محیط خنثی:

$$\text{MR} > \text{MO} > \text{AR} > \text{MB} > \text{PDE}(\%) = \text{PH}$$

در محیط قلیایی:

$$\text{MO} > \text{PH} > \text{MR} > \text{AR} > \text{PDE}(\%) = \text{MB}$$

به طور میانگین عملکرد این کاتالیست در سه محیط مختلف برای حذف رنگزها به صورت زیر است:

$$\text{PDE}(\%) = \text{AR} > \text{PH} > \text{MB} > \text{MR} > \text{MO}$$

اثر محیط‌های مختلف بر حذف این رنگزها به طور میانگین به صورت زیر است:

$$\text{PDE}(\%) = \text{pH}=3 > \text{pH}=7 > \text{pH}=11$$

۳-۳- تناسب مدل و تحلیل آماری

در کار حاضر با توجه به نتایج، بهترین عملکرد برای حذف رنگزای AR حاصل شده است. بر این اساس برای بهینه‌سازی نتایج حاصل از حذف فوتوکاتالیزی این رنگزا از روش طراحی CCD و روش RSM استفاده شد. جدول ۱ طراحی آزمایش تحت تأثیر دو عامل مؤثر بر نتایج حذف فوتوکاتالیزی این رنگزا توسط کاتالیست LTF را نشان می‌دهد.

جدول ۱: طراحی آزمایش و نتایج CCD حاصل از عملکرد کاتالیست LTF در حذف نوری رنگزای AR.

Table 1: Experimental design and CCD results of the performance of LTF catalyst in photodegradation of AR dye.

Independent variables	Units	Coded low	Coded high	
pH	-	-1 ↔ 3.00	+1 ↔ 11.00	
Process time (≡ t)	min	-1 ↔ 0.00	+1 ↔ 35.00	
RUN	pH	t (min)	AR PDE (%)	
			Actual	Predicted
1	7.00	20.00	30.21	28.99
2	1.34	20.00	29.56	30.50
3	12.66	20.00	51.97	53.37
4	11.00	35.00	77.01	75.66
5	7.00	20.00	28.21	28.99
6	7.00	20.00	28.21	28.99
7	7.00	20.00	28.21	28.99
8	11.00	5.00	15.39	14.08
9	3.00	5.00	15.65	14.66
10	7.00	0.00	0.20	1.45
11	3.00	35.00	43.77	42.75
12	7.00	41.21	62.12	63.34
13	7.00	20.00	30.21	28.99

معادله درجه دوم چند متغیره متناسب با نتایج تجربی CCD به صورت زیر است:

$$\text{PDE}(\%) = +28.99 + 8.08A + 22.42B + 8.37AB + 6.47A^2 + 1.33B^2 \quad (2)$$

این معادله ارتباط بین پاسخ (PDE) و متغیرهای ورودی کد شده A (pH) و B (t) را نشان می‌دهد.

تحلیل واریانس (ANOVA) برای مدل درجه دوم سطح پاسخ پیش‌بینی شده نیز انجام شد که در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

نتایج آزمون F فیشر، مقادیر F و مقادیر p به ترتیب برای ارزیابی ضرایب فردی و مدل کلی مهم هستند. مقادیر p کمتر و مقادیر F بزرگتر نشان‌دهنده عبارات کلیدی در مدل هستند. "عدم تناسب" به معنای عدم توافق بین داده‌ها و خطای خالص نیست. اهمیت آماری و کیفیت معادله مدل چند جمله‌ای با استفاده از آزمون F در فاصله اطمینان ۹۵ درصد و ضریب همبستگی رگرسیون چند جمله‌ای تعیین می‌شود. هنگام ارزیابی رابطه بین داده‌های تجربی و مدل رگرسیونی، مقدار بالاتر ضریب همبستگی R^2 نشان‌دهنده یک ارتباط قوی‌تر است و معمولاً مورد پسند قرار می‌گیرد.

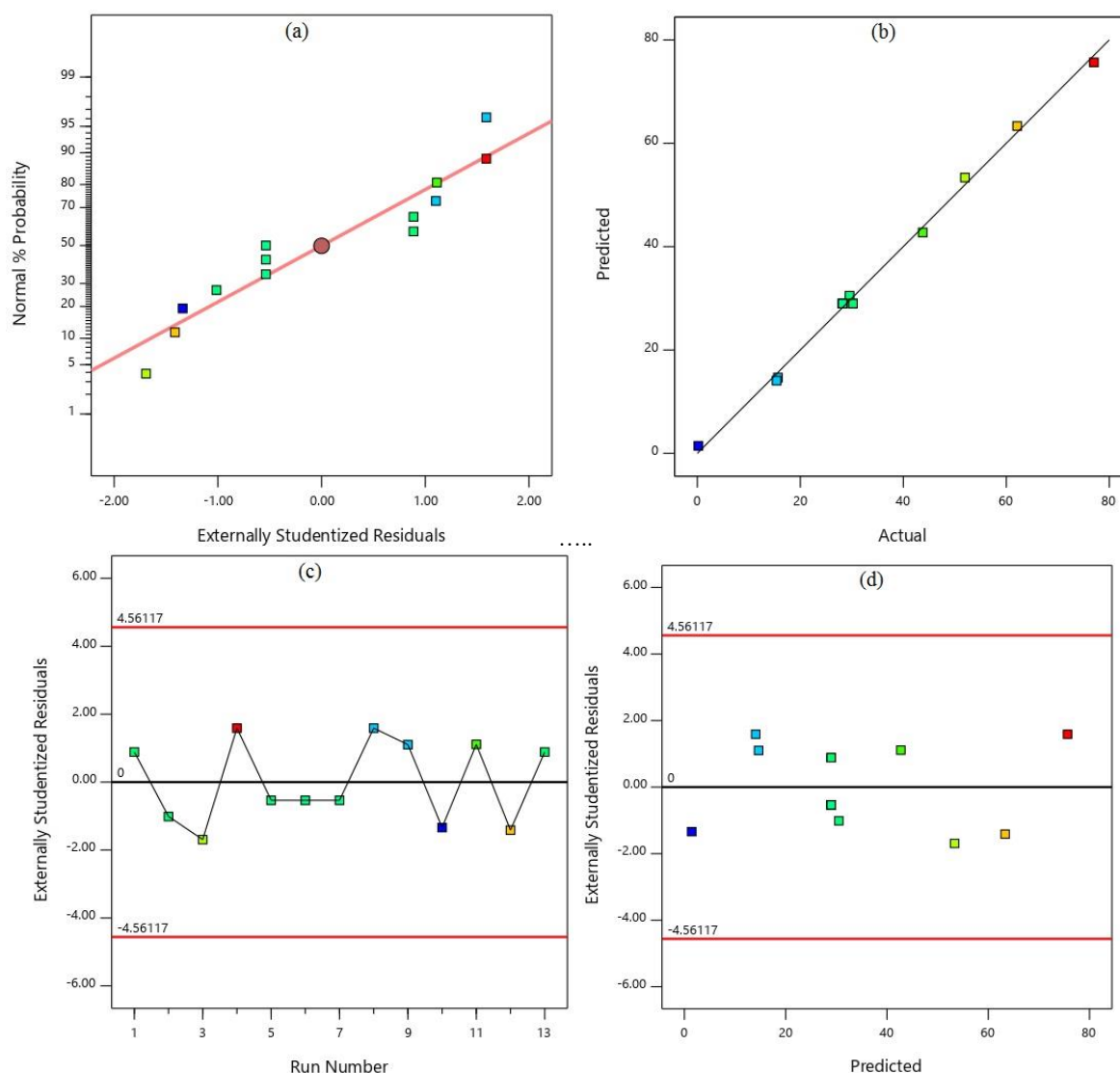
در کار حاضر، R^2 پیش‌بینی شده " و R^2 تعدیل شده " به ترتیب ۰/۹۸۲۲ و ۰/۹۹۴۵ به دست آمد. این نتایج سطح معقولی از توافق

بین این دو مقدار را نشان می‌دهند. علاوه بر این، نمودارهای تشخیصی برای ارزیابی مناسب بودن مدل انتخابی استفاده شد. نمودار احتمال عادی ارائه شده در شکل ۲ توزیع یکنواخت و تقریباً خطی باقیمانده‌ها را نشان می‌دهد. علاوه بر این، این شکل توزیع باقیمانده‌ها را بر تعداد اجراها نشان می‌دهد. به طور کلی، این نتایج ضرورت مدل درجه دوم را نشان می‌دهد و تأیید می‌کند که داده‌های تجربی به طور مؤثر توسط مدل محاسبه شده‌اند. ضریب همبستگی 0.9968 (R^2) نشان دهنده همبستگی قوی بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده مدل است که پیش‌بینی‌پذیری معقول آن را تأیید می‌کند. این مقدار بالای R^2 نشان می‌دهد که مدل می‌تواند تقریباً ۹/۰۲ درصد از تغییرپذیری در پاسخ را توضیح دهد که یک شاخص امیدوارکننده از قابلیت پیش‌بینی مدل است. نتایج نشان‌دهنده یک مدل بسیار معنی‌دار است و مقدار F برابر با ۴۳۱/۵۲ نشان می‌دهد احتمال تأثیر آشفستگی بر مقدار F عملاً ناچیز است. در میان عبارات مختلف مدل ارزیابی شده، تنها عامل B^2 به دلیل مقدار P بیش از حد آستانه ۰/۰۵ فاقد اهمیت است. این یافته بر اهمیت این عوامل در تعیین اثربخشی تخریب نوری AR تأکید می‌کند و اهمیت کنترل دقیق بر روی این شرایط را در دستیابی به نتایج بهینه نشان می‌دهد.

جدول ۲: نتایج ANOVA برای مدل درجه دوم حاصل از عملکرد کاتالیست LTF در حذف نوری رنگزای AR.

Table 2: ANOVA results for the quadratic model of the performance of LTF catalyst in the photodegradation of AR dye.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model (significant)	5016.54	5	1003.31	431.52	$<10^{-4}$
A-pH	522.82	1	522.82	224.86	$<10^{-4}$
B-t	3895.67	1	3895.67	1675.51	$<10^{-4}$
AB	280.55	1	280.55	120.66	$<10^{-4}$
A ²	292.71	1	292.71	125.89	$<10^{-4}$
B ²	11.26	1	11.26	4.84	0.06
Residual	16.28	7	2.33	-	-
Lack of Fit	11.48	3	3.83	3.19	0.15
Pure Error	4.80	4	1.20	-	-
Cor Total	5032.82	12	-	-	-
R ²	1.00	-	Std. Dev.	1.52	-
Adjusted R ²	0.99	-	Mean	33.90	-
Predicted R ²	0.98	-	C.V. %	4.50	-
Adeq Precision	71.64	-	-	-	-



شکل ۲: (a) نمودار احتمال عادی باقیمانده، (b) بازده حذف پیش‌بینی‌شده در مقابل بازده حذف واقعی AR، (c) باقیمانده در برابر تعداد اجراها، و (d) باقیمانده در برابر مقدار بازده حذف پیش‌بینی‌شده AR PDE.

Figure 2: (a) Normal probability plot of residual, (b) predicted versus actual AR PDE, (c) residual versus number of runs, and (d) residual versus predicted AR PDE value.

را پیشنهاد می‌کند که مدل می‌تواند بهبود یابد یا ممکن است آزمایش‌های بیشتری برای اصلاح پیش‌بینی‌های مدل لازم باشد. شکل a و b یک نمایش گرافیکی از داده‌های تجربی و پیش‌بینی‌شده ارائه می‌کند، که پراکندگی آنها را در اطراف یک خط مستقیم نشان می‌دهد. این تجسم به ارزیابی دقت مدل با مقایسه نتایج واقعی با نتایج پیش‌بینی‌شده توسط مدل کمک می‌کند. هر چه نقاط داده در اطراف خط مستقیم به هم نزدیک‌تر باشند، قابلیت‌های پیش‌بینی مدل بهتر است، که نشان‌دهنده همبستگی قوی بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده است.

شکل c با نمایش یک پراکندگی تصادفی از باقیمانده‌ها نزدیک به صفر، با انحراف $\pm 4/56$ عملکرد مدل را بیشتر بررسی می‌کند. این

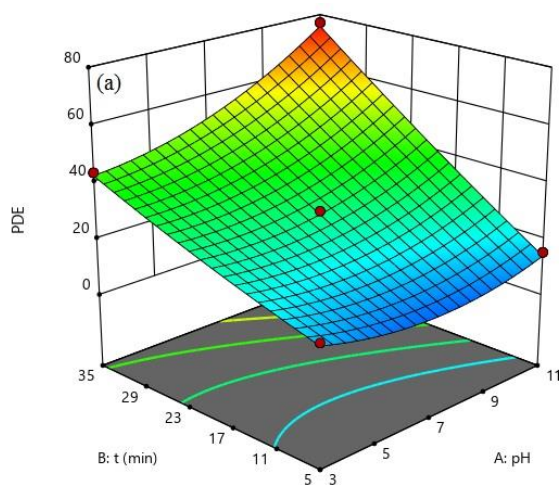
همان‌طور که بیان شد دقت مدل را می‌توان در شکل ۲ مشاهده کرد که مقادیر نرمال، پیش‌بینی‌شده و واقعی باقیمانده‌ها را در برابر داده‌های تجربی برای تخریب رنگزای آلیزارین رد در کنار هم قرار می‌دهد. این مقایسه گرافیکی ارزیابی دیداری واضحی از عملکرد مدل ارائه می‌کند و امکان شناسایی آسان هر گونه اختلاف بین نتایج مورد انتظار و واقعی را فراهم می‌کند.

با تجزیه و تحلیل توزیع این باقیمانده‌ها، می‌توان برازش مدل با داده‌ها و توانایی آن در پیش‌بینی دقیق مشاهدات جدید را ارزیابی کرد. در حالت ایده‌آل، باقیمانده‌ها باید به‌طور تصادفی در اطراف صفر پراکنده شوند، که نشان می‌دهد مدل الگوهای زیربنایی در داده‌ها را به‌طور مؤثر ثبت می‌کند. هر الگوی سامانمند در باقیمانده‌ها مناطقی

یک سطح منحنی شکل است که نشان می‌دهد افزایش هم‌زمان pH و زمان فرایند منجر به بهبود بازده حذف می‌شود. نمودار کانتور دو بعدی نیز به خوبی نشان می‌دهد که چگونه تغییرات pH و زمان فرایند بر بازده حذف تأثیر می‌گذارند. بر اساس نتایج به دست آمده، می‌توان مشاهده کرد که در pH = ۳، بازده حذف در زمان ۳۵ دقیقه به ۴۳/۷۷ درصد می‌رسد، در حالی که در pH = ۱۱، این مقدار به ۷۷/۰۱ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در زمان‌های کوتاه‌تر، بازده حذف کمتر است - برای مثال، در pH = ۱۱ و زمان ۵ دقیقه، بازده حذف فقط ۱۵/۳۹ درصد است. این نتایج نشان می‌دهد که هر دو عامل pH و زمان فرایند به طور قابل توجهی بر بازده حذف تأثیر می‌گذارند. این نتایج اهمیت کنترل دقیق عامل‌های فرایند برای دستیابی به حداکثر بازده حذف را نشان می‌دهند.

شکل ۴ یک تجزیه و تحلیل جامع از تنظیمات عامل بهینه برای دستیابی به حداکثر PDE AR را ارائه می‌دهد که از یک تابع مطلوبیت برای ارزیابی مناسب بودن این شرایط استفاده می‌کند.

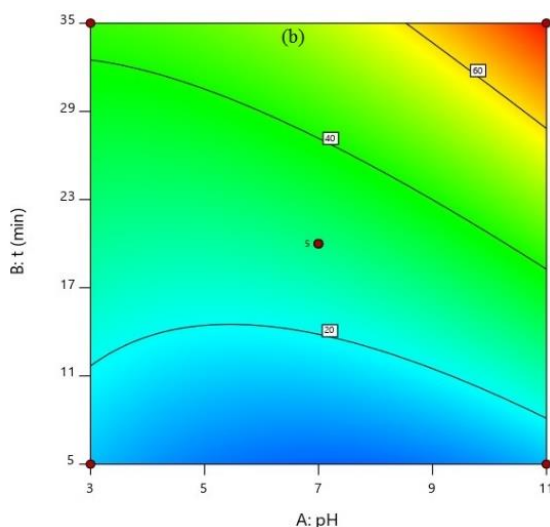
یافته‌ها نشان می‌دهد که شرایط بهینه برای به حداکثر رساندن PDE AR شامل pH برابر با ۱۱ و زمان انجام فرایند برابر با ۳۵ دقیقه در دمای ۴۵ °C می‌باشد. در این شرایط، حداکثر PDE AR برابر است با ۷۵/۶۶ درصد همراه با مطلوبیت کلی ۰/۹۸۲ است. تابع مطلوبیت ۰/۹۸۲ به عنوان یک معیار کمی برای اینکه شرایط انتخابی تا چه حد به اهداف مورد نظر دست پیدا می‌کند، عمل می‌نماید.



نمودار پراکندگی نشان‌دهنده یک مدل مناسب است، که در آن باقیمانده‌ها (تفاوت بین مقادیر مشاهده و پیش‌بینی شده) به طور مساوی در اطراف صفر توزیع می‌شوند. یک انحراف استاندارد کوچک $\pm 4/56$ نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های مدل نسبتاً نزدیک به نتایج واقعی است و قابلیت اطمینان مدل را تقویت می‌کند.

علاوه بر این، شکل ۲ d باقیمانده‌های مقیاس‌بندی شده خارجی^۱ را در مقابل بازده حذف پیش‌بینی شده مقایسه می‌کند. باقیمانده‌های مقیاس‌بندی شده خارجی معیارهای استاندارد شده باقیمانده‌ها هستند که روشی مستقل از مقیاس برای مقایسه اندازه باقیمانده‌ها ارائه می‌دهند. وجود یک پراکندگی معمولی در اطراف صفر در این شکل، همراه با عدم وجود هر گونه الگوی قابل تشخیص، معقول بودن مدل را تأیید می‌کند. این نشان می‌دهد که مدل به اندازه کافی روندهای اساسی در داده‌ها را بدون معرفی سوگیری یا خطاهای سامانمند ثبت می‌کند.

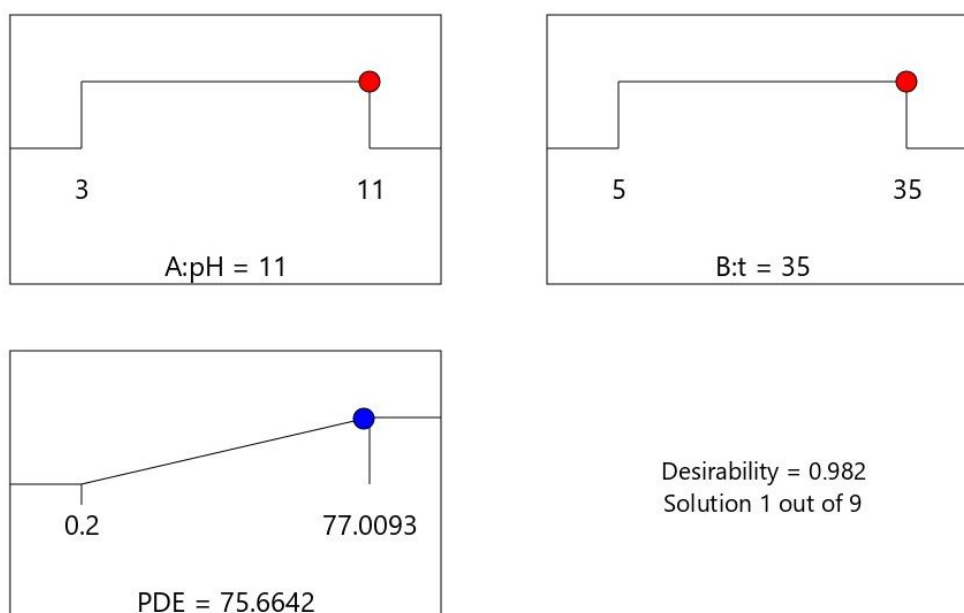
تجزیه و تحلیل سطح پاسخ سه بعدی و نمودار کانتور دو بعدی مربوط به آن، که در شکل ۳ نشان داده شده است، برای شناسایی ترکیب بهینه عوامل و تعاملات بین برهم‌کنش عامل‌های مؤثر بر پاسخ انجام شد. این شکل روابط بین متغیرهای pH و زمان فرایند را با بازده حذف رنگزای (PDE) AR نشان می‌دهد. نمودار سطح پاسخ سه بعدی نشان می‌دهد که نقطه اوج در pH = ۱۱ و زمان = ۳۵ دقیقه قرار دارد که بازده حذف ۷۷/۰۱ درصد را نشان می‌دهد. سطح پاسخ به صورت



شکل ۳: (a) نمودار سطح پاسخ سه بعدی و (b) نمودار کانتور دو بعدی برای PDE AR روی کاتالیزور LTF تحت تأثیر pH و زمان فرایند.

Figure 3: (a) Three-dimensional response surface plot and (b) two-dimensional contour plot for AR PDE on LTF catalyst under the influence of pH and process time.

¹ Externally studentized residuals



شکل ۴: مطلوبیت در شرایط بهینه.
Figure 4: Utility under optimal conditions.

اول به ۹۲/۵۵ درصد در سیکل پنجم کاهش یافته است. این کاهش تدریجی نشان‌دهنده پایداری بالای کاتالیست است، زیرا در هر چرخه فقط حدود ۰/۴۴ درصد کاهش کارایی رخ داده است.

جاکودینگ و همکارانش (۲۲) در سال ۲۰۲۳ حذف نوری متیلن بلو در حضور کاتالیست $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{PVC}$ را مورد بررسی قرار دادند. علاوه بر این، در سال ۲۰۲۴ لیو و همکارانش (۲۳) بر روی حذف این رنگزا در حضور کاتالیست $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ نتایجی را منتشر نمودند. مقایسه دو تحقیق مورد نظر با کار حاضر نشان می‌دهد که هر سه تحقیق در زمینه فوتوکاتالیست‌های نانوساختاری برای حذف متیلن بلو فعالیت کرده‌اند، اما هر کدام رویکرد و دستاوردهای منحصر به فرد خود را دارند. کار فعلی با استفاده از کامپوزیت $\text{La/TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ کارایی ۷۶/۲ درصد نشان داده است، در حالی که کامپوزیت $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ کارایی ۶۸/۸ درصد داشته است. تفاوت‌های اصلی این سه تحقیق روش سنتز و مواد اولیه، شرایط واکنش، پایداری و بازیافت، و نوآوری‌های هر روش می‌باشند. در مورد روش سنتز و مواد اولیه، کار فعلی از لانتانیم به عنوان عنصر دوپ‌کننده استفاده کرده است، در حالی که در تحقیق دوم از پوسته‌های آهن به عنوان منبع Fe_2O_3 استفاده شده است و در تحقیق سوم از PVC به عنوان ماتریس پشتیبان بهره گرفته شده است. شرایط واکنش در هر سه تحقیق متفاوت است. کار فعلی در دمای 45°C و محدوده pH (۳-۱۱) انجام شده است، در حالی که در تحقیق دوم از نور مرئی و pH خنثی استفاده شده است و در تحقیق سوم از تابش SSR و دمای 45°C بهره گرفته شده است. این تفاوت در شرایط واکنش نشان می‌دهد که هر روش برای شرایط خاصی بهینه شده است. در

به‌طور قابل توجه، نتایج نشان می‌دهند که برهم‌کنش‌های دوتایی بین این عوامل بیشترین تأثیر را بر تخریب نوری AR دارند. این یافته بسیار مهم است زیرا جفت عامل‌هایی را شناسایی می‌کند که دست‌کاری آنها بیشترین پتانسیل را برای بهینه‌سازی بازده تخریب AR دارد. درک این فعل و انفعالات برای بهینه‌سازی شرایط فرایند برای دستیابی به حداکثر PDE حیاتی است، در نتیجه کارایی کلی و پایداری فرایندهای تخریب AR را بهبود می‌بخشد.

مقدار بالاتر نشان‌دهنده همسویی بهتر با نتایج هدف است. این نتایج نشان‌دهنده همبستگی قوی بین پیش‌بینی‌های مدل و نتایج تجربی واقعی است، که نشان‌دهنده دقت عالی در پیش‌بینی شرایط بهینه برای تخریب نوری آلیزارین رد است. دستیابی به بالاترین بازده تخریب نوری تحت شرایط مشخص شده، اثربخشی کاتالیزور LTF را در واکنش‌های فوتوکاتالیزی تأیید می‌کند.

۴-۳- بررسی پایداری و بازیابی فوتوکاتالیست در حذف رنگزای AR

در کار حاضر، برای بررسی پایداری و بازیابی کاتالیست سنتز شده، از روش تمیزکاری فوتوکاتالیستی استفاده شد. در این روش، کاتالیست پس از استفاده در حذف رنگزا، برای مدت ۶۰ دقیقه تحت تابش مستقیم نور UV قرار گرفت. این فرایند در دمای ثابت 45°C انجام شد و نیازی به مواد شیمیایی اضافی نداشت. نتایج نشان داد که کاتالیست پس از پنج چرخه استفاده، عملکرد خود را به خوبی حفظ کرده و نیازی به احیای شیمیایی مجدد ندارد. بر این اساس، در $\text{pH}=3$ که کارایی زیاد است، بازده حذف از ۹۳/۷۷ درصد در سیکل

خالص به طور قابل توجهی افزایش یافته است: متیلن بلو: افزایش ۷۲ درصد در بازده (از ۲۴/۶۱ به ۴۲/۳۷ درصد)، فنل فتالئین: افزایش ۸۰ درصد در بازده (از ۳۲/۱۵ به ۵۷/۸۴ درصد) و آلیزارین رد: افزایش ۴۲ درصد در بازده (از ۶۵/۸۹ به ۹۳/۷۷ درصد). بهینه سازی شرایط واکنش، پایداری و بازده مناسب، ترکیب موفق لانتانیم با TiO_2 ، Fe_2O_3 ، افزایش تولید رادیکال های اکسیژن و بهینه سازی انتقال الکترون در ساختار سه تایی کامپوزیت از نوآوری های این پژوهش است. دستاوردهای این تحقیق، به ویژه در حذف آلیزارین رد با کارایی ۹۳/۷۷ درصد، نشان دهنده برتری قابل توجه آن نسبت به روش های متداول است. این نتایج نشان می دهند که کاتالیست سنتز شده می تواند در نمونه های پساب واقعی نیز مؤثر باشد.

جدول ۳: مقایسه جامع این مطالعه با تحقیقات مشابه (۲۲ و ۲۳).

Table 3: Comprehensive comparison of this study with similar researches (22, 23).

Feature	Current research	Same researches
Catalyst	$\text{La/TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$	TiO_2 pure
PDE of MB	42.37%	24.61%
PDE of PH	57.84%	32.15%
PDE of AR	93.77%	65.89%
Temperature	45 °C	25 °C
Process time	35 min	60 min
Optimal pH	3	7

۴- نتیجه گیری

خواص فیزیکی و شیمیایی کامپوزیت سنتز شده با استفاده از روش های FT-IR ، SEM ، XRD و UV-Vis DRS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مطالعه حاضر نشان می دهد که کاتالیست $\text{La/TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ برای حذف رنگزها بسیار موفقیت آمیز است. نمونه سنتز شده برای تجزیه نوری رنگ های MR ، AR ، MB ، MO و PH با استفاده از نور UV مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که فعالیت فوتوکاتالیزی این کامپوزیت تحت منبع نور UV به طور قابل توجهی تحت تأثیر pH و زمان واکنش قرار می گیرد. همچنین نتایج نشان می دهند که این کاتالیست به ترتیب با ۴۶/۲۵، ۷۰/۰۹، ۴۲/۳۷، ۱۱/۰۳ و ۵۷/۸۴ درصد، بهترین میانگین بازده تخریب فوتوکاتالیزی را برای رنگزهای MR ، AR ، MB ، MO و PH تحت تأثیر تابش نور UV در طول مدت ۳۵ دقیقه و در $\text{pH}=3$ دارد. علاوه بر این، میانگین بازده تخریب فوتوکاتالیزی در $\text{pH}=7$ برای MR ، AR ، MB ، MO و PH به ترتیب برابر با ۱۱/۴۳، ۳۰/۱۹، ۴۲/۵۱، ۱۵/۰۵ و ۷۳/۴۶ درصد و همچنین برای رنگزهای ذکر شده در $\text{pH}=11$ به ترتیب برابر با ۲۶/۶۰،

مورد پایداری و بازیافت، کار فعلی بهترین عملکرد را با ۵ چرخه استفاده مجدد و حفظ کارایی نشان داده است، در حالی که در تحقیق دوم پایداری در ۳ سیکل استفاده گزارش شده است و در تحقیق سوم قابلیت استفاده مجدد با حفظ ۸۰ درصد کارایی تأیید شده است. این نتایج نشان می دهد که کار فعلی در زمینه پایداری و قابلیت بازیافت گام مهمی برداشته است.

۳-۵- سازوکار حذف رنگزای AR توسط کاتالیست LTF

سازوکار حذف رنگزای آلیزارین رد توسط کامپوزیت LTF شامل مراحل پیچیده ای است که در آن نور UV به عنوان منبع انرژی، باعث فعال سازی کاتالیست و شروع واکنش های زنجیره ای می شود. این فرایند با تابش نور UV به کامپوزیت آغاز می شود که منجر به برانگیختگی الکترون ها و ایجاد جفت الکترون-حفره می شود (واکنش ۱).



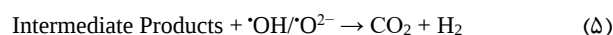
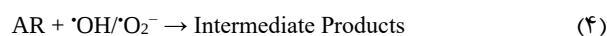
این جفت الکترون-حفره در حضور لانتانیم پایداری بیشتری دارد و عمر بیشتری دارد، که این پدیده باعث افزایش بازده حذف رنگز می شود. الکترون های برانگیخته با اکسیژن واکنش داده و رادیکال سوپراکسید تولید می کنند (واکنش ۲).



همچنین حفره های مثبت با آب واکنش داده و رادیکال هیدروکسیل تولید می کنند (واکنش ۳).



این رادیکال های فعال با مولکول های آلیزارین رد واکنش داده و باعث تجزیه تدریجی آن می شوند (واکنش ۴ و ۵).



در این فرایند، حضور Fe_2O_3 باعث تقویت فرایند فنتون می شود که منجر به تولید بیشتر رادیکال های فعال می شود. لانتانیم نیز با افزایش تراکم الکترون در سطح کاتالیست و پایداری کردن حفره های مثبت، نقش مهمی در بهبود بازده حذف رنگز ایفا می کند (۲۲).

۳-۶- مقایسه نتایج این مطالعه با پژوهش های دیگر

این مطالعه با رویکردی نوین در زمینه فوتوکاتالیست های سه تایی، دستاوردهای قابل توجهی در حذف رنگزهای سمی ارائه کرده است. برای درک بهتر جایگاه این تحقیق در پژوهش های موجود، مقایسه ای جامع با تحقیقات مشابه ارائه می شود. همان طور که در جدول ۳ مشاهده می شود، بازده حذف رنگزها در این مطالعه نسبت به TiO_2

سیستماتیک در مدل است. بر اساس نتایج بهینه‌سازی، شرایط بهینه برای حذف رنگزای AR شامل pH برابر با ۱۱ و زمان فرایند ۳۵ دقیقه است، که در این شرایط بازده حذف به حداکثر ۷۵/۶۶ درصد می‌رسد. مطلوبیت کلی ۰/۹۸۲ نشان‌دهنده هم‌خوانی بالای شرایط بهینه با اهداف مورد نظر است. این نتایج نشان می‌دهد که کاتالیست LTF در شرایط بهینه شده قابلیت حذف بالایی از رنگزای AR را دارد و می‌تواند به عنوان یک گزینه مؤثر در فرایندهای حذف رنگزاهای آلی مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

از پشتیبانی و حمایت دانشگاه کوثر بجنورد برای انجام این مطالعه تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع:

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

۴۸/۳۰، ۴۵/۸۲، ۱۰/۰۶ و ۴۷/۰۵ درصد است. نتایج تحلیل آماری و مدل‌سازی روش سطح پاسخ نشان می‌دهد که مدل به کار رفته برای بررسی حذف رنگزای AR با استفاده از کاتالیست LTF از دقت و قابلیت پیش‌بینی بالایی برخوردار است. ضریب همبستگی R^2 برابر ۰/۹۹۶۸ و R^2 پیش‌بینی شده ۰/۹۸۲۲ نشان‌دهنده برازش عالی مدل با داده‌های تجربی است. این هم‌خوانی بالا بین مقادیر R^2 پیش‌بینی شده و تعدیل شده (۰/۹۹۴۵) گویای قابلیت اطمینان بالای مدل در پیش‌بینی شرایط بهینه است. تحلیل واریانس (ANOVA) نشان می‌دهد که عامل‌های مورد بررسی به طور معنی‌داری بر فرایند تأثیر می‌گذارند. زمان فرایند (B) با F-value برابر ۱۶۷۵/۵۱ و pH (A) با F-value برابر ۲۲۴/۸۶ تأثیرات معنی‌داری بر بازده حذف دارند. همچنین برهمکنش بین این دو عامل (AB) با F-value برابر ۱۲۰/۶۶ نشان‌دهنده تأثیر متقابل آنها بر فرایند است. تحلیل باقیمانده‌ها نیز صحت مدل را تأیید می‌کند. توزیع خطی باقیمانده‌ها در نمودار احتمال عادی و پراکندگی تصادفی آنها در اطراف صفر ($\pm ۴/۵۶$) نشان‌دهنده برازش مناسب مدل است. باقیمانده‌های مقیاس‌بندی شده خارجی نیز الگوی سامانمند نشان نمی‌دهند، که گویای عدم وجود سوگیری یا خطاهای

۵- مراجع

- Amari A, Yadav VK, Pathan SK, Singh B, Osman H, Choudhary N, et al. Remediation of methyl red dye from aqueous solutions by using biosorbents developed from floral waste. *Adsorpt Sci Technol*. 2023;1532660. <https://doi.org/10.1155/2023/1532660>
- Ikram M, Naeem M, Zahoor M, Rahim A, Hanafiah MM, Oyekanmi AA, Shah AB, Mahnashi MH, Al Ali A, Jalal NA, Bantun F. Biodegradation of Azo Dye Methyl Red by *Pseudomonas aeruginosa*: Optimization of Process Conditions. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(16):9962. <https://doi.org/10.3390/ijerph19169962>
- Ashraf SS, Rauf MA, Alhadrami S. Degradation of Methyl Red using Fenton's reagent and the effect of various salts. *Dyes Pigm*. 2006;69(1-2):74-8. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2005.02.009>
- Sharma K, Pandit S, Mathuriya AS, Gupta PK, Pant K, Jadhav DA. Microbial electrochemical treatment of methyl red dye degradation using co-culture method. *Water*. 2022;15(1):56. <https://doi.org/10.3390/w15010056>
- Hu S, Yuan D, Liu Y, Zhao L, Guo H, Niu Q, Zong W, Liu R. The toxic effects of alizarin red S on catalase at the molecular level. *RSC Adv*. 2019;9(57):33368-77. <https://doi.org/10.1039/C9RA02986A>
- Ullah MA, Alhar MS, Khan AU, Tahir K, Zaki ME, Alabbad EA, Saleh EA, Hassan HM, El-Zahhar AA, Munshi AM. Photocatalytic removal of alizarin red and photoinhibition of microbes in the presence of surfactant and Bio-template mediated $\text{Ag/SnO}_2\text{/Nb}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ nanocomposite. *J Mol Liquid*. 2023;370:121042. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.121042>
- Rehman R, Raza A, Noor W, Batool A, Maryem H. Photocatalytic Degradation of Alizarin Red S, Amaranth, Congo Red, and Rhodamine B dyes using UV light modified reactor and ZnO , TiO_2 , and SnO_2 as catalyst. *J Chem*. 2021;2021(1):6655070. <https://doi.org/10.1155/2021/6655070>
- Zhang X, Shi P, Zhao W, Lu W, Li F, Min Y, Xu Q. Research on methylene blue degradation based on multineedle-to-plane liquid dielectric barrier discharge mode. *Sep Purif Technol*. 2022;286:120476. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120476>
- Teixeira YN, de Paula Filho FJ, Bacurau VP, Menezes JM, Fan AZ, Melo RP. Removal of Methylene Blue from a synthetic effluent by ionic flocculation. *Heliyon*. 2022;8(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10868>
- Zhu C, Feng Q, Ma H, Wu M, Wang D, Wang Z. Effect of methylene blue on the properties and microbial community of anaerobic granular sludge. *Bioresour*. 2018;13(3):6033-46.
- Ardila-Leal LD, Poutou-Piñales RA, Pedroza-Rodríguez AM, Quevedo-Hidalgo BE. A brief history of colour, the environmental impact of synthetic dyes and removal by using laccases. *Mol*. 2021;26(13):3813. <https://doi.org/10.3390/molecules26133813>
- Ali AE, Chowdhury ZZ, Devnath R, Ahmed MM, Rahman MM, Khalid K, Wahab YA, Badruddin IA, Kamangar S, Hussien M, Pallan KH. Removal of azo dyes from aqueous effluent using bio-based activated carbons: toxicity aspects and environmental impact. *Sep*. 2023;10(9):506. <https://doi.org/10.3390/separations10090506>
- Ayele A, Getachew D, Kamaraj M, Suresh A. Phycoremediation of synthetic dyes: An effective and eco-friendly algal technology for the dye abatement. *J Chem*. 2021;2021(1):9923643. <https://doi.org/10.1155/2021/9923643>
- Sirirerkratana K, Kemacheevakul P, Chuangchote S. Color

- removal from wastewater by photocatalytic process using titanium dioxide-coated glass, ceramic tile, and stainless steel sheets. *J Clean Prod.* 2019;215:123-30. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.037>.
15. Jaybhaye S, Shinde N, Jaybhaye S, Narayan H. Photocatalytic degradation of organic dyes using Titanium Dioxide (TiO_2) and Mg- TiO_2 nanoparticles. *J Nanotechnol.* 2022;3(2):67-76. <https://doi.org/10.33696/Nanotechnol.3.032>.
 16. Meksi M, Turki A, Kochkar H, Bousselmi L, Guillard C, Berhault G. The role of lanthanum in the enhancement of photocatalytic properties of TiO_2 nanomaterials obtained by calcination of hydrogenotitanate nanotubes. *Appl Catal B: Env.* 2016; 181:651-660. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.08.037>
 17. Rajesh C, Rajashekara R, Nagaraju P. Response Surface Methodology (RSM) modelling for the photocatalytic optimization study of benzophenone removal using CuWO_4/NiO nanocomposite. *J Env Health Sci Eng.* 2023;21(1):187-199. <https://doi.org/10.1007/s40201-023-00852-3>.
 18. Parsafard N, Shoorgashti Z. The effect of transition metal oxides in the La/TiO_2 structure for the photocatalytic degradation of malachite green under UV and visible light irradiation. *Appl Water Sci.* 2024;14(10):220. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-0228-5>.
 19. Parsafard N, Abedi R, Moodi H. Ternary tin-doped titanium dioxide/calcium oxide ($\text{Sn-TiO}_2/\text{CaO}$) composite as a photocatalyst for efficient removal of toxic dyes. *RSC Adv.* 2024;14(28):19984-95. <https://doi.org/10.1039/D4RA03641G>.
 20. Suliman ZA, Mecha AC, Mwasiagi JI. Effect of $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ nanopowder synthesis method on visible light photocatalytic degradation of reactive blue dye. *Heliyon.* 2024;10(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29648>.
 21. Kumar A, Pandey G. A review on the factors affecting the photocatalytic degradation of hazardous materials. *Mater Sci Eng Int J.* 2017;1(3):1-0. <https://doi.org/10.15406/mseij.2017.01.00018>.
 22. Jagodić I, Guth I, Lukić-Petrović S, Tamindžija D, Šojić Merkulov D, Finčur N, Putnik P, Banić N. Reusable $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{PVC}$ Photocatalysts for the Removal of Methylene Blue in the Presence of Simulated Solar Radiation. *Nanomater.* 2023;13(3):460. <https://doi.org/10.3390/nano13030460>.
 23. Liu H, Zhang ZG, Wang XX, Nie GD, Zhang J, Zhang SX, Long YZ. Highly flexible $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ composite nanofibers for photocatalysis and ultraviolet detection. *J Phys Chem Solid.* 2018;121:236-246. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2018.05.019>.

How to cite this article:

Parsafard N. Comprehensive investigation of photocatalytic performance of $\text{La/TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ composite in the degradation of five different dyes under optimized pH and time conditions. *J Stud Color World.* 2025;15(2):211-225. <https://doi.org/10.30509/jscw.2025.167442.1218> [In Persian].