

تصفیه‌ی فاضلاب رنگی حاوی تارترازین با استفاده از فناوری پلاسمای سرد

مسعود خجسته (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمد دلنواز* (دانشیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

حسن مهدیان (استاد)

مؤسسه‌ی تحقیقاتی پلاسما، دانشکده‌ی فیزیک، دانشگاه خوارزمی

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۲ (۶۸-۵۹)
دوری ۳۹، شماره ۲، صص. ۶۸-۵۹ (پژوهشی)

هدف از مطالعه‌ی حاضر، ارزیابی درصد حذف رنگ تارترازین از محلول آبی با استفاده از فناوری پلاسمای سرد است. بدین منظور، پارامترهای اصلی فرایند حذف رنگ با استفاده از پلاسمای سرد شامل غلظت رنگ (۲۰-۴ میلی‌گرم در لیتر)، pH محلول (۹/۴ - ۲/۲)، ولتاژ منبع تغذیه (۱۰-۷۰ ولت)، زمان تصفیه (۳۰-۱۰ دقیقه) و فاصله‌ی الکترود تا سطح محلول رنگی به طور ثابت ۸ میلی‌متر بررسی شده‌اند. آزمایش‌ها در حجم ۱۵ میلی‌لیتر با استفاده از منبع تغذیه‌ی الکتریکی جریان متناوب (AC) برای تولید پلاسمای سرد انجام شده است. بررسی حذف رنگ نشان داد که حالت بهینه‌ی آزمایش‌ها در غلظت اولیه‌ی ۱۴ میلی‌گرم در لیتر، ولتاژ ۸۶ ولت، pH = ۴/۱ و زمان تابش پلاسما در ۱۸/۷ دقیقه با درصد حذف رنگ ۹۹/۷۸٪ رخ داده است که در این حالت بازده انرژی ۱۰/۸ میلی‌گرم در کیلووات ساعت بوده است. نتایج مستخرج شده از مدل‌سازی حاکی از تأثیر مستقیم زمان ماند و ولتاژ اولیه و تأثیر معکوس pH و غلظت اولیه‌ی رنگ صنعتی در راندمان حذف بوده است.

واژگان کلیدی: پلاسمای سرد، بهینه‌سازی، تارترازین، درصد حذف رنگ، بازدهی انرژی.

masoudkhojaste1374@gmail.com
delnavaz@khu.ac.ir
mahdian@khu.ac.ir

۱. مقدمه

کردند.^[۳] رنگ‌های آزو ترکیب‌های معطر پیچیده‌ی هستند که با یک یا چند گروه پیچیدگی ساختار، زیست تجزیه‌پذیری نسبتاً کمی دارند. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که فاضلاب‌های رنگی علاوه بر داشتن آثار سمی، احتمال بروز آلرژی، عفونت‌های چشمی و پوستی، درمانیت و سرطان را افزایش می‌دهند.^[۱] ضمناً می‌توانند آثار منفی و مخربی مانند تشکیل تری‌هالومتان‌ها، تداخل در جذب و انعکاس تابش نور خورشید از طریق کاهش شفافیت آب و ایجاد مشکل در حیات آبیان و فتوسنتز گیاهان داشته باشند.^[۴] روش‌های اصلی مورد استفاده برای تصفیه‌ی فاضلاب‌های صنعتی رنگی، شامل: تصفیه‌ی بیولوژیکی^[۵]، فیلتراسیون^[۶]، اولترافیلتراسیون^[۷]، جداسازی غشایی^[۸]، جذب سطحی^[۹]، شناورسازی^[۱۰]، انعقاد^[۱۱]، فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته^[۱۲] و الکترولیز^[۱۳] هستند. به سبب پایداری بالای مولکول‌های آلاینده‌های رنگی، فرایندهای فیزیکوشیمیایی کارایی نسبتاً پایینی دارند.^[۱۵] فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs)^[۴] به عنوان جایگزینی مناسب برای فرایندهای متداول حذف مواد رنگی پیشنهاد می‌شوند. اساس فرایند AOP بر پایه‌ی اکسیداسیون مواد آلی توسط

آلودگی آب، مهم‌ترین مسئله‌ی زیست‌محیطی پیش روی جوامع انسانی در سطح جهان است که ناشی از توسعه‌ی سریع فعالیت‌های صنعتی و افزایش جمعیت است.^[۱] فاضلاب حاوی رنگ‌ها از آلوده‌کننده‌های مهم محیط‌زیست هستند که در سلامت انسان نیز تأثیر می‌گذارد، زیرا صنایع نساجی مقادیر زیادی فاضلاب رنگی حاوی طیف متنوعی از آلاینده‌های پایدار تولید می‌کنند.^[۲] یکی از شناخته‌شده‌ترین، پرکاربردترین و متداول‌ترین ترکیب‌های رنگی در صنایع غذایی، دارویی و نساجی از زیرمجموعه‌ی آزو، رنگ تارترازین است. همچنین از مضرترین موادی که می‌تواند خطر سمی بودن در صنایع مذکور را به همراه داشته باشد، همین رنگ تارترازین است.^[۳] به همین دلیل سازمان غذا و داروی ایالات متحده (FDA)^[۲] و سازمان ایمنی غذای اروپا (EFSA)^[۳]، مجوزهای استفاده از ترکیب‌های مذکور را برای ارائه‌ی محصولات غذایی ایمن برای مصرف‌کنندگان و جلوگیری از آثار نامطلوب کوتاه‌مدت و بلندمدت تنظیم

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۰۶/۱۹، اصلاحیه ۱۴۰۱/۰۹/۲۱، پذیرش ۱۴۰۱/۰۹/۲۷

DOI:10.24200/J30.2022.61048.3141

استناد به این مقاله:

خجسته، مسعود، دلنواز، محمد و مهدیان، حسن، ۱۴۰۲. تصفیه‌ی فاضلاب رنگی حاوی تارترازین با استفاده از فناوری پلاسمای سرد. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۶۸-۵۹.

تولید طیف گسترده‌ی از انواع رادیکال‌های آزاد مانند هیدروکسیل است که باعث تخریب آلایندگی اولیه به ترکیب‌هایی کوچک‌تر و در نهایت، تبدیل آن به آب و دی‌اکسید کربن می‌شود و ممکن است منجر به معدنی‌سازی کامل شوند.^[۱۵]

طیف وسیعی از فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته در مقیاس آزمایشگاهی مطالعه شده است. به عنوان مثال، سیستم لامپ UV و پراکسید هیدروژن برای حذف ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر محلول رنگی ری‌اکتیو آبی توسط آیتی و همکاران (۲۰۱۳)، استفاده شده و نتایج آن‌ها حاکی از حذف کامل آلایندگی در مدت زمان ۲۵ دقیقه و در pH قلیایی بوده است.^[۱۶] یکی از انواع فرایندهای AOP که در سال‌های اخیر به طور مناسبی برای تصفیه فاضلاب‌های خطرناک استفاده شده است، فرایند پلاسما اتمسفر سرد (CAP)^۵ است که از دو طریق می‌تواند رادیکال‌های مؤثر در فرایند تخریب ماده‌ی آلی را تولید کند.^[۱۷] به دلیل تولید انرژی بالا، پلاسما به خودی خود قادر به تولید انواع رادیکال است. علاوه بر این، در سطح تماس پلاسما با آب، یون‌های فعال و رادیکال‌هایی از جمله OH، الکترون‌های پر انرژی و فوتون‌های فرابنفش تولید می‌شوند که همگی می‌توانند به تخریب و اکسیداسیون مولکول‌های آلی و مواد خطرناک موجود در آب کمک کنند. همچنین روش اخیر (CAP)، به عنوان یک روش اصلاحی مطلوب به دلیل نیاز به انرژی کم یک فرایند سازگار با محیط‌زیست است.^[۱۵، ۱۳]

گاریسیا^۶ و همکاران (۲۰۱۷)، برای حذف رنگ متیلن بلو در محلول آبی با استفاده از جت پلاسما سرد در فشار اتمسفر مطالعه‌ی انجام داده‌اند که منجر به حذف رنگ متیلن آبی شده است. ایشان از گاز آرگون به عنوان گاز مصرفی استفاده کردند و دریافته‌اند که با افزایش سرعت جریان ورودی گاز آرگون، سرعت تخریب رنگ افزایش می‌یابد.^[۱۷] عبدالفتاح^۷ (۲۰۱۹)، جت پلاسما در فشار اتمسفر با ورودی گاز هلیوم را برای تخریب رنگ متیلن بلو ارزیابی کرده و دریافته است که با افزایش نرخ جریان گاز هلیوم از ۲/۵ به ۱۰ لیتر در دقیقه، سرعت حذف رنگ با شدت بیشتری انجام می‌شود، به طوری که پس از ۴۰ دقیقه تصفیه با جت پلاسما، محلول آبی کاملاً رنگ‌زدایی می‌شود. نتایج پژوهش اخیر نشان داد که رابطه‌ی مستقیم بین درصد حذف رنگ و طول پلاسما تشکیل شده وجود دارد (منظور از طول پلاسما در پژوهش مذکور، فاصله‌ی بین غلاف کوآرتز تا سطح محلول رنگی است).^[۱۸] رحیم‌پور و همکاران (۲۰۱۹)، با استفاده از روش راکتور پلاسما تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک (DBD)^۸ با گاز مصرفی O₂ اقدام به حذف رنگ کریستال بنفش با مشخصات غلظت اولیه‌ی ۱۰ μM و pH = ۵/۵ کردند. در توان ثابت با افزایش دبی گاز O₂، میزان درصد حذف رنگ افزایش یافت، به طوری که افزایش دبی گاز از ۵۰۰ به ۷۰۰ میلی‌لیتر در دقیقه منجر به حذف رنگ از ۹۸/۲ به ۱۰۰ درصد شد، در حالی که با افزایش نرخ جریان گاز از ۹۰ به ۳۰۰ میلی‌لیتر در دقیقه، درصد حذف رنگ از ۴۰/۱ به ۹۱/۴ ارتقاء پیدا کرد.^[۱۹]

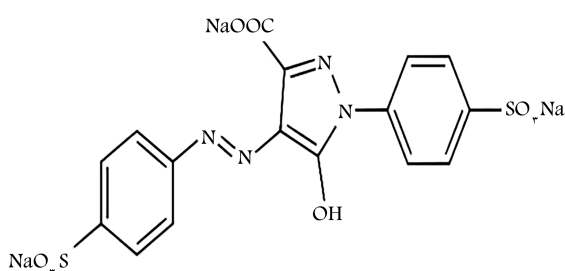
محمد^۹ و همکاران (۲۰۲۲)، فرایند تخریب رنگ آبی با مشخصات جذب در ۶۲۴ نانومتر، غلظت ۶/۳ میلی‌گرم و pH = ۷/۳ را با تخلیه‌ی پلاسما در حضور فتوکاتالیست پلی‌وینیلیدین فلوراید/MWCNs/TiO₂ بررسی کردند و دریافته‌اند که حذف رنگ آبی با تابش فقط پلاسما در زمان تصفیه‌ی ۲۰ و ۶۰ دقیقه به مقدار ۴۲ و ۹۴ درصد بوده است، در حالی که راندمان درصد حذف رنگ در همان جذب ۶۲۴ نانومتر، برای نمونه‌های تصفیه شده با پلاسما در شرایط مشابه و در حضور پلی‌وینیلیدین فلوراید/MWCNs/TiO₂ پس از ۲۰ و ۶۰ دقیقه تصفیه، ۶۰ و ۸۹ درصد بوده است.^[۱۳] واسی‌کاران^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۲)، عملکرد راکتور پلاسما سرد به کمک هوای اتمسفر برای تجزیه‌ی اکسیداتیو رنگ‌های نساجی آزو (اورژ)

G و کنگو قرمز) و غیرآزو (کریستال بنفش و کوماسی آبی روشن) را بررسی کردند و در غلظت ۵ppm و زمان تصفیه‌ی ۳۰ دقیقه به راندمان حذف ۹۹ درصدی برای تمامی رنگ‌ها دست یافتند. راندمان درصد حذف رنگ با ولتاژ اعمال شده، رابطه‌ی مستقیم و با غلظت اولیه‌ی رنگ، رابطه‌ی معکوس داشت و در pHهای خنثی، راندمان حذف بیشتری نسبت به محدوده‌ی اسیدی و بازی از خود نشان داد. در مطالعه‌ی مذکور، با افزایش زمان تابش، غلظت گونه‌های OH، H₂O₂ و O₂ به طور خطی افزایش یافته است.^[۲۰]

به منظور یافتن محدوده‌ی پارامترهای مؤثر اقداماتی از قبیل مطالعه‌ی نوشتارهای مشابه و انجام پیش‌آزمایش‌ها صورت گرفت تا به درستی در نرم‌افزار RSM وارد شوند. همچنین به علت عدم استفاده از گازهای مختلف، مانند: آرگون، نیتروژن و اکسیژن، فاصله‌ی الکترودها برای ایجاد تخلیه‌ی الکتریکی بسیار اهمیت داشت؛ به همین دلیل، برای جلوگیری از ایجاد خطا، فاصله‌ی الکترودها در طول آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. مطالعات انجام شده در زمینه‌ی استفاده از پلاسما سرد برای تصفیه‌ی فاضلاب‌های رنگی و صنعتی بسیار محدود بوده است و با توجه به عدم استفاده از ماده‌ی فتوکاتالیست، استفاده از فناوری ذکر شده می‌تواند زمینه‌ی مهمی برای صنعتی‌سازی آن باشد. از این رو با توجه به اهمیت و گسترش کاربرد پلاسما سرد در فرایندهای تصفیه‌ی فاضلاب صنعتی، امکان‌سنجی استفاده از فرایند مذکور در حذف آلایندگی تارترازین از محیط آبی و به دست آوردن شرایط بهینه جهت حصول بیشینه‌ی راندمان حذف در پژوهش حاضر بررسی شده است. از نوآوری پژوهش حاضر می‌توان به استفاده از پلاسما سرد و بررسی اندرکنش اجزاء مختلف واکنش با استفاده از مدل RSM در حذف آلایندگی رنگی اشاره کرد.

۲. مواد و روش‌ها

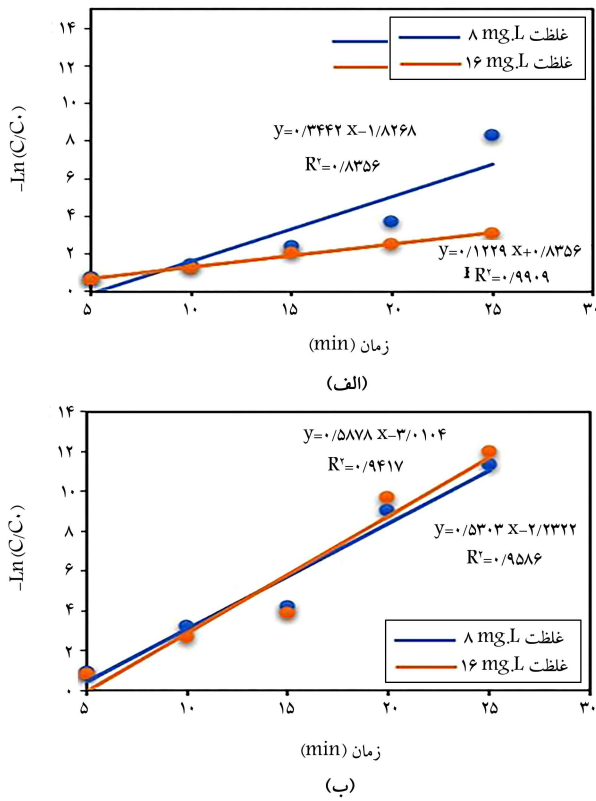
در پژوهش حاضر، از رنگ تارترازین با ساختار شیمیایی مطابق شکل ۱ و خصوصیات شیمیایی مطابق جدول ۱ استفاده شده است. به منظور تولید پلاسما، دو الکتروده به منبع تغذیه‌ی جریان متناوب (AC) متصل شد. یک سیم مغتولی با قطر ۱۰ میلی‌متر و طول ۲۵۰ میلی‌متر به عنوان الکتروده اول (الکتروده ولتاژ بالا) در داخل غلاف عایقی از جنس کوآرتز با طول ۲۳۰ میلی‌متر، قطر خارجی ۱۴/۲ میلی‌متر



شکل ۱. ساختار شیمیایی رنگ تارترازین.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی رنگ تارترازین.

نام تجاری	Tartrazine, FD&C yellow
فرمول شیمیایی	C ₁₆ H ₉ N ₄ Na ₃ O ₉ S ₂
وزن مولکولی	۵۳۴/۴ gr/mol
طول موج بیشینه	۴۲۵ nm



شکل ۳. الف) تعیین بیشینه‌ی طول موج جذب، ب) منحنی کالیبراسیون.

تابش پلاسما مطابق رابطه‌ی ۳ محاسبه شده است. همچنین براساس معادله‌ی ۴، به محاسبه‌ی نیمه‌ی عمر واکنش پرداخته شده است.

$$\ln \frac{C_t}{C_0} = -kt \quad (3)$$

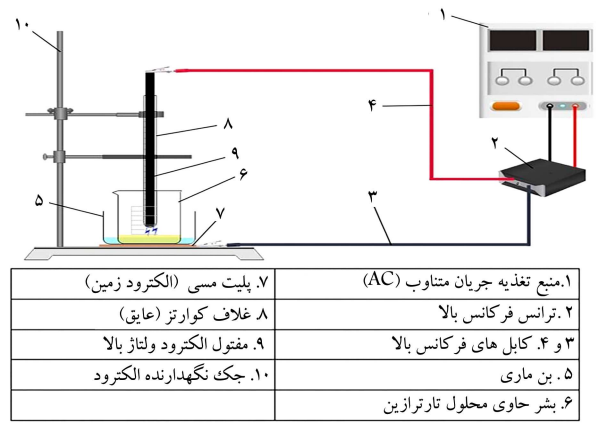
$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{t}{\log_{\frac{1}{2}} \left(\frac{C_t}{C_0} \right)} \rightarrow t_{\frac{1}{2}} = -\frac{\ln \left(\frac{1}{2} \right)}{K} \quad (4)$$

که در آن، C_0 غلظت اولیه‌ی رنگ، C_t غلظت رنگ پس از گذشت زمان t ، k سرعت ثابت واکنش ($1/\text{min}$) و $t_{\frac{1}{2}}$ مدت زمانی است که طول می‌کشد تا غلظت آلاینده (رنگ تارترازین) به نصف غلظت اولیه‌ی خود برسد (نیمه‌ی عمر).^[۲۲] برای تجزیه و تحلیل داده‌های آماری از نرم افزار Design Expert (نسخه‌ی ۱۳) و روش سطح پاسخ (RSM)^[۱۱] که روشی کارآمد برای بهینه‌سازی متغیرهای مستقل و پاسخ‌های آن‌ها به طور تجمعی است و در فرایندهای مختلف برای دست‌یابی به بالاترین راندمان بکار برده، استفاده شده است. RSM تعداد آزمایش‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد و توانایی مطالعه‌ی تعداد زیادی از پارامترها و همچنین تعامل بین آن‌ها را دارد. تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) نتایج آماری و آزمون بررسی تشخیصی را ارائه می‌دهد که پژوهشگران از آن برای ارزیابی کفایت مدل‌ها استفاده می‌کنند.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. بررسی تأثیر متغیرهای فرایند در راندمان حذف

مطابق با جدول ۲، براساس انجام پیش‌آزمایش‌ها و تعریف محدوده برای هر متغیر،



شکل ۲. راکتور و تجهیزات استفاده شده.

و قطر داخلی ۱۲ میلی‌متر قرار گرفت و صفحه‌ی تخت مسی با ابعاد 15×15 سانتی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر به‌عنوان الکتروود دوم (الکتروود اتصال به زمین) انتخاب شده است. حجم محلول در هر آزمایش ۱۵ میلی‌لیتر بوده است. الکتروود اول از طریق پایه‌ی نگهدارنده در مرکز محلول و در فاصله‌ی ۸ میلی‌متری از محلول، در حالی که ظرف محلول بر روی الکتروود دوم متصل بود، تنظیم و ثابت شده است. در طول آزمایش به دلیل افزایش دمای محلول و به منظور جلوگیری از تبخیر، از دستگاه بن ماری جهت تنظیم دمای محلول استفاده شده است (شکل ۲). قبل از انجام هر آزمایش، برای تعیین و تنظیم pH محلول از دستگاه pH متر دیجیتالی مدل HQ40d (HACH) استفاده شده است.

برای تعیین غلظت نهایی محلول رنگی، ابتدا طول موج بیشینه تعیین شده است. بدین منظور، غلظت ۲۰ میلی‌گرم در لیتر محلول رنگ تارترازین تهیه و طیف جذب آن در محدوده‌ی ۳۴۰ تا ۷۰۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل DR3900 ساخت شرکت HACH رسم شده است. با توجه به طیف به‌دست آمده در شکل ۳ الف، طول موج بیشینه‌ی جذب محلول رنگ ۴۲۵ نانومتر تعیین شده است. سپس به منظور رسم منحنی کالیبراسیون مطابق شکل ۳ ب، غلظت‌های مختلف محلول رنگی به میزان ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر تهیه و میزان جذب نور در طول موج بیشینه‌ی ۴۲۵ نانومتر اندازه‌گیری شده است.

منحنی کالیبراسیون براساس قانون بیرلامبرت و رابطه‌ی خطی جذب و غلظت رسم شده است. در طی مراحل پژوهش برای تعیین درصد حذف رنگ از رابطه‌ی ۱ استفاده شده است:

$$R = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

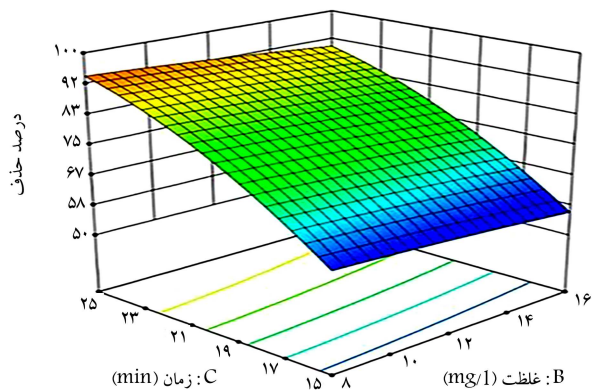
که در آن، C_0 غلظت اولیه‌ی رنگ (mg/L) و C_t غلظت رنگ در فاضلاب تصفیه شده در زمان t (mg/L) هستند. در فرایند پلاسما به دلیل حضور منبع تغذیه، میزان انرژی مصرفی اهمیت خاصی دارد. میزان انرژی مصرفی مطابق رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:^[۱۹]

$$EE = \frac{C_0 \times V \times \frac{1}{V_0} \times R}{P \times t} \quad (2)$$

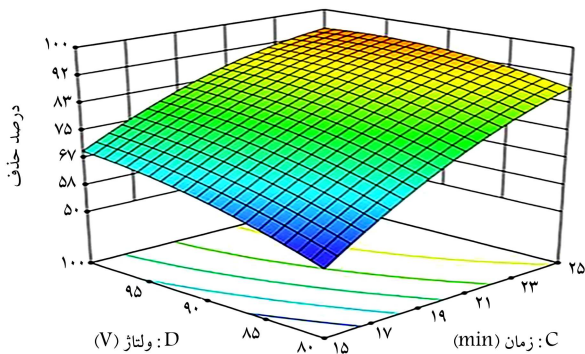
که در آن، EE بازده انرژی بر حسب گرم در کیلووات ساعت، C_0 غلظت اولیه‌ی رنگ بر حسب گرم در لیتر، V حجم محلول بر حسب لیتر، R حذف رنگ بر حسب درصد، P توان بر حسب کیلووات و t زمان تصفیه بر حسب ساعت هستند. براساس مدل سینتیکی مرتبه‌ی اول، تحلیل سینتیک برای تخریب رنگ تارترازین با

جدول ۲. آزمایش‌های طرح شده و راندمان حذف آلاینده در شرایط مختلف.

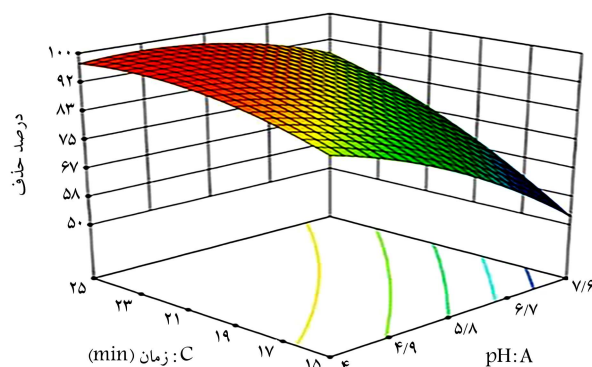
شماره	pH	غلظت رنگ	زمان ماند	ولتاژ	کارایی %
۱	۴	۸	۱۵	۸۰	۹۱/۲
۲	۵/۸	۱۲	۲۰	۹۰	۹۹/۴
۳	۷/۶	۸	۲۵	۸۰	۹۱/۵
۴	۷/۶	۱۶	۲۵	۱۰۰	۹۰
۵	۵/۸	۱۲	۱۰	۹۰	۶۴/۶
۶	۵/۸	۱۲	۲۰	۹۰	۹۷/۹
۷	۴	۱۶	۲۵	۸۰	۹۵/۵
۸	۷/۶	۸	۲۵	۱۰۰	۹۹/۴
۹	۵/۸	۱۲	۲۰	۹۰	۹۶
۱۰	۷/۶	۸	۱۵	۸۰	۵۶/۵
۱۱	۵/۸	۱۲	۲۰	۹۰	۹۹
۱۲	۲/۲	۱۲	۲۰	۹۰	۱۰۰
۱۳	۵/۸	۱۲	۲۰	۱۱۰	۹۹/۵
۱۴	۷/۶	۸	۱۵	۱۰۰	۷۳/۳
۱۵	۴	۱۶	۲۵	۱۰۰	۱۰۰
۱۶	۵/۸	۲۰	۲۰	۹۰	۹۳/۶
۱۷	۴	۱۶	۱۵	۸۰	۸۷/۷
۱۸	۵/۸	۴	۲۰	۹۰	۱۰۰
۱۹	۴	۸	۱۵	۱۰۰	۹۸/۵
۲۰	۵/۸	۱۲	۲۰	۷۰	۷۶/۶
۲۱	۴	۱۶	۱۵	۱۰۰	۹۸
۲۲	۵/۸	۱۲	۲۰	۹۰	۹۷/۸
۲۳	۹/۴	۱۲	۲۰	۹۰	۶۲/۲
۲۴	۴	۸	۲۵	۱۰۰	۱۰۰
۲۵	۵/۸	۱۲	۳۰	۹۰	۱۰۰
۲۶	۷/۶	۱۶	۲۵	۸۰	۹۱
۲۷	۴	۸	۲۵	۸۰	۱۰۰
۲۸	۵/۸	۱۲	۲۰	۹۰	۹۸/۶



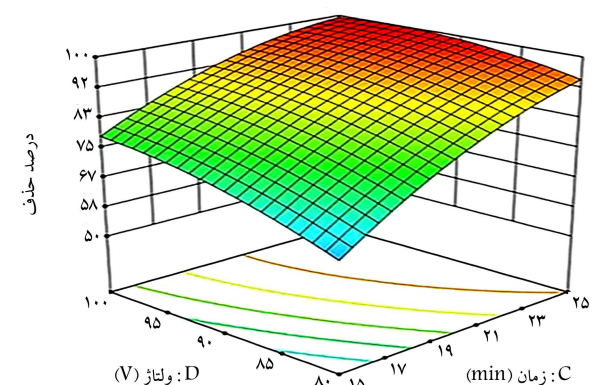
الف) تاثیر pH=۹/۴ و ولتاژ ۷۰ V در غلظت و زمان های مختلف؛



ب) تاثیر pH=۹/۴ و غلظت ۲۰ mg/l در ولتاژ و زمان های مختلف؛



ج) تاثیر غلظت ۲۰ mg/l و ولتاژ ۷۰ V در pH و زمان های مختلف؛



د) تاثیر غلظت ۲۰ mg/l و pH=۴/۶ در ولتاژ و زمان های مختلف.

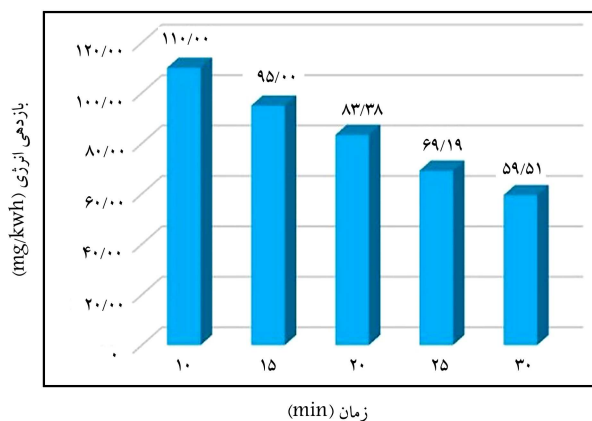
شکل ۴. تاثیر تغییرات همزمان دو متغیر در رنگ‌زدایی فرایند.

تعداد ۲۸ آزمایش با استفاده از نرم‌افزار Design Expert و روش طراحی مرکب مرکزی (CCD) تعیین و درصد حذف رنگ مشخص شده است. تأثیر هر متغیر به تنهایی و تأثیر همزمان دو متغیر در میزان حذف ماده‌ی آلی در شکل ۴ مشاهده می‌شود. همان‌طور که اشاره شد، غلظت اولیه‌ی رنگ در محدوده‌ی ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر انتخاب شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش غلظت اولیه از ۴ به ۲۰، میزان حذف از ۱۰۰ به ۹۳/۶ کاهش یافته است. دلیل این امر را می‌توان در افزایش نسبت رادیکال‌های OH به غلظت رنگ دانست. در مطالعه‌ی که لیو^{۱۳} و همکاران (۲۰۲۰)، برای تخریب رنگ اسید اورنژ ۷ توسط پلاسما‌ی غیرحرارتی انجام دادند، به این نکته پی بردند که بیشترین درصد حذف در کمترین غلظت، برابر با ۵ میلی‌گرم در لیتر (۹۷/۵٪) و کمترین درصد حذف در بیشترین غلظت، برابر با ۲۰ میلی‌گرم در لیتر (۷۰/۸٪) رخ داده است.^[۱۳] همچنین در حین انجام آزمایش‌ها به این نکته پی برده شد که با افزایش pH، میزان حذف تارتازین کاهش یافته است؛ که نشان می‌دهد محیط بازی اثر منفی در حذف تارتازین داشته است، در حالی که محیط اسیدی باعث افزایش حذف تارتازین می‌شود. نتایج نشان داد که در شرایط مشابه درصد حذف رنگ

سطح محلول رنگی است، و فاصله‌ی مذکور، یک مقدار بهینه دارد. بدین معنی که با افزایش یا کاهش بیش از حد فاصله‌ی الکترود، راندمان حذف رنگ کاهش می‌یابد که دلیل این امر را می‌توان در تغییر شدت میدان الکتریکی دانست. در پژوهش حاضر، فاصله‌ی الکترود ولتاژ بالا تا سطح محلول ۸ میلی‌متر و ثابت در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است جنس و ضخامت عایق استفاده شده (که در پژوهش حاضر، کوارتز با ضخامت ۱ میلی‌متر بوده است) در یافتن فاصله‌ی بهینه از عوامل مؤثر هستند. ذقیود^{۲۰} و همکاران (۲۰۲۰) از مطالعه‌ی خود نتیجه گرفتند که فاصله‌ی بین الکترودها، یعنی شکاف تخلیه، نقش اساسی در راندمان تخریب ترکیب‌های مضر دارد، زیرا تغییر فاصله‌ی الکترود منجر به تغییر در شدت میدان الکتریکی می‌شود و همان‌طور که ایشان گزارش کرده‌اند، افزایش فاصله‌ی الکترودها، زمان لازم برای دست‌یابی به راندمان حذف معین آلاینده‌ها را افزایش می‌دهد.^[۳۰] از سوی دیگر، سانو^{۲۱} و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ی خود که در مورد تجزیه‌ی ترکیب‌های آلی در آب بوده است، گزارش کرده‌اند که شکاف کاتد - آنُد، یک مقدار بهینه در یک ورودی ولتاژ معین برای دستیابی به بیشینه‌ی راندمان تخریب رنگ رودامین B دارد.^[۳۱] ژیانگ^{۲۲} و همکاران (۲۰۱۴)، از پژوهش خود نتیجه گرفتند که ولتاژ شروع تخلیه را می‌توان با کاهش فاصله‌ی الکترود برای دستیابی به همان میزان راندمان کاهش داد و اگر فاصله‌ی بین دو الکترود، بیش از حد زیاد شود، حجم ناحیه‌ی تولید پلاسما کاهش و در نتیجه راندمان کاهش می‌یابد. بنابراین طراحی فاصله بین دو الکترود باید به گونه‌ی باشد که توزیع یکنواخت پلاسما، یک منطقه‌ی الکتریکی بزرگ و مطابق با راکتور ایجاد کند.^[۳۲] بررسی اثر بازده انرژی در حذف رنگ مطابق رابطه‌ی ۲ و در حالت بهینه (غلظت اولیه‌ی ۱۴ میلی‌گرم در لیتر، توان ۶/۲۸ وات، و $pH=4/1$) مطابق شکل ۵ انجام شده است. نتایج نشان داد که با افزایش ولتاژ تخلیه، راندمان حذف رنگ به تدریج افزایش و بازده انرژی کاهش، و با افزایش زمان تصفیه، بازدهی انرژی کاهش یافته است.

۲.۳. راستی‌آزمایی مدل و توصیف فرایند

راهبرد آزمایشی طراحی RSM با روش CCD برای بهینه‌سازی و ساخت مدل‌های مؤثر برای فرایند در متغیرهای وابسته، از نظر تأثیر آن‌ها در متغیرهای وابسته استفاده می‌شود.^[۳۳] همان‌طور که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود، از میان مدل‌های Linear، Quadratic و Cubic، مدل Quadratic مطلوب‌ترین مدل برای توصیف حذف ماده‌ی رنگ صنعتی تارترازین با فرایند پلاسما تعیین شده



شکل ۵. اثر بازده انرژی در حذف رنگ در حالت بهینه (در غلظت اولیه‌ی ۱۴ میلی‌گرم در لیتر، توان ۶/۲۸ وات و $pH=4/1$).

در $pH=2/2$ برابر 10% ، ولی در $pH=9/4$ برابر $62/2$ بوده است که تقریباً کاهش ۳۸ درصدی راندمان را نشان می‌دهد (شکل ۴ب). تارکوا^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۹)، با فرایند پلاسما سرد نشان دادند با کاهش pH ، درصد حذف رنگ اورانژ G افزایش یافته است، به طوری که در $pH=10$ ، درصد حذف رنگ 71% و در $pH=3$ ، درصد حذف رنگ تقریباً 10% بوده است که pH بهینه، برابر ۳ تعیین شد.^[۳۴] ایکسین^{۱۵} و همکاران (۲۰۲۰)، نیز دریافتند که کاهش pH باعث افزایش راندمان حذف رنگ اسید بروم آمین می‌شود، به طوری که در مدت ۱۵ دقیقه تصفیه با پلاسما در $pH=10$ ، راندمان حذف $77/7\%$ به دست آمده است که این مقدار برای $pH=6/7$ و $pH=4$ به ترتیب برابر $98/7$ و $99/5$ درصد بوده است. تمامی نتایج ذکر شده، تأییدکننده‌ی این موضوع است که حذف رنگ در محیط اسیدی، راندمان بالایی دارد که دلیل آن را می‌توان در تولید رادیکال‌های هیدروکسیل (OH) و ازن (O_3) دانست، چرا که حضور رادیکال‌های مذکور برای حذف رنگ ضروری است. در شرایط اسیدی، درصد H بیشتری تولید می‌شود که منجر به تولید OH می‌شود. همچنین ازن در محلول اسیدی بسیار پایدارتر از محلول قلیایی است؛ به همین دلیل غلظت ازن در pH پایین‌تر، افزایش می‌یابد.^[۳۵]

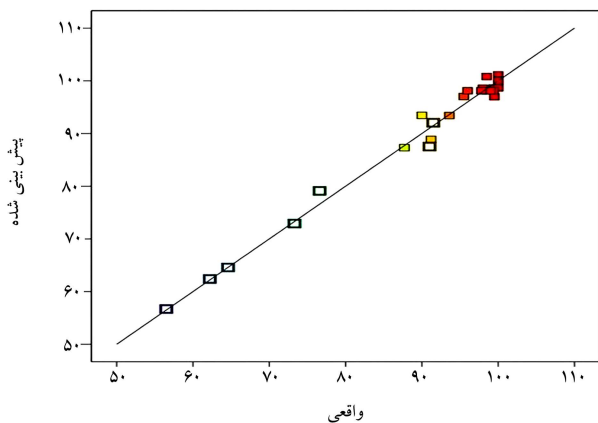
با افزایش زمان تصفیه، میزان حذف رنگ نیز افزایش یافته است. نتایج به دست آمده نشان داد که در شرایط یکسان در مدت زمان تصفیه‌ی 30 و 10 دقیقه به ترتیب درصد حذف رنگ، 100 و $64/6$ درصد بوده است. همچنین نتایج فرایند پلاسما در مطالعه‌ی مروپولیس^{۱۶} و همکاران (۲۰۲۱)، کارایی $39/8$ و $81/2$ درصدی در حذف رنگ از محلول آبی پس از 8 و 26 دقیقه را نشان داده است. کارایی فرایند پس از 20 دقیقه منجر به تخریب کامل رنگ شده است.^[۳۶] تغییرات ولتاژ در درصد حذف رنگ فرایند به عنوان متغیر دیگری ارزیابی شده است. بدین منظور تغییرات ولتاژ در دامنه‌ی $110-70$ ولت اعمال و نتایج آزمایش‌ها، اثر مستقیم ولتاژ در کارایی فرایند را ثابت کرده است. بنابراین، میزان حذف تارترازین با افزایش ولتاژ، افزایش یافته است. البته این یافته زمانی اعتبار بیشتری دارد که بتوان دمای محلول را ثابت نگه داشت؛ در غیر این صورت، با افزایش توان اعمالی از 70 به 110 ولت، بخشی از انرژی راکتور به گرما تبدیل و باعث تبخیر محلول در فرایند حذف رنگ می‌شود که در مطالعه‌ی حاضر، برای کنترل و ثابت کردن دما از دستگاه بن‌ماری استفاده شده است. با افزایش ولتاژ، الکترون‌های پرانرژی بیشتری تولید می‌شوند که منجر به تشکیل سریع گونه‌های فعال، مانند ازن و افزایش شدت تابش فرابنفش می‌شود، که هر دو عامل برای حذف رنگ مفید هستند.^[۳۷] طبق آزمایش‌های انجام شده در شرایط مشابه مشخص شد که در ولتاژهای 110 و 70 ولت، حذف رنگ به ترتیب برابر $99/5$ و $76/6$ درصد بوده است (شکل ۴د). سانگ^{۱۷} و همکاران (۲۰۲۱)، نیز اثر تخریبی پلاسما DBD در حذف رنگ صنعتی اورانژ G در محیط آبی را بررسی کردند و دریافتند که با اعمال ولتاژهای 60 ، 70 و 80 ولت (معادل $3/5$ و 4 کیلوولت) طی 10 دقیقه، راندمان تخریبی $39/9$ ، $64/7$ و $76/2$ درصد بوده است.^[۳۸] همچنین حافظ^{۱۸} و همکاران (۲۰۲۱)، حذف رنگ آزو RB-5^{۱۹} را با راکتور پلاسما غیرحرارتی بررسی کردند و دریافتند که با افزایش ولتاژ، حذف رنگ خود (۴۴٪) رسیده است؛ این در حالی بود که در ولتاژ $6/2$ کیلوولت با غلظت ازن 48 ppm به $32/8\%$ کاهش یافته است که این کاهش را ناشی از کاهش غلظت ازن در آن نقطه دانستند. با افزایش ولتاژ از $3/8$ به 5 کیلوولت، تشکیل ازن از 41 به 63 ppm افزایش یافته است. به بیانی دیگر، بیشینه‌ی حذف رنگ در ولتاژی اتفاق افتاده است که غلظت ازن در آن ولتاژ، بیشترین مقدار خود را داشته است.^[۳۹] یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در بازدهی، فاصله‌ی الکترود ولتاژ بالا تا

جدول ۳. نتایج راستی آزمایی مدل انتخاب شده توسط نرم افزار.

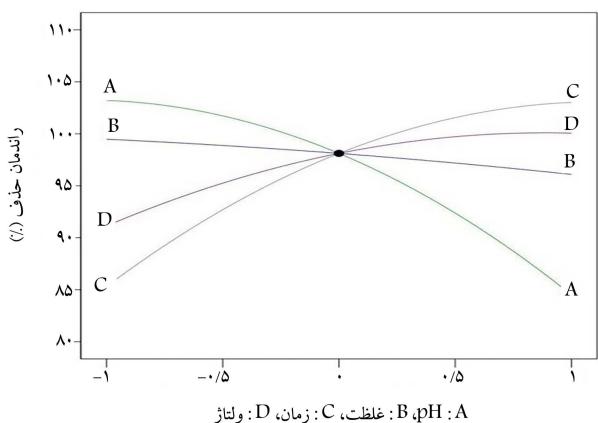
منبع	p-value		متوالی	R ²
	کمبود تناسب	تنظیم شده		
خطی	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۴۹۶۹
۲FI	۰/۲۰۵۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۵۲۰۱
مربعی	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۹۰۳۰
مکعبی	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۹۹۰۹

جدول ۴. نتایج مربوط به مدل مربعی.

انحراف معیار	۲/۲۰	R ²	۰/۹۸۵۴
میان	۹۱/۳۵	R ² تنظیم شده	۰/۹۶۹۶
ضریب تغییرات (%)	۲/۴۱	R ² پیش بینی	۰/۹۰۳۰
PRESS	۴۱۸/۹۷	دقت کافی	۲۷/۵۵۰۱



شکل ۶. مقایسه‌ی داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های واقعی برای درصد رنگ زدایی.



شکل ۷. تأثیر هر یک از پارامترها در درصد رنگ زدایی.

۳.۳. بهینه‌سازی فرایند

تعداد آزمایش‌ها برای حذف رنگ با توجه به شرایط و محدوده‌های ارائه شده در روش RSM تعیین و به عنوان خروجی دریافت شده است. سپس با اعمال محدودیت‌ها بر روی متغیرهای مستقل (غلظت، زمان و ...) و متغیر پاسخ (درصد حذف رنگ)، مطابق جدول ۶، متغیرهای بهینه از نرم‌افزار دریافت و به عنوان آزمایش‌های بهینه در نظر گرفته شده‌اند. حال برای اعتبارسنجی شرایط بهینه‌ی به دست آمده از ANOVA، آزمایش‌ها باید در همان شرایط بهینه انجام می‌شدند و از این میان، آزمایشی به عنوان بهینه‌ترین حالت پذیرفته می‌شد که راندمان آن کمترین اختلاف و درصد خطا را با راندمان آزمایش ارائه شده توسط ANOVA داشته باشد (شکل ۸). با انجام آزمایش‌ها مشخص شد که درصد خطای تمامی آزمایش‌ها کمتر از ۶٪ بوده و از میان آن‌ها، آزمایش با داده‌های (غلظت اولیه‌ی رنگ ۱۴ میلی‌گرم در لیتر، pH=۴/۱، ولتاژ اولیه‌ی ۸۶ ولت، زمان تصفیه‌ی ۱۸/۷ دقیقه و راندمان حذف ۹۹/۷۸٪)، کمترین درصد خطا (۲٪) را به خود اختصاص داده و به عنوان بهینه‌ترین آزمایش پذیرفته شده است. در نهایت، از مقدار خطاهای به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که مدل ایجاد شده برای تابش پلاسما با نتایج تجربی مطابقت خوبی داشته است.

۴.۳. تعیین سینتیک و نیمه‌ی عمر فرایند

طبق رابطه‌ی ۳ ارائه شده برای سینتیک و رابطه‌ی ۴ برای نیمه‌ی عمر در قسمت مواد و روش‌ها، به تحلیل هر یک از آن‌ها پرداخته شده است. همان‌طور که در جدول ۷

است که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. R^2 بالای ۰/۹۸، به همراه نزدیکی مقادیر برای R^2 و تنظیم R_{adj}^2 (اختلاف کمتر از ۰/۲) و معنادار نبودن LOF همگی دلالت بر این دارند که مدل Quadratic برازش خوبی داشته است. [۳۴] علاوه بر این، مطابق شکل ۶، از نزدیکی مقادیر پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار با مقادیر آزمایشگاهی برای درصد حذف رنگ، می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی توسط نرم‌افزار قادر است کارایی فرایند را تا حد بسیار بالایی به درستی پیش‌بینی کند که بیانگر خطای جزئی آزمایشگاهی است. [۳۵] معنی‌دار بودن مقادیر P برای مدل و پارامترهای دیگر در جدول ANOVA نیز تأیید بیشتر مدل برای فرایند پلاسماست. همچنین مقادیر P کمتر از ۰/۰۰۰۱ برای متغیرهای مستقل نشان می‌دهد که تأثیر متغیرهای مذکور در آزمایش بسیار مهم و با اهمیت بالاست. حال اگر مقادیر P کمتر از ۰/۰۵ باشد، بیانگر آثار قابل توجه ولی با اهمیت کمتر از حالت اول برای متغیرهای ذکر شده است، که در هر دو صورت شرایط آماری معنی‌داری را برای مدل نشان می‌دهد. با بالابودن مقادیر P از ۰/۰۵ برای متغیرهای مستقل، عدم تأثیر آن‌ها را می‌توان فهمید و لذا می‌توان آن‌ها را از معادله‌ی ۵ حذف کرد. [۳۵] در نهایت، مقدار P برای شاخص عدم تناسب باید بیشتر از ۰/۰۵ باشد تا مناسب بودن مدل تأیید شود که این شرط نیز با اختلاف کمی برآورده شده است (۰/۰۵ > ۰/۰۵۵). [۳۵]

طبق مقادیر F در جدول ۵ و معادله‌ی فرایند ذکر شده می‌توان استنباط کرد که pH اصلی‌ترین و مؤثرترین متغیر محسوب می‌شود؛ در حالی که غلظت رنگ، کمترین تأثیر را در حذف رنگ فرایند داشته است که این امر را می‌توان در شکل ۷ نیز مشاهده کرد، به طوری که شیب خط هر یک از پارامترها، رابطه‌ی مستقیم با درصد حذف رنگ دارد. در ضمن، علامت مثبت برای متغیرهای زمان و ولتاژ در معادله‌ی ۵، نشان‌دهنده‌ی تأثیر مثبت متغیر در فرایند است، در حالی که علامت منفی دو متغیر pH و غلظت، نشان‌دهنده‌ی تأثیر منفی متغیر است. این بدان معناست که با افزایش زمان ماند و ولتاژ، درصد حذف رنگ افزایش و با افزایش pH و غلظت رنگ، درصد حذف رنگ کاهش می‌یابد.

$$Y_{dye} = 98/12 - 9/35A - 1/69B + 8/86C + 4/47D + 6/35AC - 2/41CD - 4/25A^2 - 0/395C^2 - 2/52D^2 \quad (5)$$

جدول ۷. معادله‌ی واکنش و R^2 فرایند: الف) در ولتاژ ۸۰، ب) در ولتاژ ۱۰۰ ولت.

ثابت سرعت واکنش $K_t (min^{-1})$	نیمه‌ی عمر $t_{\frac{1}{2}} (min)$	R^2	
$K_{15} = 0/16203$	$t_{\frac{1}{2}}(15) = 4/28$		غلظت ۸
$K_{20} = 0/18444$	$t_{\frac{1}{2}}(20) = 3/76$	۰/۸۳۵۶	میلی‌گرم
$K_{25} = 0/33176$	$t_{\frac{1}{2}}(25) = 2/09$		در لیتر
$K_{15} = 0/13964$	$t_{\frac{1}{2}}(15) = 4/96$		غلظت ۱۶
$K_{20} = 0/12629$	$t_{\frac{1}{2}}(20) = 5/49$	۰/۹۹۰۹	میلی‌گرم
$K_{25} = 0/12404$	$t_{\frac{1}{2}}(25) = 5/59$		در لیتر
$K_{15} = 0/27998$	$t_{\frac{1}{2}}(15) = 2/48$		غلظت ۸
$K_{20} = 0/44936$	$t_{\frac{1}{2}}(20) = 1/54$	۰/۹۵۸۶	میلی‌گرم
$K_{25} = 0/45159$	$t_{\frac{1}{2}}(25) = 1/53$		در لیتر
$K_{15} = 0/26080$	$t_{\frac{1}{2}}(15) = 2/67$		غلظت ۱۶
$K_{20} = 0/48402$	$t_{\frac{1}{2}}(20) = 1/43$	۰/۹۴۱۷	میلی‌گرم
$K_{25} = 0/47932$	$t_{\frac{1}{2}}(25) = 1/45$		در لیتر

مشاهده می‌شود، سینتیک و نیمه‌ی عمر واکنش در سه زمان ۱۵، ۲۰ و ۲۵ دقیقه، غلظت ۸ و ۱۶ میلی‌گرم در لیتر و برای ولتاژهای ۸۰ و ۱۰۰ ولت به دست آمده‌اند. نتایج نشان داد که نمودار $\ln(C/C_0)$ در برابر مقیاس زمانی در کل محدوده‌ی غلظت و زمان مورد بررسی، خطی است. از ضریب همبستگی‌های R^2 که بیشتر از ۰/۹ به دست آمده‌اند، می‌توان دریافت که واکنش‌های تخریب پلاسمایی با مدل سینتیکی مرتبه‌ی اول، مطابقت بیشتری دارند که به وضوح در شکل ۹ مشاهده می‌شود. ضمناً، سرعت واکنش با اسیدی‌تر شدن محیط آبی از ۸/۵ به ۴ بیشتر شده است؛ در نتیجه، قدرت اکسیداسیون پلازما بیشتر و کارایی فرایند بیشتر شده است که با یافته‌های آزمایشگاهی به دست آمده مطابقت دارد. از محاسبه‌ی نیمه‌ی عمر برای تمامی آزمایش‌ها مشخص شد که آزمایش ۲۳ ام، با پارامترهای: غلظت اولیه‌ی ۱۲ میلی‌گرم در لیتر، $pH = 9/4$ ، ولتاژ اولیه‌ی ۹۰ ولت، زمان تصفیه‌ی ۲۰ دقیقه و راندمان حذف ۶۲/۲٪، بیشترین نیمه‌ی عمر (۱۴/۲۵ دقیقه) را داشته است. همچنین، آزمایش ۱۲ ام، با پارامترهای: غلظت اولیه‌ی ۱۲ میلی‌گرم در لیتر، $pH = 2/2$ ، ولتاژ اولیه‌ی ۹۰ ولت، زمان تصفیه‌ی ۲۰ دقیقه و راندمان حذف ۱۰۰٪، کمترین نیمه‌ی عمر (۱/۱۹ دقیقه) را داشته است. از داده‌های اخیر به این نکته‌ی مهم پی برده می‌شود که با ثابت بودن تمامی پارامترها به جز pH ، بیشترین نیمه‌ی عمر در بیشترین pH و کمترین نیمه‌ی عمر در کمترین pH اتفاق افتاده است که درستی نتیجه‌ی ANOVA مبنی بر بیشترین اثربخشی pH نسبت به پارامترهای دیگر در حذف رنگ تارترازین را تأیید می‌کند.

۴. نتیجه‌گیری

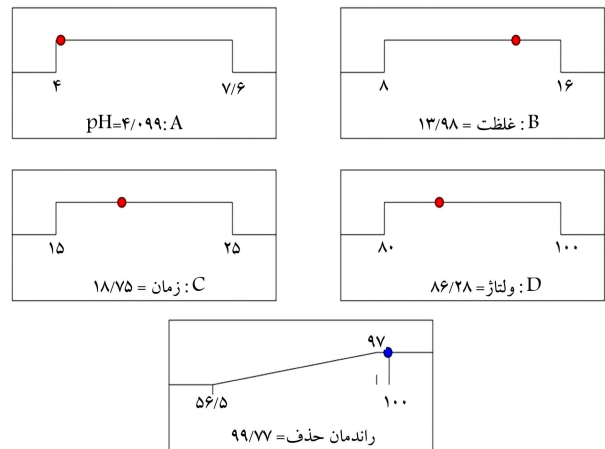
در پژوهش حاضر سعی شده است تا از قابلیت اکسیداسیون پلازما در حذف رنگ

جدول ۵. آنالیز واریانس برای مدل پیشنهادی.

منبع	جمع مربعات	DF	میانگین مربعات	مقدار - F	مقدار p
مدل	۴۲۵/۱۲	۱۴	۳۰۳/۹۴	۶۲/۵۵	< ۰/۰۰۰۱
A: pH	۱۶۳/۸۹	۱	۱۶۳/۸۹	۳۳۵/۸۲	< ۰/۰۰۰۱
B: غلظت رنگ	۵۳/۴۲	۱	۵۳/۴۲	۱۰/۹۹	۰/۰۰۵۶
C: زمان	۱۴۶/۷۷	۱	۱۴۶/۷۷	۳۰۱/۴۳	۰/۰۰۰۱
D: ولتاژ	۴۱۴/۷۴	۱	۴۱۴/۷۴	۸۵/۳۵	< ۰/۰۰۰۱
AB	۵/۱۰	۱	۵/۱۰	۱/۰۵	۰/۳۲۴۲
AC	۴۵۱/۶۱	۱	۴۵۱/۶۱	۹۲/۹۳	< ۰/۰۰۰۱
AD	۱۴/۹۷	۱	۱۴/۹۷	۳/۰۸	۰/۱۰۲۸
BC	۰/۰۴۳۷	۱	۰/۰۴۳۷	۰/۰۰۹۰	۰/۹۲۵۹
BD	۰/۳۵۱۵	۱	۰/۳۵۱۵	۰/۰۷۲۳	۰/۷۹۲۲
CD	۷۵/۵۴	۱	۷۵/۵۴	۱۵/۵۵	۰/۰۰۱۷
A ²	۴۸۶/۴۷	۱	۴۸۶/۴۷	۱۰۰/۱۱	< ۰/۰۰۰۱
B ²	۲/۹۱	۱	۲/۹۱	۰/۵۹۹۳	۰/۴۵۲۷
C ²	۴۲۰/۲۸	۱	۴۲۰/۲۸	۸۶/۴۹	< ۰/۰۰۰۱
D ²	۱۷۰/۲۵	۱	۱۷۰/۲۵	۳۵/۰۳	< ۰/۰۰۰۱
باقیمانده	۶۳/۱۷	۱۳	۸۶/۴		
کمبود تناسب	۵۵/۸۸	۸	۶/۹۹	۴/۷۹	۰/۰۵۰۵

جدول ۶. محدودیت‌های انتخاب شده برای بهینه‌سازی پارامترها توسط ANOVA.

متغیرها	معیارهای انتخاب متغیرها
pH	در محدوده
غلظت	در محدوده
زمان	در محدوده
ولتاژ	در محدوده
درصد حذف (رنگ‌زدایی)	بیشینه



شکل ۸. نقاط بهینه‌ی فرایند پلازما در حذف رنگ تارترازین.

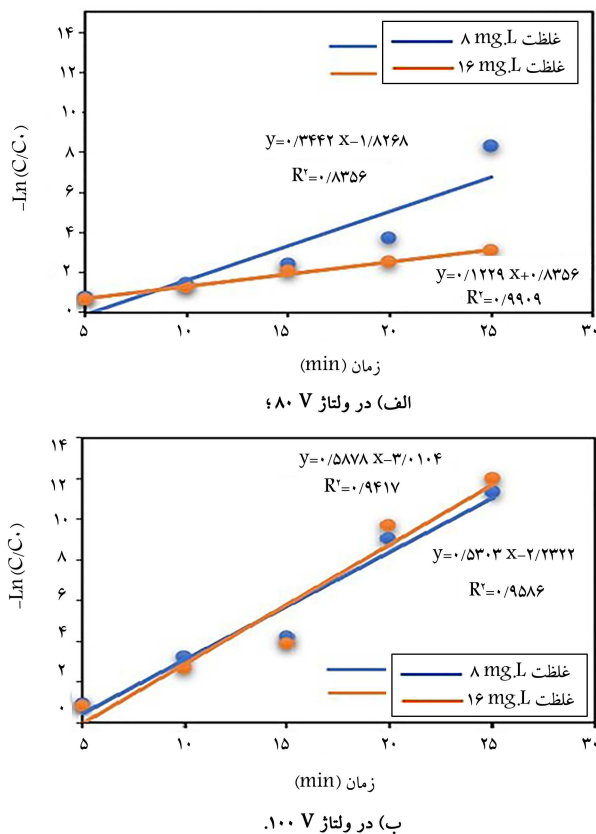
فرایند مطلوب است. براساس مقادیر به دست آمده F ، مهم ترین و مؤثرترین متغیر بهره برداری در فرایند، pH بوده است که با افزایش آن در محیط آبی، کارایی فرایند در حذف ماده رنگی کمتر می شود. این امر در نیمه عمر واکنش نیز مشاهده شده است؛ به طوری که در بیشترین pH، بیشترین نیمه عمر و در کمترین pH، کمترین نیمه عمر به دست آمده است. شرایط بهینه بهره برداری از رنگ زدایی با کمک فرایند پلاسما در غلظت رنگ ۱۴ میلی گرم در لیتر، pH = ۴/۱، ولتاژ ۸۶ ولت و زمان تصفیه ۱۸/۷ دقیقه تعیین شده است که منجر به حذف ۹۹/۷۸ درصدی رنگ شده است. همچنین، بازده انرژی حذف رنگ در ولتاژهای مختلف اندازه گیری شده و بیشترین بازده انرژی با ۱۵۰/۳ میلی گرم در کیلووات ساعت در آزمایش ۱۷ اتفاق افتاده است؛ در حالی که این مقدار برای کمترین (بهترین) نیمه عمر که در آزمایش ۱۲ ام رخ داده است، ۸۲/۲ میلی گرم در کیلووات ساعت بوده است. همچنین با انجام آزمایش ها مشخص شد که افزایش یا کاهش بیش از حد فاصله الکترود منجر به کاهش راندمان حذف رنگ می شود که فاصله بهینه الکترود ولتاژ بالا تا سطح محلول ۸ میلی متر به دست آمده است. نتایج اخیر نشان می دهند که پلاسما قدرت اکسیداسیون بالایی در حذف مواد آلی با قابلیت تجزیه پذیری کم بیولوژیکی در مدت زمان بسیار کمتر نسبت به دیگر روش های متداول اکسیداسیون پیشرفته دارد. لذا، روش پلاسما به طور بالقوه می تواند به سبب راهبری نسبتاً آسان و قدرت بالای اکسیداسیون مواد آلی، گزینه یی جایگزین برای روش های متداول تصفیه در نظر گرفته شود و کارایی و قدرت تجزیه کنندگی آن در مقیاس های نیمه صنعتی و برای آلاینده هایی با پایداری زیاد و مقاوم در برابر روش های مرسوم تصفیه ارزیابی شود.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه خوارزمی جهت حمایت مالی در انجام پروژه قدردانی می شود.

پانوشتها

1. Azo
2. Food and Drug Administration (FDA)
3. European Food Safety Authority (EFSA)
4. Advanced Oxidation Processes
5. Cold Atmospheric Plasma
6. Garcia
7. Abdel-Fattah
8. Dielectric Barrier Discharge (DBD)
9. Mohamed
10. Vasikaran
11. Response Surface Methodology (RSM)
12. Central Composite Design (CCD)
13. Liu
14. Tarkwa
15. Xin
16. Meropoulis
17. Sang



شکل ۹. نمودار شبه مرتبه اول برای تارترازین.

صنعتی تارترازین استفاده شود. بدین منظور، کارایی متغیرهای فرایند پلاسما روی میزان حذف با کمک مدل RSM بررسی شده است. خروجی مدل نشان می دهد مدل Quadratic به دلیل R^2 بالا (> 0.95) و نزدیکی R^2 و تنظیم R^2 برای توصیف

18. Hafeez
19. Reactive black-5
20. Zeghioud
21. Sano
22. Jiang

منابع (References)

1. Russo, A., Merlo, B. and Jacobo, S. "Adsorption and catalytic degradation of tartrazine in aqueous medium by a fe-modified zeolite", *Cleaner Engineering and Technology*, 4, p. 100211 (2021).
2. Al-Tohamy, R., Ali, S., Li, F. and et al. "A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety",

- Ecotoxicology and Environmental Safety*, **231**, p. 113160 (2022).
- Kaya, S.I., Cetinkaya, A. and Ozkan, S.A. "Latest advances on the nanomaterials-based electrochemical analysis of azo toxic dyes sunset yellow and tartrazine in food samples", *Food and Chemical Toxicology*, **156**, p. 112524 (2021).
 - Rahmati, R., Nayebi, B. and Ayati, B. "Investigating the effect of hydrogen peroxide as an electron acceptor in increasing the capability of slurry photocatalytic process in dye removal", *Water Science and Technology*, **83**(10), pp. 2414-2423 (2021).
 - Paz, A. and et al "Biological treatment of model dyes and textile wastewaters", *Chemosphere*, **181**, pp. 168-177 (2017).
 - Rodenburg, L.A., Hermanson, M.R. and Sumner, A.L. "Effect of membrane filtration on the fate of polychlorinated biphenyls in wastewater treatment", *Chemosphere*, **287**, p. 132335 (2022).
 - Kim, S. and Park, C. "Potential of ceramic ultrafiltration membranes for the treatment of anionic surfactants in laundry wastewater for greywater reuse", *Journal of Water Process Engineering*, **44**, p. 102373 (2021).
 - Zhang, X. "Selective separation membranes for fractionating organics and salts for industrial wastewater treatment: Design strategies and process assessment", *Journal of Membrane Science*, **643**, p. 120052 (2022).
 - Munonde, T.S., September's, N.P., Mpupa, A. and et al. "Two agitation routes for the adsorption of reactive red 120 dye on NiFe LDH/AC nanosheets from wastewater and river water", *Applied Clay Science*, **219**, p. 106438 (2022).
 - Samal, K. and Trivedi, S. "A statistical and kinetic approach to develop a floating bed for the treatment of wastewater", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **8**(5), p. 104102 (2020).
 - Delnavaz, M. and Bahrami, D. "Application of electrochemical coagulation process with iron and aluminum modified by zinc oxide nanoparticles by cyclic voltammetry in removal of reactive blue 19 dye", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **37**(1.2), pp. 87-94 (2021).
 - Tian, K., Hu, L., Li, L. and et al. "Recent advances in persulfate-based advanced oxidation processes for organic wastewater treatment", *Chinese Chemical Letters* (2021).
 - Mohamed, W.A., Fahmy, A., Helal, A. and et al. "Degradation of local brilliant blue R dye in presence of polyvinylidene fluoride/MWCNTs/TiO₂ as photocatalysts and plasma discharge", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **10**(1), p. 106854 (2022).
 - Feng, L., Liu, J., Guo, Zh. and et al. "Reactive black 5 dyeing wastewater treatment by electrolysis-Ce (IV) electrochemical oxidation technology: Influencing factors, synergy and enhancement mechanisms", *Separation and Purification Technology*, **285**, p. 120314 (2022).
 - Petrovic, M., Rancev, S., Velinov, N. and et al. "Triclinic ZnMoO₄ catalyst for atmospheric pressure non-thermal pulsating corona plasma degradation of reactive dye; role of the catalyst in plasma degradation process", *Separation and Purification Technology*, **269**, p. 118748 (2021).
 - Ayati, B. "Study of reactive blue 171 dye degradation in hybrid system of UV/H₂O₂ & SBAR", *Iranian Journal of Health and Environment*, **6**(3), pp. 393-406 (2013).
 - Garcia, M.C., Mora, M., Esquivel, D. and et al. "Microwave atmospheric pressure plasma jets for wastewater treatment: Degradation of methylene blue as model dye", *Chemosphere*, **180**, pp. 239-246 (2017).
 - Abdel-Fattah, E. "Atmospheric pressure helium plasma jet and its applications to methylene blue degradation", *Journal of Electrostatics*, **101**, p. 103360 (2019).
 - Rahimpour, M., Taghvaei, H., Zafarnak, S. and et al. "Post-discharge DBD plasma treatment for degradation of organic dye in water: A comparison with different plasma operation methods", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **7**(4), p. 103220 (2019).
 - Vasikaran, E.M., Murugesan, P., Moses, J.A. and et al. "Performance of non-thermal plasma reactor for removal of organic and inorganic chemical residues in aqueous media", *Journal of Electrostatics*, **115**, p. 103671 (2022).
 - Tran, M.L., Fu, Ch.-Ch., Wei, T.-H. and et al. "Surface coating of titania and graphene oxide onto plasma-activated polymer membranes as efficient photocatalysts for organics removal from water", *Journal of Water Process Engineering*, **37**, p. 101488 (2020).
 - Iervolino, G., Vaiano, V. and Palma, V. "Enhanced azo dye removal in aqueous solution by H₂O₂ assisted non-thermal plasma technology", *Environmental Technology & Innovation*, **19**, p. 100969 (2020).
 - Liu, X., Li, W., Hu, R. and et al. "Synergistic degradation of acid orange 7 dye by using non-thermal plasma and g-C₃N₄/TiO₂: Performance, degradation pathways and catalytic mechanism", *Chemosphere*, **249**, p. 126093 (2020).
 - Tarkwa, J.-B., Acayanka, E., Jiang, B. and et al. "Highly efficient degradation of azo dye Orange G using laterite soil as catalyst under irradiation of non-thermal plasma", *Applied Catalysis B: Environmental*, **246**, pp. 211-220 (2019).
 - Xin, Y.-Y., Zhou, L., Ma, K.-K. and et al. "Removal of bromoamine acid in dye wastewater by gas-liquid plasma: The role of ozone and hydroxyl radical", *Journal of Water Process Engineering*, **37**, p. 101457 (2020).
 - Meropoulos, S., Rassias, G., Bekiari, V. and et al. "Structure-degradation efficiency studies in the remediation of aqueous solutions of dyes using nanosecond-pulsed DBD plasma", *Separation and Purification Technology*, **274**, p. 119031 (2021).
 - Wang, T., Qu, G., Ren, J. and et al. "Organic acids enhanced decoloration of azo dye in gas phase surface discharge plasma system", *Journal of Hazardous Materials*, **302**, pp. 65-71 (2016).
 - Sang, W., Lu, W., Mei, L. and et al. "Research on different oxidants synergy with dielectric barrier discharge plasma in degradation of orange G: Efficiency and mechanism", *Separation and Purification Technology*, **277**, p. 119473 (2021).
 - Hafeez, A., Javed, F., Fazal, T. and et al. "Intensification of ozone generation and degradation of azo dye in non-thermal hybrid corona-DBD plasma micro-reactor",

- Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, **159**, p. 108205 (2021).
30. Zeghioud, H., Nguyen-Tri, P., Khezami, L. and et al. "Review on discharge plasma for water treatment: Mechanism, reactor geometries, active species and combined processes", *Journal of Water Process Engineering*, **38**, p. 101664 (2020).
 31. Sano, N., Kawashima, T., Fujikawa, J. and et al. "Decomposition of organic compounds in water by direct contact of gas corona discharge: Influence of discharge conditions", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **41**(24), pp. 5906-5911 (2002).
 32. Jiang, B., Zheng, J., Qiu, Sh. and et al. "Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation", *Chemical Engineering Journal*, **236**, pp. 348-368 (2014).
 33. Singh, B. and Kumar, P. "Pre-treatment of petroleum refinery wastewater by coagulation and flocculation using mixed coagulant: Optimization of process parameters using response surface methodology (RSM)", *Journal of Water Process Engineering*, **36**, p. 101317 (2020).
 34. Ahmadi, E., Shokri, B., Mesdaghinia, A. and et al. "Synergistic effects of $\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ and $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ on the performance of a non-thermal plasma reactor as a novel catalytic oxidation process for dimethyl phthalate degradation", *Separation and Purification Technology*, **250**, p. 117185 (2020).
 35. Guo, H., Jiang, N., Wang, H. and et al. "Degradation of flumequine in water by pulsed discharge plasma coupled with reduced graphene oxide/TiO₂ nanocomposites", *Separation and Purification Technology*, **218**, pp. 206-216 (2019).