JEHE Alborz University of Medical Sciences Journal of Environmental Health Engineering , 2026; 13(4):367-392 Original Article

Optimizing Atmospheric Cold Plasma-Based Advanced Oxidation for the Degradation of Polypropylene Microplastics Using Response Surface Methodology

Received: 20 November 2025, Accepted: 17 February 2026

Ali Seyedi[1], Roya Mafigholami[2*], Shahroz Saviz[3], Amir Hossein Sari[3]

[1] *Department of Environmental Science and Engineering, Wt.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran*
[2] *Department of Environment, Wt.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran*
[3] *Department of Physics, Faculty of Science and Converging Technologies, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran*

***Corresponding Author:**
r.mafigholami@wtiau.ac.ir

How to Cite This Article:

Seyedi A, Mafigholami R, Saviz S, Sari AH. Optimizing Atmospheric Cold Plasma-Based Advanced Oxidation for the Degradation of Polypropylene Microplastics Using Response Surface Methodology. Journal of EnvironmentalHealth Engineering. 2026;13(4):367-92.

DOI:
10.66224/jehe.13.4.367

ABSTRACT

Background: The presence of microplastics in the environment poses a significant threat to human health. This study aimed to evaluate the performance of an atmospheric cold plasma (ACP) process for the degradation of polypropylene microplastics in aqueous solutions.

Materials and Methods: In this laboratory-scale experimental study, key operational parameters—including reaction time (30–60 min), applied voltage (20–40 kV), airflow rate (10–20 L/min), pH (4–8), and initial microplastic concentration (500–1000 particles/L) were optimized using a Central Composite Design. Microplastic quantification was performed via microscopic counting. Additional analyses included kinetic modeling, assessment of interfering ions, radical scavenger experiments, energy consumption evaluation, and measurement of COD and TOC removal under optimal conditions.

Results: The quadratic model derived from CCD was highly significant ($p < 0.0001$) and demonstrated that increasing reaction time and applied voltage significantly enhanced removal efficiency. In contrast, higher initial concentrations, excessive airflow rates, and extreme pH conditions negatively affected process performance. The maximum removal efficiency was achieved under optimal conditions, with an applied voltage of 25 kV and an airflow rate of 14 L/min. Neutral pH provided greater stability of reactive species. Kinetic analysis indicated that degradation followed a first-order kinetic model. Radical scavenging experiments confirmed that hydroxyl radicals were the dominant reactive species responsible for degradation. The presence of inorganic ions exhibited both inhibitory and promoting effects depending on their type and concentration. Specific energy consumption analysis demonstrated acceptable energy efficiency of the process.

Conclusion: The atmospheric cold plasma process achieved a removal efficiency of 73.2% under optimized conditions and can be considered a promising and energy-efficient approach for the removal of polypropylene microplastics from aqueous environments.

Keywords: Atmospheric cold plasma process, Microplastics, Polypropylene, Optimization, Central Composite Design, Aqueous Environments

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

Copyright © 2026 The Authors.
Published by Alborz University of Medical Sciences
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International License. (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).Non-commercial uses of the work are permitted,provided the original work is properly cited.

JEHE مجله مهندسی بهداشت محیط، دوره ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، صفحات ۳۶۷ تا ۳۹۲ مقاله پژوهشی
Alborz University of Medical Sciences

بهینه سازی فناوری اکسیداسیون پیشرفته پلاسمای سرد اتمسفری در تخریب میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن با مدل آماری رویه پاسخ

تاریخ دریافت : ۱۴۰۴/۰۸/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۸

علی سیدی[۱]، رویا مافی غلامی[۲]*، شهروز ساویز[۳]، امیرحسین ساری[۳]

[۱] گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران

[۲] گروه محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران

[۳] گروه فیزیک، دانشکده علوم و فناوری های همگرا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

***پست الکترونیکی نویسنده مسئول:**
r.mafigholami@wtiau.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله:

Seyedi A, Mafigholami R, Saviz S, Sari AH. Optimizing Atmospheric Cold Plasma-Based Advanced Oxidation for the Degradation of Polypropylene Microplastics Using Response Surface Methodology. Journal of EnvironmentalHealth Engineering. 2026;13(4):367-92.

DOI:
10.66224/jehe.13.4.367

چکیده

زمینه و هدف: حضور میکروپلاستیک‌ها در محیط زیست می‌تواند تهدیدی جدی برای سلامت انسان‌ها به شمار آید. این پژوهش به بررسی عملکرد فرایند پلاسمای سرد اتمسفری در تجزیه میکروپلاستیک‌های پلی‌پروپیلن در محلول‌های آبی اختصاص یافته است.

مواد و روش ها: در این مطالعه، متغیرهای زمان واکنش (۳۰-۶۰ دقیقه)، ولتاژ ورودی (۲۰-۴۰ کیلوولت)، دبی هوا (۱۰-۲۰ لیتر در دقیقه)، pH (۴-۸) و غلظت اولیه میکروپلاستیک (۵۰۰-۱۰۰۰ عدد در لیتر) با استفاده از طراحی ترکیبی مرکزی بهینه‌سازی شدند. شناسایی مقدار میکروپلاستیک ها بر اساس شمارش میکروسکوپی انجام شد. مطالعات تکمیلی شامل تعیین سینتیک واکنش، تاثیر عوامل ماخله گر یونی، تاثیر رباینده های رادیکال، انرژی مصرفی و کاهش COD و TOC در شرایط بهینه بودند.

یافته ها: مدل آماری درجه دوم (Quadratic) حاصل از طراحی ترکیبی مرکزی از دقت بالایی برخوردار بود و تحلیل آماری ($p<۰/۰۰۰۱$) نشان داد که افزایش زمان و ولتاژ تأثیر مثبت قابل توجهی بر راندمان حذف داشت، درحالی که افزایش بیش از حد غلظت اولیه، نرخ جریان هوا و تغییرات شدید pH باعث کاهش کارایی می‌شدند. بیشترین بازدهی در شرایط بهینه به ۷۳/۲ درصد رسید. ولتاژ بهینه ۲۵ کیلوولت و نرخ جریان بهینه ۱۴ لیتر بر دقیقه تعیین شد. pH خنثی بیشترین پایداری گونه‌های رادیکال فعال را فراهم می‌کرد. سینتیک واکنش از نوع درجه اول بود و آزمایش‌های مهارکننده رادیکال نشان داد که رادیکال‌های هیدروکسیل بیشترین نقش در تخریب را دارند. حضور یون‌های می‌تواند فرآیند را به نوعی تضعیف یا تقویت کند. شاخص‌های مصرف انرژی ویژه نشان‌دهنده بهره‌وری بالای این فناوری برای تصفیه آب‌های آلوده به میکروپلاستیک‌ها است.

نتیجه گیری: در مجموع، پلاسمای سرد اتمسفری با راندمان حذف ۷۳/۲ درصد در شرایط بهینه، به‌عنوان روشی مؤثر و دارای بهره‌وری انرژی قابل قبول برای حذف میکروپلاستیک‌های پلی‌پروپیلن از آب معرفی می‌شود.

واژه های کلیدی: فرایند پلاسمای سرد اتمسفری، میکروپلاستیک، پلی پروپیلن، بهینه سازی، طراحی ترکیبی مرکزی، محیط های آبی

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

مقدمه

آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از ترکیبات آلی نوظهور به‌عنوان یکی از نگرانی‌های روبه‌گسترش علمی و مقرراتی مطرح است. به‌دلیل ساختارهای شیمیایی پیچیده و مقاومت این ترکیبات در برابر تجزیه، آن‌ها چالشی جدی برای سیستم های تصفیه فاضلاب ایجاد کرده و خطرات بلندمدتی را برای پایداری اکوسیستم‌ها به همراه دارند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که حتی در غلظت‌های پایین، آلاینده‌های آلی نوظهور می‌توانند در عملکرد سیستم‌های هورمونی اختلال ایجاد کرده، فرآیندهای تولیدمثل را بر هم زنند و پویایی جوامع میکروبی را تغییر دهند. مقابله با این مسئله مستلزم پژوهش‌های میان‌رشته‌ای برای توسعه فناوری‌های نوین حذف این ترکیبات و ایجاد چارچوب‌های قانونی سخت‌گیرانه‌تر به‌منظور حفاظت از سلامت محیط‌زیست و انسان است [۱، ۲].

میکروپلاستیک‌ها (MPs) پلیمرهای مصنوعی بسیار ریزی هستند که معمولاً قطری کمتر از ۵ میلی‌متر دارند و به‌عنوان آلاینده‌هایی فراگیر در اکوسیستم‌های امروزی شناخته می‌شوند. این ذرات می‌توانند از تجزیه قطعات بزرگ‌تر پلاستیکی منشأ بگیرند یا مستقیماً در قالب ذرات ریز در صنایع و محصولات بهداشتی و آرایشی مورد استفاده قرار گیرند. به‌دلیل پایداری شیمیایی بالا، تجزیه‌پذیری پایین و توانایی برهم‌کنش با سایر آلاینده‌ها، میکروپلاستیک‌ها برای مدت طولانی در محیط‌های آبی و خاکی باقی می‌مانند [۳]. این ذرات در اشکال مختلفی مانند الیاف، قطعات و دانه‌ها ظاهر می‌شوند و از پلیمرهایی نظیر پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، پلی‌استایرن و پلی‌وینیل کلراید تشکیل شده‌اند. انتشار گسترده میکروپلاستیک‌ها، با تضعیف سلامت و عملکرد تولیدمثلی حیات‌وحش، یک تهدید جدی برای تمامیت اکولوژیکی به‌شمار می‌رود. افزون بر این، ورود آن‌ها به بدن انسان از طریق مصرف آب و غذای آلوده یا استنشاق، نگرانی‌های جدی در مورد اثرات فیزیولوژیکی و سم‌شناختی احتمالی ایجاد کرده است. در مجموع، میکروپلاستیک‌ها یک خطر زیست‌محیطی روبه‌رشد محسوب می‌شوند که نیازمند توجه فوری علمی و تدوین راهبردهای کاهش و کنترل مؤثر هستند [۴].

پلی‌پروپیلن (PP، با فرمول شیمیایی:$(C_3H_6)_n$) یک پلیمر ترموپلاستیک است که به‌دلیل چگالی پایین، مقاومت شیمیایی بالا، پایداری حرارتی و قابلیت فرآوری متنوع، کاربرد گسترده‌ای دارد [۵]. این ماده به‌طور جهانی و در مقادیر زیاد تولید می‌شود و عمدتاً در تولید مواد بسته‌بندی، قطعات خودرویی، منسوجات و کالاهای مصرفی به‌کار می‌رود [۶]. دوام بالای پلی‌پروپیلن و مقاومت آن در برابر تجزیه بیولوژیکی باعث می‌شود که این ماده برای مدت طولانی در محیط باقی بماند و در نهایت به میکروپلاستیک‌ها تجزیه شود. این ذرات میکروپلاستیکی می‌توانند آلاینده‌های شیمیایی را جذب کرده، وارد زنجیره‌های غذایی آبی و خاکی شوند و خطراتی برای اکوسیستم و سلامت انسان ایجاد کنند، و بدین ترتیب پلی‌پروپیلن به‌عنوان یکی از منابع اصلی آلودگی پلاستیکی شناخته می‌شود [۷]. پرداختن به آلودگی میکروپلاستیک‌ها در آب یک اولویت زیست‌محیطی است. این ذرات پایدار می‌توانند مواد سمی را جذب کنند، در موجودات آبزی تجمع یابند و در نهایت از طریق زنجیره غذایی خطراتی برای سلامت انسان ایجاد کنند. بنابراین، حذف مؤثر میکروپلاستیک‌ها از منابع آبی برای حفاظت از عملکرد اکوسیستم و تضمین ایمنی و پایداری آن ها ضروری است [۸].

تاکنون، فرایندهای متنوعی برای حذف میکروپلاستیک‌ها از منابع آبی مورد بررسی قرار گرفته‌اند، از جمله روش‌های جداسازی فیزیکی مانند فیلتراسیون و ته‌نشینی، روش‌های شیمیایی نظیر لخته‌سازی و اکسیداسیون پیشرفته، و روش‌های بیولوژیکی شامل تجزیه میکروبی [۹، ۱۰]. با وجود اثربخشی این روش‌ها، محدودیت‌هایی همچون کارایی پایین در حذف ذرات، پیچیدگی عملیاتی و احتمال تولید آلاینده‌های ثانویه وجود دارد [۱۱]. بنابراین، فناوری‌های

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

نوآورانه‌ای برای رفع این کاستی‌ها پدید آمده‌اند که ویژگی‌هایی مانند انتخاب‌پذیری بالاتر، سازگاری با محیط‌زیست و انعطاف‌پذیری عملیاتی ارائه می‌کنند [۸]. یکی از این روش‌های پیشرفته، تصفیه با پلاسمای سرد است که با تولید گونه‌های واکنشی اکسیژن و نیتروژن، الکترون‌های پرانرژی و فوتون‌های UV، تجزیه پلیمرهای میکروپلاستیک را تسهیل می‌کند [۱۲]. ویژگی غیرحرارتی، توانایی تجزیه سریع و سازگاری با ماتریس‌های آبی مختلف، پلاسمای سرد را به یک روش بسیار امیدوارکننده برای حذف مؤثر میکروپلاستیک تبدیل کرده و ایمنی و پایداری منابع آب را افزایش می‌دهد [۱۳]. در سال‌های اخیر، فناوری پلاسمای سرد به‌عنوان یک روش نوین اکسیداسیون پیشرفته برای تصفیه آب و حذف آلاینده‌های محیط‌زیستی توجه قابل‌توجهی یافته است و در مطالعات اخیر نشان داده شده است که این فرایند می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد مؤثر برای کاهش آلودگی میکروپلاستیک‌ها در آب مورد استفاده قرار گیرد [۱۳].

طراحی آزمایش، ابزاری ضروری در مطالعات بهینه‌سازی فرایند است، زیرا امکان بررسی سیستماتیک اثرات چندین عامل و تعاملات آن‌ها بر متغیر پاسخ را فراهم می‌کند. استفاده از این طراحی تضمین می‌کند که داده‌های آزمایشی از نظر آماری معتبر، قابل تکرار و کافی برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی باشند، در حالی که تعداد آزمایش‌ها و هزینه‌های مرتبط کاهش می‌یابد [۱۴]. طراحی ترکیبی مرکزی، یک شکل محبوب از روش سطح پاسخ، شامل نقاط عاملی، نقاط محوری و نقاط مرکزی است تا مدل درجه دوم (دو جمله‌ای) را برازش دهد و مزایایی مانند برآورد دقیق اثرات خطی، تعاملی و درجه دوم، انعطاف‌پذیری در مدیریت چندین متغیر مستقل و توانایی شناسایی شرایط بهینه عملیاتی به‌صورت کارآمد ارائه می‌کند. این طرح به‌ویژه برای مطالعات بهینه‌سازی فرایندهای پیچیده مانند واکنش‌های شیمیایی، جذب یا روش‌های پیشرفته تصفیه فاضلاب مناسب است [۱۵].

با وجود توجه گسترده به آلودگی میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی، مطالعات کمی به اثرات میکروپلاستیک ها بر محیط زیست و راهکارهای تخریب مؤثر آن‌ها پرداخته‌اند. تکنیک‌های حذف متداول اغلب قادر به تجزیه کامل پلیمرهای پایدار مانند پلی‌پروپیلن نیستند و آلاینده‌های باقی‌مانده را در سیستم های آبی برجای می‌گذارند. در این زمینه، مطالعه حاضر رویکردی نوین با استفاده از فناوری پلاسمای سرد پیشنهاد می‌دهد تا میکروپلاستیک پروپیلن را به‌طور مؤثر تجزیه کند و با بهره‌گیری از گونه‌های واکنشی و الکترون‌های پرانرژی، روند شکست پلیمرها را تسریع نماید. این پژوهش به شکاف مهمی در دانش مربوط به تخریب میکروپلاستیک‌ها پاسخ می‌دهد و پتانسیل پلاسمای سرد را به‌عنوان یک روش پیشرفته تصفیه برجسته می‌سازد. هدف اصلی این مطالعه بهینه‌سازی فرایند پلاسمای سرد برای تجزیه مؤثر میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن در محیط‌های آبی است تا کیفیت آب ارتقاء یافته و حفاظت از محیط‌زیست تقویت شود.

مواد و روش ها

مواد شیمیایی و تجهیزات

مواد شیمیایی و حلال‌های مورد استفاده در این پژوهش از تأمین‌کنندگان معتبر بین‌المللی مانند شرکت‌های مرک آلمان، سیگما-آلدریچ و سایر تولیدکنندگان معتبر تهیه شدند. این مواد شامل پلی‌پروپیلن با چگالی ۰/۸۹۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و شماره CAS 9003-07-06 و خلوص ۱۰۰ درصد، سدیم هیدروکسید (NaOH) با شماره CAS 1310-73-2 و خلوص ۹۸ درصد، اسید سولفوریک (H_2SO_4) با شماره CAS 7664-93-9 و خلوص ۹۸ درصد، اسید کلریدریک (HCl) با شماره CAS 7647-01-0 و خلوص ۳۷ درصد، اتانول (C_2H_5OH) با شماره CAS 64-17-5 و خلوص ۹۷ درصد ، ترشیوبوتانول (TBA, $(CH_3)_3COH$) با شماره CAS 75-65-0 ، پارا-بنزوکینون (BQ, $C_6H_4O_2$) با شماره CAS 106-51-4 و خلوص ۱۰۰ درصد، سدیم آزید (NaN_3) با شماره

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

CAS 26628-22-8 و خلوص ۹۹/۸ درصد، نیتروبنزن ($C_6H_5NO_2$)با شماره CAS 98-95-3 و خلوص ۹۸ درصد، سدیم کلرید (NaCl) با شماره CAS 7647-14-5 و خلوص ۹۹ درصد، پتاسیم کلرید (KCl) با شماره CAS 7440-09-7 و خلوص ۹۹/۸ درصد، سدیم سولفات (Na_2SO_4) با شماره CAS 7757-82-6 و خلوص حداقل ۹۹ درصد و منیزیم کلرید ($MgCl_2$) با شماره CAS 7786-30-3 و خلوص ۹۹ درصد هستند. راکتور پلاسمای سرد اتمسفری مورد استفاده در این پژوهش از نوع تخلیه سد دی‌الکتریک با پیکربندی هم‌محور بود. منبع تغذیه ولتاژ بالا با قابلیت تولید ولتاژ متناوب تا ۴۰ کیلوولت پیک به پیک و فرکانس کاری ۲۰ کیلوهرتز به راکتور متصل بود. الکترود داخلی از جنس استیل ضدزنگ و الکترود خارجی از جنس آلومینیوم بوده و از لوله کوارتزی با ضخامت ۲ میلی‌متر به‌عنوان مانع دی‌الکتریک استفاده شد. فاصله مؤثر بین الکترودها ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد. هوای فشرده اتمسفری به‌عنوان گاز فرایندی مورد استفاده قرار گرفت و نرخ جریان آن توسط فلومتر دیجیتال (دقت ۰/۱ لیتر در دقیقه) در بازه ۱۰ تا ۲۰ لیتر بر دقیقه تنظیم شد. اندازه‌گیری pH با استفاده از pH متر دیجیتال (با دقت ۰/۰۱) انجام گرفت. ولتاژ خروجی و شکل موج توسط اسیلوسکوپ دیجیتال به همراه پروب ولتاژ بالا پایش شد. به‌منظور تعیین غلظت میکروپلاستیک‌ها، از روش شمارش ذرات با استفاده از میکروسکوپ نوری (Olympus CX23)با بزرگنمایی ۴۰ برابر و ۱۰۰ برابر استفاده گردید. نمونه‌ها پس از فیلتراسیون از طریق فیلتر غشایی با قطر منافذ ۰/۴۵ میکرومتر، بر روی لام شیشه‌ای منتقل شده و تعداد ذرات در چند میدان دید تصادفی شمارش و میانگین‌گیری شد. تمامی آزمایش‌ها در دمای محیط (۲±۲۵ درجه سانتی‌گراد) انجام شدند [۱۶].

آماده سازی میکروپلاستیک پلی پیروپیلن

ذرات میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن با اندازه عمدتاً بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ میکرومتر، برای آماده‌سازی آزمایشگاهی ابتدا به مدت ۴۸ ساعت در آب دی‌یونیزه همراه با محلول ۱۰ درصد اسید کلریدریک (۱ مولار) به نسبت جامد به مایع برابر با ۱:۲۰ گرم در لیتر تیمار شدند. این مرحله با هدف حذف ناخالصی‌های سطحی، فلزات و یون‌های کاتیونی احتمالی صورت گرفت تا سطح ذرات برای فرآیندهای بعدی پاک و فعال شود. پس از تیمار اسیدی، نمونه‌ها چندین بار با اتانول و سپس با آب مقطر شست‌وشو داده شدند تا باقی‌مانده‌های اسید و آلاینده‌های سطحی به‌طور کامل حذف گردند و خلوص شیمیایی ذرات به حداکثر برسد. سپس، ذرات تمیز شده در دمای ۴۵–۵۰ درجه سانتی‌گراد در انکوباتور خشک شدند تا رطوبت سطحی حذف شده و ثبات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها برای مراحل آزمایشگاهی بعدی تضمین شود. در نهایت، پودر خشک شده از الک استاندارد با مش ۱۰۰ عبور داده شد تا اندازه ذرات یکنواخت شود و نمونه‌ها برای استفاده در آزمایش‌های بعدی آماده گردید [۱۷].

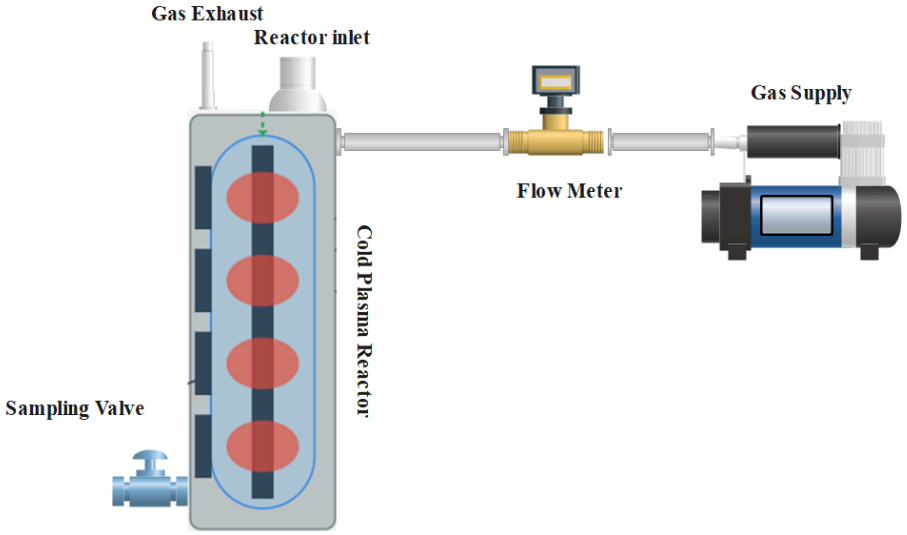
پایلوت فرایند پلاسمای سرد اتمسفری

پایلوت استفاده شده در این مطالعه شامل یک راکتور مجهز به تخلیه با مانع دی‌الکتریک استوانه‌ای شکل با ظرفیت مفید یک لیتر بود که به صورت نیمه‌منقطع عملیاتی شد (شکل ۱). الکترودهای داخلی در امتداد محور طولی لوله و الکترود خارجی در اطراف سطح بیرونی لوله کوارتزی پیچیده شدند، به‌گونه‌ای که این طراحی منجر به توزیع یکنواخت میدان الکتریکی و ایجاد پلاسما پایدار در کل حجم راکتور می‌شود. مانع دی‌الکتریک کوارتز نقش جلوگیری از تشکیل قوس‌های الکتریکی ناخواسته را ایفا کرده و در عین حال انتقال انرژی به گونه مؤثر به محیط پلاسما را حفظ می‌کند، که برای افزایش نرخ واکنش‌های تخریب میکروپلاستیک‌ها حیاتی است. سیستم تولید پلاسما بر پایه یک مدار الکتریکی پیشرفته طراحی شده است که از یک مولد شکل موج متصل به تقویت‌کننده ولتاژ بالا تشکیل شده و قادر به تولید ولتاژ متناوب تا ۵۰ کیلوولت در فرکانس‌های ۱ تا ۵۰ کیلوهرتز می‌باشد. این ترکیب امکان کنترل دقیق شدت میدان الکتریکی، چگالی گونه‌های واکنشی و نرخ تولید

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

الکترون‌های پرانرژی را فراهم می‌کند. حضور این گونه‌های فعال، از جمله اکسیژن و نیتروژن واکنش‌پذیر و فوتون‌های UV، موجب تجزیه کارآمد میکروپلاستیک پلی پروپیلن شده و عملکرد راکتور را در حذف آلاینده‌های شیمیایی و دارویی از محیط آبی بهینه می‌سازد.



شکل ۱. تصویر شماتیک از پایلوت فرایند پلاسمای سرد اتمسفری

طراحی آزمایش با طراحی ترکیبی مرکزی

برای بهینه‌سازی فرایند پلاسمای سرد اتمسفری در تخریب میکروپلاستیک‌های پلی‌پروپیلن از طراحی ترکیبی مرکزی توسط نرم افزار Design Expert ورژن ۱۰ استفاده شد. بازه‌های متغیرهای فرایند در جدول ۱ ارائه شده‌اند. این آزمایش‌ها به‌صورت نظام‌مند طراحی شدند تا تأثیر عوامل عملیاتی مختلف بر عملکرد فرایند مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل، اطلاعات دقیق برای ساخت مدل‌های پیش‌بینی‌کننده و تعیین شرایط بهینه فرایند پلاسمای سرد اتمسفری فراهم نماید. با توجه به پنج متغیر مستقل، طراحی شامل ۳۲ نقطه فاکتوریل، ۱۰ نقطه محوری و ۶ تکرار در نقطه مرکزی بود که در مجموع ۴۸ آزمایش را شامل شد. مقدار آلفا (α) برابر با ۲ در نظر گرفته شد تا خاصیت چرخش‌پذیری طراحی حفظ گردد. تخریب میکروپلاستیک پلی پروپیلن توسط این فرایند با استفاده از مدل چندجمله‌ای درجه دوم تجربی نمایش داده می‌شود (رابطه ۱) [۱۸].

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^{k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

در این رابطه، Y نشان‌دهنده درصد تخریب میکروپلاستیک‌ها پلی پروپیلن است. β_0 مقدار ثابت مدل را نشان می‌دهد، در حالی‌که β_i، β_{ii} و β_{ij} به‌ترتیب ضرایب مربوط به اثرات خطی، درجه‌دوم (تعاملی یا مربعی) و تعاملی بین متغیرهای مستقل هستند. نمادهای x_i و x_j بیانگر مقادیر کدگذاری‌شده متغیرهای مورد بررسی‌اند، k نشان دهنده تعداد کل عوامل مستقل بوده و ε خطای باقیمانده یا انحراف تصادفی مدل را نشان می‌دهد.

برای استانداردسازی متغیرهایی با واحدهای متفاوت، هر عامل بر اساس رابطه ۲ به یک مقدار کدگذاری‌شده تبدیل شد [۱۴].

$$x_i = \frac{X_i - X_0}{\Delta x} \quad (2)$$

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

در این رابطه، X_i متغیر کدگذاری‌شده، Δx اختلاف بین سطوح بالایی و پایینی و X_0 مقدار حد پایین متغیر را بیان می‌کنند. ارتباط بین پاسخ (میزان تخریب میکروپلاستیک) و پارامترهای مؤثر با استفاده از آنالیز تحلیل واریانس (ANOVA)بررسی شد، به‌طوری‌که مقادیر P و F برای تعیین معناداری آماری مورد استفاده قرار گرفتند. برای ارزیابی برازش مدل از شاخص‌های ضریب تعیین (R^2) و ضریب تعیین تعدیل‌شده (R^2_{adj}) استفاده شد، در حالی‌که ضریب تعیین پیش‌بینی‌شده ($R^2_{predicted}$) به‌منظور بررسی قابلیت پیش‌بینی و اعتمادپذیری مدل در تخمین نتایج به کار گرفته شد.

جدول۱. متغیرهای فرایند پلاسمای سرد اتمسفری و محدوده آن‌ها

فاکتور	نام متغیر	واحد متغیر	حداقل میزان (α-)	حداکثر میزان(α+)	سطح پایین	سطح بالا	میانگین	انحراف معیار
A	زمان واکنش	دقیقه	۱۵	۷۵	۳۰	۶۰	۴۵	۱۴/۱۴
B	مقدار میکروپلاستیک	تعداد بر لیتر	۲۵۰	۱۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۷۵۰	۲۳۵/۷
C	ولتاژ	کیلوولت	۱۰	۵۰	۲۰	۴۰	۳۰	۹/۴۳
D	جریان هوای ورودی	لیتر در دقیقه	۵	۲۵	۱۰	۲۰	۱۵	۴/۷۱
E	pH	–	۲	۱۰	۴	۸	۶	۱/۸۹

آماده سازی سوسپاسیون حاوی میکروپلاستیک پلی پروپیلن

به‌منظور آماده‌سازی سوسپانسیونی حاوی تعداد معینی از ذرات میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن (به ازای هر میلی‌لیتر)، در گام نخست پودر میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن با استفاده از الک‌های استاندارد آزمایشگاهی در بازه‌ی اندازه‌ی مورد نظر (۱۰۰ تا ۱۵۰ میکرومتر) تفکیک و یکنواخت‌سازی اندازه ذرات شد. در مرحله‌ی بعد، مقدار دقیقی از پودر انتخاب‌شده با بهره‌گیری از ترازوی تحلیلی با دقت ۰/۱ میلی‌گرم توزین گردید. سپس، تعداد ذرات متناظر با جرم اندازه‌گیری‌شده با استفاده از رابطه‌ی ۳ محاسبه شد تا سوسپانسیونی با تراکم ذره‌ای دقیق و کنترل‌شده برای انجام آزمایش‌های بعدی آماده گردد [۱۹].

$$(3)\ N = \frac{m}{V\rho_p}$$

در رابطه ۳، N تعداد ذرات، m جرم نمونه (بر حسب گرم)، ρ چگالی پلیمر (بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب) و V حجم متوسط هر ذره (بر حسب سانتی‌متر مکعب) است. حجم متوسط هر ذره با فرض شکل کروی آن، مطابق رابطه ۴ محاسبه شد [۲۰].

$$(4)\ V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

در این رابطه، r شعاع متوسط ذره (بر حسب سانتی‌متر) است. بر اساس این محاسبه، مقدار مورد نیاز از پودر میکروپلاستیک تعیین شد تا غلظت هدف ذرات (تعداد ذره در هر میلی‌لیتر) به دست آید. جرم تعیین‌شده از پودر میکروپلاستیک در حجم مشخصی از آب دی‌یونیزه به‌منظور تهیه‌ی سوسپانسیون یکنواخت پراکنده گردید. به‌منظور جلوگیری از چسبندگی و تجمع ذرات، سوسپانسیون حاصل به‌مدت ۳۰ دقیقه در حمام اولتراسونیک با فرکانس کاری ۴۰ کیلوهرتز تحت فرآیند سونودیسپرس کردن قرار گرفت. در حین انجام آزمایش‌ها، برای حفظ پایداری و توزیع یکنواخت ذرات در محیط آبی، از همزن مغناطیسی با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه استفاده شد. جهت اعتبارسنجی غلظت واقعی ذرات و اطمینان از یکنواختی سوسپانسیون، نمونه‌هایی به‌صورت تصادفی برداشت شده و با استفاده از

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

شمارش میکروسکوپی و تحلیل تصویری دیجیتال مورد بررسی و تأیید قرار گرفتند.

روش‌های تحلیلی

تعیین کمی ذرات میکروپلاستیک با استفاده از روش میکروسکوپی نوری انجام گرفت. در این فرآیند، نمونه‌هایی بر روی لام‌های شیشه‌ای تمیز و خشک منتقل شدند و پیش از مشاهده، فرصت ته‌نشینی کامل ذرات فراهم گردید. تصویربرداری و شمارش با میکروسکوپ نوری مدل Olympus BX53 در بزرگنمایی‌های ۱۰۰ تا ۴۰۰ برابر انجام شد. شمارش ذرات در چندین میدان دید انتخابی و تصادفی صورت گرفت تا از کاهش خطای نمونه‌برداری اطمینان حاصل شود. برای هر نمونه، حداقل پنج تکرار مستقل انجام شد و میانگین داده‌ها به‌عنوان غلظت نهایی ذرات (تعداد در میلی‌لیتر) محاسبه گردید. جهت اعتبارسنجی شمارش‌ها و تحلیل دقیق‌تر توزیع اندازه ذرات، از نرم‌افزار ImageJ (NIH, USA)بهره گرفته شد. در راستای کنترل و تضمین کیفیت نتایج، نمونه‌های شاهد به‌منظور حذف آلودگی‌های احتمالی آماده شدند و شمارش‌های تکراری برای ارزیابی تکرارپذیری داده‌ها انجام پذیرفت [۲۱].

تجزیه و تحلیل کربن آلی کل (TOC) با استفاده از دستگاه Multi C/N 3100 ساخت شرکت Analytik Jena (آلمان) انجام گرفت. مقدار اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) نیز مطابق با دستورالعمل استاندارد 5220-C (روش بسته و تیتریمتریک) تعیین شد [22]. از آنجا که وجود ترکیبات باقیمانده آلی و گونه‌های فعال ممکن است موجب خطا یا افزایش مصنوعی مقادیر COD شود، نمونه‌ها پیش از آزمون از طریق فیلتر غشایی PTFE با اندازه منافذ ۰/۲۲ میکرومتر صاف گردیدند. به دلیل ناپایداری ذاتی و تجزیه سریع ROS در شرایط محیطی، این گونه‌ها در فرآیند فیلتراسیون به‌طور مؤثر حذف شده و از دقت نتایج اندازه‌گیری COD اطمینان حاصل شد [۲۲].

بازده حذف ذرات میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن، همچنین COD و TOC با استفاده از رابطه (۵) تعیین گردید. این رابطه درصد حذف را بر اساس اختلاف بین غلظت اولیه و نهایی هر پارامتر محاسبه می‌کند و به‌صورت زیر بیان می‌شود [۲۳].

$$(5)\ \text{Efficency removal}\ (\%) = \left[\frac{C_0 - C_t}{C_0}\right] \times 100$$

که در آن C_0 و C_t به ترتیب بیانگر غلظت‌های اولیه و باقیمانده‌ی میکروپلاستیک پلی پروپیلن، COD و TOC (بر حسب تعداد بر لیتر و mg/L) در زمان t هستند.

سینتیک واکنش

به‌منظور ارزیابی نرخ تجزیه میکروپلاستیک‌های پلی‌پروپیلن در شرایط بهینه فرآیند، مطالعه‌ی سینتیک واکنش تخریب در فرایند پلاسمای سرد انجام گرفت. در این مرحله، آزمایش‌ها تحت شرایط عملیاتی بهینه‌شده انجام شدند. نمونه‌برداری در فواصل زمانی منظم صورت گرفت و غلظت باقیمانده ذرات میکروپلاستیک پس از هر بازه زمانی اندازه‌گیری گردید. (رابطه ۶) [۲۴].

$$(6)\ \ln(C_t/C_0) = -\, k_{app}\, t$$

در این رابطه، C_t نشان‌دهنده‌ی غلظت باقی‌مانده‌ی میکروپلاستیک (n/mL)، C_0 غلظت اولیه میکروپلاستیک (n/mL)، t زمان واکنش بر حسب دقیقه و k_{app} ثابت سرعت ظاهری با واحد بر دقیقه (min^{-1}) می‌باشد.

تعیین تأثیر ربایندە های رادیکال های آزاد اکسید کننده

شناسایی دقیق نقش ترکیبات آلی در مهار رادیکال‌های آزاد اکسیدکننده، گامی اساسی در درک سازوکارهای پیچیده واکنش‌های پلاسما به‌شمار می‌رود. استفاده هدفمند از مهارکننده‌های اختصاصی امکان تفکیک مسیرهای واکنشی غالب را فراهم می‌سازد و به تعیین سهم گونه‌های فعال اصلی مانند رادیکال هیدروکسیل ($^{\bullet}OH$) و سوپراکسید ($O_2^{\bullet-}$) از سایر عوامل فیزیکی نظیر فوتون‌ها، یون‌ها و حالت‌های برانگیخته مولکولی کمک می‌کند. افزون بر این، با پایش تغییرات غلظت مهارکننده‌ها و شناسایی محصولات واکنش

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

ویژه، می‌توان نرخ نسبی تشکیل گونه‌های رادیکالی را به‌صورت کمی برآورد کرد. این رویکرد، نه‌تنها به تبیین مکانیسم‌های غالب در تخریب آلاینده‌ها کمک می‌کند، بلکه داده‌های کاربردی ارزشمندی برای طراحی بهینه، کنترل دقیق و ارتقای کارایی فرآیندهای پلاسمایی فراهم می‌سازد. به‌طور کلی، این روش‌شناسی موجب افزایش پایداری، تکرارپذیری و قابلیت پیش‌بینی عملکرد سامانه‌های پلاسما در کاربردهای زیست‌محیطی و شیمیایی می‌شود [۲۵].

رادیکال‌های هیدروکسیل با استفاده از ترت-بوتیل الکل ، رادیکال‌های سوپراکسید با پی-بنزوکینون (BQ) و واکنش‌های وابسته به پراکسید هیدروژن توسط آنزیم کاتالاز مهار شدند. غلظت ربایندە های رادیکال در این مطالعه ۱۰ میلی مولار وزن خالص در نظر گرفته شد. در هر آزمایش، مهارکننده‌ی مربوطه پنج دقیقه پیش از آغاز پلاسما به محلول آلاینده افزوده شد تا فرصت کافی برای واکنش با گونه‌های فعال فراهم گردد. سپس کارایی تخریب آلاینده در حضور و عدم حضور هر مهارکننده سنجیده شد تا میزان مشارکت نسبی هر گونه‌ی فعال در فرآیند کلی مشخص گردد. تمام آزمایش‌ها در شرایط کنترل‌شده و یکسان انجام گرفت تا قابلیت تکرار و مقایسه‌پذیری نتایج تضمین شود. درصد مهار نسبی بر اساس رابطه‌ی ۷ محاسبه شد [۲۶].

$$(7)\ Inhibition\ (\%) = \frac{Efficiency_{control} - Efficiency_{scavenger}}{Efficiency_{control}} \times 100$$

تعیین تاثیر یون‌های معدنی

به‌منظور بررسی اثر اختصاصی یون‌های معدنی (کاتیونی و آنیونی) بر کارایی فرآیند پلاسمای سرد در تخریب میکروپلاستیک‌های پلی‌پروپیلن، از نمک‌های با خلوص بالا جهت تأمین یون‌های منفرد با غلظت کنترل‌شده‌ی ۱۰ میلی‌مولار (وزن خالص یون) استفاده گردید. در این راستا، کلرید سدیم، کلرید پتاسیم، سولفات سدیم و کلرید منیزیم به‌عنوان نمایندگان رایج یون‌های محلول در منابع آبی طبیعی انتخاب شدند. به‌منظور حذف اثرات جانبی ناشی از تغییرات pH و تمرکز بر نقش واقعی گونه‌های یونی، تمامی محلول‌ها با استفاده از بافر فسفات ۱۰ میلی‌مولار در مقدار pH ثابت ۷/۲ تنظیم گردیدند. این کنترل دقیق شرایط آزمایشگاهی تضمین می‌کند که تفاوت‌های مشاهده‌شده در بازده تجزیه میکروپلاستیک‌ها تنها به اثرات یونی مربوط بوده و عوامل مزاحم نظیر تغییرات اسیدیته یا قدرت یونی کلی بر نتایج تأثیرگذار نباشند.

تحلیل مصرف انرژی

برای ارزیابی کارایی انرژی، مصرف انرژی الکتریکی بر اساس شرایط بهینه‌ی عملیاتی محاسبه شد. میزان مصرف انرژی ویژه (EEC) از رابطه‌ی ۸ تعیین گردید [۲۷].

$$(8)\ \mathrm{EEC}\left(\frac{\mathrm{kWh}}{m^3}\right) = \frac{P \times t}{V \times 60}$$

در این رابطه، P توان ورودی کل سیستم (کیلووات)، t زمان واکنش (دقیقه)، V حجم مایع تصفیه‌شده (مترمکعب) و ضریب ۶۰ برای تبدیل دقیقه به ساعت می باشد.

همچنین، برای ارزیابی جامع‌تر کارایی انرژی، میزان مصرف انرژی ویژه بر حسب جرم آلاینده حذف‌شده (EEC_m) نیز از رابطه‌ی ۹ محاسبه شد [۲۷].

$$(9)\ EEC_m\left(\frac{kWh}{g}\right) = \frac{EEC \times V \times C_0 \times RE}{1000}$$

در این رابطه، C_0 غلظت اولیه میکروپلاستیک پلی پروپیلن (n/L)، RE بازده حذف (%) و ضریب ۱۰۰۰ برای تبدیل میلی‌گرم به گرم استفاده می‌شود.

یافته ها

طراحی بهینه‌سازی، اعتبارسنجی مدل و ارزیابی آماری

ارزیابی آماری نتایج تجزیه‌ی میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن با هدف تعیین شرایط بهینه فرآیند پلاسمای سرد اتمسفری مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۲). مدل درجه دوم (Quadratic) از نظر آماری معنی‌دار بود؛ به‌طوری‌که مقدار p-value مدل کمتر از ۰/۰۰۰۱ به‌دست آمد و مقادیر lack-of-fit برابر با ۰/۶۱۶۴ نشان‌دهنده‌ی عدم انحراف معنی‌دار مدل از داده‌های تجربی و برازش مناسب آن بود.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

همچنین، نزدیکی مقادیر ضریب تعیین تعدیل‌شده (R^2_{adj}) و ضریب تعیین پیش‌بینی‌شده (R^2_{pred}) به‌ترتیب ۰/۹۲۳۳ و ۰/۸۵۳۳، نشان‌دهنده‌ی قابلیت بالای مدل در پیش‌بینی و تطابق با داده‌های واقعی است. این نتایج بیانگر دقت آماری بالا و قابلیت اطمینان مدل در تحلیل و بهینه‌سازی متغیرهای عملیاتی فرآیند می‌باشد. به‌طور کلی، نتایج تحلیل آماری حاکی از آن است که مدل درجه دوم به‌خوبی توانسته است روابط غیرخطی میان پارامترهای اصلی فرآیند و بازده تخریب میکروپلاستیک پلی پروپیلن را توصیف کند.

جدول ۲. اعتبارسنجی و ارزیابی آماری مدل فرآیند پلاسمای سرد

عامل مورد بررسی	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R^2	Predicted R^2	
Linear	۰/۰۰۰۱	۰/۲۱۱۷	۰/۷۸۰۳	۰/۷۷۶۹	
2FI	۰/۹۹۴۱	۰/۱۵۶۸	۰/۷۲۵۹	۰/۷۲۵۵	
Quadratic	۰/۰۰۰۱	۰/۶۱۶۴	۰/۹۲۳۳	۰/۸۵۳۳	**پیشنهاد شده**
Cubic	۰/۸۹۵۷	۰/۳۹۸۲	۰/۸۸۹۷	۰/۷۶۳۱	

تحلیل ANOVA نشان داد که اگرچه برخی از تعاملات دو جمله‌ای بین متغیرها از نظر آماری غیرمعنادار بودند ($P > ۰/۰۵$)، حذف این جملات موجب کاهش معنی‌دار در کیفیت برازش مدل نشد. همچنین آزمون عدم‌برازش (Lack of Fit) غیرمعنادار ($P > ۰/۰۵$) بود که بیانگر کفایت مدل درجه دوم برای توصیف داده‌های تجربی می‌باشد. مقادیر بالای R^2 و R^2 تعدیل‌شده نیز نشان‌دهنده توان پیش‌بینی مناسب مدل هستند.

جدول ۳. تحلیل واریانس ارزیابی عملکرد مدل

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	۱۰۶۶/۴۰	۲۰	۵۳/۳۲	۲۸/۰۷	<۰/۰۰۰۱	significant
A-Time	۴/۱۶	۱	۴/۱۶	۲/۱۹	۰/۰۴۱۴	
B-MP	۷۸۰/۵۷	۱	۷۸۰/۵۷	۴۱۰/۹۹	<۰/۰۰۰۱	
C-Voltage	۹۴/۵۶	۱	۹۴/۵۶	۴۹/۷۹	<۰/۰۰۰۱	
D-Flow Rate	۱/۳۳	۱	۱/۳۳	۰/۷۰۱۵	۰/۰۱۰۲	
E-PH	۱۵/۷۵	۱	۱۵/۷۵	۸/۲۹	۰/۰۰۸۰	
AB	۲/۸۲	۱	۲/۸۲	۱/۴۸	۰/۲۳۴۴	
AC	۰/۴۷۵۳	۱	۰/۴۷۵۳	۰/۲۵۰۳	۰/۶۲۱۳	
AD	۰/۲۲۷۸	۱	۰/۲۲۷۸	۰/۱۱۹۹	۰/۷۳۲۰	
AE	۰/۰۱۵۳	۱	۰/۰۱۵۳	۰/۰۰۸۱	۰/۹۲۹۲	
BC	۶/۳۹	۱	۶/۳۹	۳/۳۶	۰/۰۱۸۵	

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

BD	۰/۹۴۵۳	۱	۰/۹۴۵۳	۰/۴۹۷۷	۰/۴۸۷۰	
BE	۰/۳۸۲۸	۱	۰/۳۸۲۸	۰/۲۰۱۶	۰/۶۵۷۳	
CD	۰/۵۷۷۸	۱	۰/۵۷۷۸	۰/۳۰۴۲	۰/۰۳۶۱	
CE	۱/۸۵	۱	۱/۸۵	۰/۹۷۵۶	۰/۰۳۲۸	
DE	۰/۲۶۲۸	۱	۰/۲۶۲۸	۰/۱۳۸۴	۰/۷۱۳۰	
A^2	۴۸/۳۹	۱	۴۸/۳۹	۲۵/۴۸	<۰/۰۰۰۱	
B^2	۱۶/۴۸	۱	۱۶/۴۸	۸/۶۸	۰/۰۰۶۹	
C^2	۷۳/۹۹	۱	۷۳/۹۹	۳۸/۹۶	<۰/۰۰۰۱	
D^2	۴۵/۶۸	۱	۴۵/۶۸	۲۴/۰۵	<۰/۰۰۰۱	
E^2	۴۶/۵۸	۱	۴۶/۵۸	۲۴/۵۲	<۰/۰۰۰۱	
Residual	۴۷/۴۸	۲۵	۱/۹۰			
Lack of Fit	۴۱/۴۵	۲۲	۱/۸۸	۰/۹۳۷۸	۰/۶۱۶۴	not significant
Pure Error	۶/۰۳	۳	۲/۰۱			
Cor Total	۱۱۱۳/۸۸	۴۵				

نتایج تجزیه و تحلیل واریانس برای بررسی بازده تخریب میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن تحت شرایط مختلف، بینش‌های مهمی درباره عوامل مؤثر و تعاملات آن‌ها ارائه داد. طراحی فاکتوری کامل با پنج عامل اصلی شامل زمان واکنش (A)، غلظت میکروپلاستیک (B)، ولتاژ (C)، دبی جریان (D) و pH (E) و همچنین تعاملات دوطرفه آن‌ها به‌کار گرفته شد. نتایج جدول ANOVA نشان داد که مدل کلی (نهایی) به‌طور معنادار آماری هستند ($p < 0/0001$) و مقادیر بالای F-value نشان می‌دهد که عوامل انتخاب‌شده سهم قابل توجهی در توضیح تغییرات پاسخ (بازده یا نرخ تخریب) دارند. با توجه به مقادیر پایین Residual Sum of Squares نسبت به مدل، ضریب تعیین (R^2) بالاست و مدل از دقت مناسبی برخوردار است. تعاملات دوطرفه عمدتاً اهمیت قابل توجهی داشتند، اگرچه برخی از تعاملات مانند غیرمعنادار بودند، که نشان‌دهنده‌ی ماهیت هم‌بسته پارامترها، مانند تاثیر همزمان ولتاژ و pH یا غلظت میکروپلاستیک و دبی جریان هوای ورودی است. همچنین، جملات درجه دوم نیز معنادار بودند، که نشان‌دهنده وجود انحنا در سطح پاسخ است. مقدار Lack-of-fit غیرمعنادار ($P > ۰/05$) و غالب بودن خطای خالص بیانگر تکرارپذیری آزمایش‌ها و کفایت مدل است.

به طور کلی، ولتاژ ($F = ۴۹/۷۹$) و غلظت میکروپلاستیک ($F=۴۱۰/۹۹$) به‌عنوان عوامل تأثیرگذار اصلی برای هر دو نوع میکروپلاستیک شناخته شدند که

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

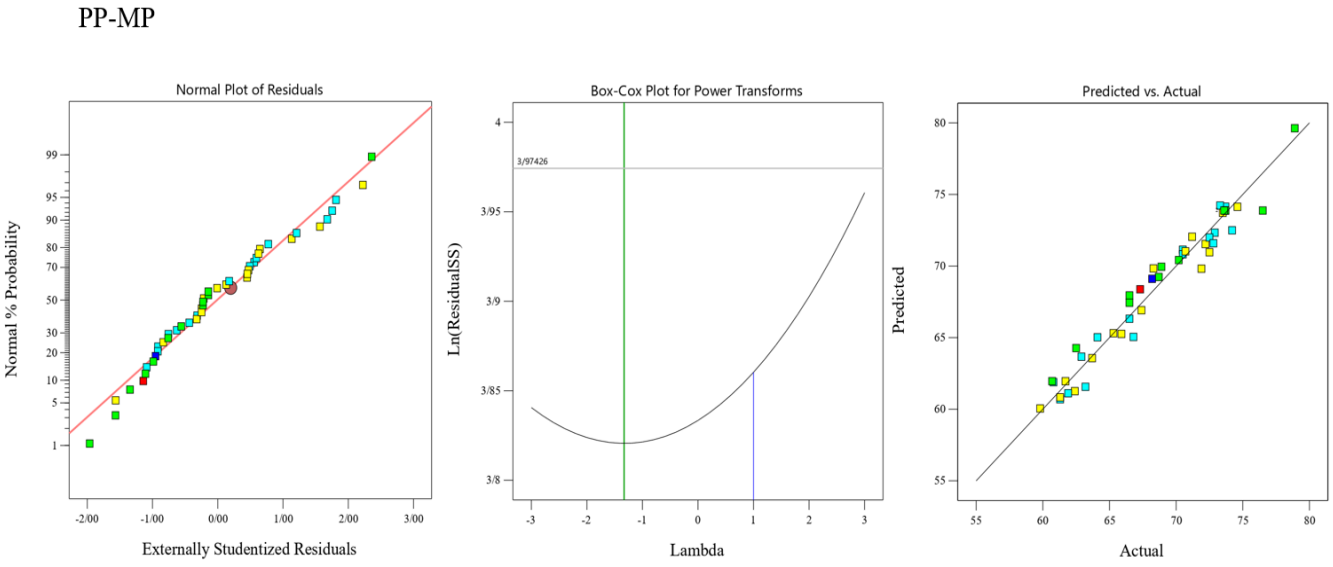
می‌تواند به تأثیر مستقیم این پارامترها بر مکانیسم‌های الکتروشیمیایی یا جذب مرتبط باشد. معادله چندجمله‌ای توصیف‌کننده درصد تخریب میکروپلاستیک پلی پروپیلن با استفاده از عوامل کدگذاری‌شده به صورت رابطه ۱۰ زیر ارائه شد.

$$\text{تخریب میکروپلاستیک پلی پروپیلن (٪)} = 77.3 + 3.2\times A - 4.06\times B + 1.97\times C + 1.58\times D - 2.63\times E - 2.69\times AB + 1.06\times AC - 1.56\times AE - 1.49\times BC + 1.7\times BE - 1.36\times A^2 - 2.48\times C^2 - 2.43\times D^2 - 1.4\times E^2 \quad (10)$$

بهینه‌سازی مدل فرایند پلاسمای سرد اتمسفری و تعیین شرایط عملیاتی مؤثر برای تخریب میکروپلاستیک از طریق روش تابع مطلوبیت انجام شد. پارامترهای بهینه، پاسخ پیش‌بینی‌شده و سهم نسبی هر عامل توسط نرم افزار شناسایی شد. بر اساس مدل، بازده پیش‌بینی‌شده برای میکروپلاستیک پلی پروپیلن برابر با ۷۷/۸ درصد بود، در حالی که آزمون‌های آزمایشگاهی بازده واقعی ۷۳/۲ درصد را نشان دادند (غلظت اولیه n/L۵۰۰ ، pH حدود ۶/۶، زمان واکنش ۴۵ دقیقه، ولتاژ ۲۵ کیلوولت و جریان هوای ورودی برابر با ۱۴ لیتر در دقیقه). این نتایج نشان می‌دهد که مدل برگزیده شده، قابلیت پیش‌بینی قابل قبول و اعتبار کافی برای بهینه‌سازی شرایط فرآیند پلاسمای سرد اتمسفری در حذف میکروپلاستیک پلی پروپیلن دارد و می‌تواند برای طراحی عملیاتی در تصفیه فاضلاب و بهبود بازده حذف مورد استفاده قرار گیرد.

اعتبارسنجی آماری و کفایت مدل فرآیند

ارزیابی آماری مدل دوجمله‌ای توسعه‌یافته برای تخریب میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن در محیط آبی با استفاده از فرآیند پلاسمای سرد اتمسفری از طریق نمودارهای تشخیصی انجام شد و نتایج آن در شکل ۲ ارائه شده است. این نمودارها شامل بررسی قابلیت پیش‌بینی مدل، پراکندگی باقیمانده‌ها، نرمالیتی خطاها و نمودارهای پخش مقادیریش‌بینی‌شده در مقابل مقادیر مشاهده‌شده می‌باشند.



شکل ۲. ارزیابی آماری مدل توسعه‌یافته

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

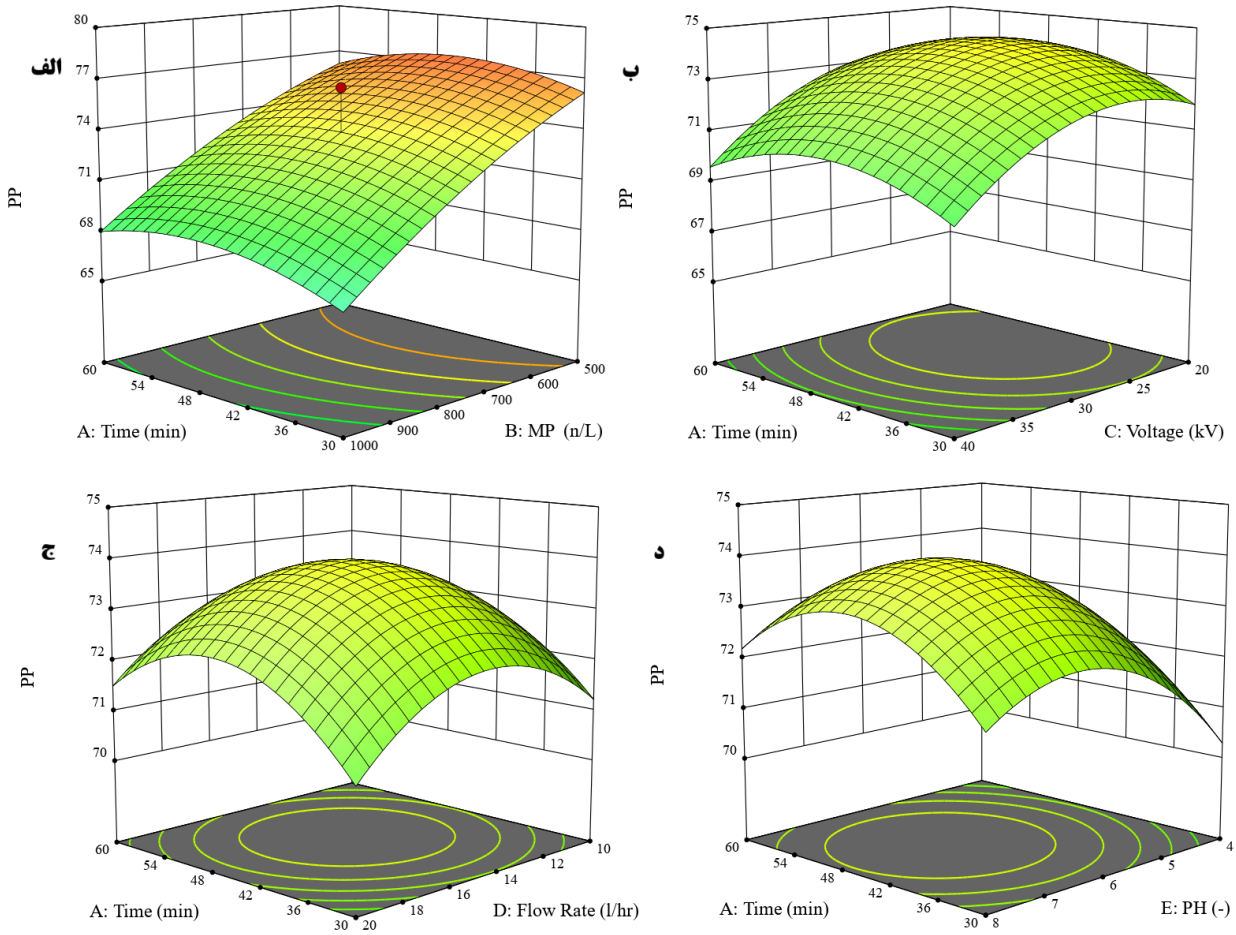
نمودارهای تشخیصی برای ارزیابی نرمال بودن باقیمانده‌ها، نیاز به تبدیل داده‌ها و دقت پیش‌بینی مدل‌ها استفاده شدند. نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌های استانداردشده خارجی نشان‌دهنده هم‌راستایی نزدیک نقاط داده با خط مرجع قطری است و تنها انحرافات جزئی در انتها مشاهده می‌شود. این امر نشان می‌دهد که باقیمانده‌ها تقریباً دارای توزیع نرمال هستند و فرضیه اصلی تحلیل رگرسیون برقرار است و هیچ تخلف معناداری وجود ندارد که اعتبار مدل را تحت تأثیر قرار دهد. نمودارهای Box-Cox برای تبدیل‌های توانی، مجموع مربعات باقیمانده‌ها را به صورت لگاریتم طبیعی در تابع لامبدا نشان می‌دهند. حداقل مقدار در حدود $\lambda \approx 3.5$ قرار دارد. خط عمودی سبز در $\lambda = 1$ خارج از بازه اطمینان ۹۵ درصد قرار دارد، که نشان می‌دهد استفاده از تبدیل توانی می‌تواند با تثبیت واریانس، تناسب مدل را بهبود دهد. با این حال، مدل‌های بدون تبدیل نیز به دلیل پایداری کلی و سادگی تفسیر با توجه به معیار درصد حذف کافی تلقی شدند. نمودارهای مقادیر پیش‌بینی‌شده در مقابل مقادیر واقعی، همبستگی خطی قوی را نشان می‌دهند و نقاط داده به‌طور نزدیک به خط مرجع ۴۵ درجه پراکنده شده‌اند. بازه پیش‌بینی‌شده حدود ۵۵ تا ۸۰ درصد است. این خوشه‌بندی فشرده بیانگر دقت بالای پیش‌بینی، حداقل سوگیری و عدم وجود نقاط پرت قابل توجه است و اثربخشی مدل‌ها را در پیش‌بینی حذف میکروپلاستیک پروپیلن تحت شرایط مختلف فرایند پلاسمای سرد اتمسفری تقویت می‌کند. به طور کلی، این ارزیابی‌های تشخیصی کفایت مدل‌های توسعه‌یافته برای بهینه‌سازی حذف میکروپلاستیک پروپیلن را تأیید می‌کنند.

تحلیل اثر پارامترهای عملیاتی در فرآیند بر تخریب میکروپلاستیک‌های پلی‌پروپیلن

برای بررسی تأثیر متغیرهای منفرد و تعاملات آن‌ها بر کارایی فرآیند پلاسمای سرد اتمسفری، نمودارهای سه‌بعدی سطح پاسخ بر اساس مدل چندجمله‌ای توسعه‌یافته ترسیم گردید. همان‌طور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، بازده تخریب میکروپلاستیک‌های پلی‌پروپیلن در ارتباط با متغیرهای ارائه شده در جدول ۱ نمایش داده شده است. در شکل ۳-الف، درصد تخریب میکروپلاستیک بر حسب زمان واکنش و غلظت میکروپلاستیک پلی پروپیلن نشان داده شده است. راندمان حذف در محدوده‌ی ۷۸-۵۹ درصد متغیر است. سطح پاسخ یک منحنی غیرخطی و صعودی را نشان می‌دهد که با افزایش زمان و کاهش غلظت میکروپلاستیک، راندمان حذف به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. قله سطح (حداکثر راندمان ≈۸۰ درصد) در ناحیه زمان بالا (نزدیک به ۱۰۰ دقیقه) و غلظت پایین (نزدیک به ۵۰۰ n/L) قرار دارد. زمان قرارگیری در معرض پلاسما، مدت زمان تعامل گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن با سطح میکروپلاستیک را تعیین می‌کند.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]



شکل ۳. نمودارهای سه‌بعدی مربوط به راندمان تخریب میکروپلاستیک پلی پروپیلن به‌عنوان تابعی از متغیرهای مختلف: الف) زمان واکنش و غلظت میکروپلاستیک، ب) زمان واکنش و ولتاژ، ج) زمان واکنش و دبی جریان، د) زمان واکنش و pH

سینتیک واکنش

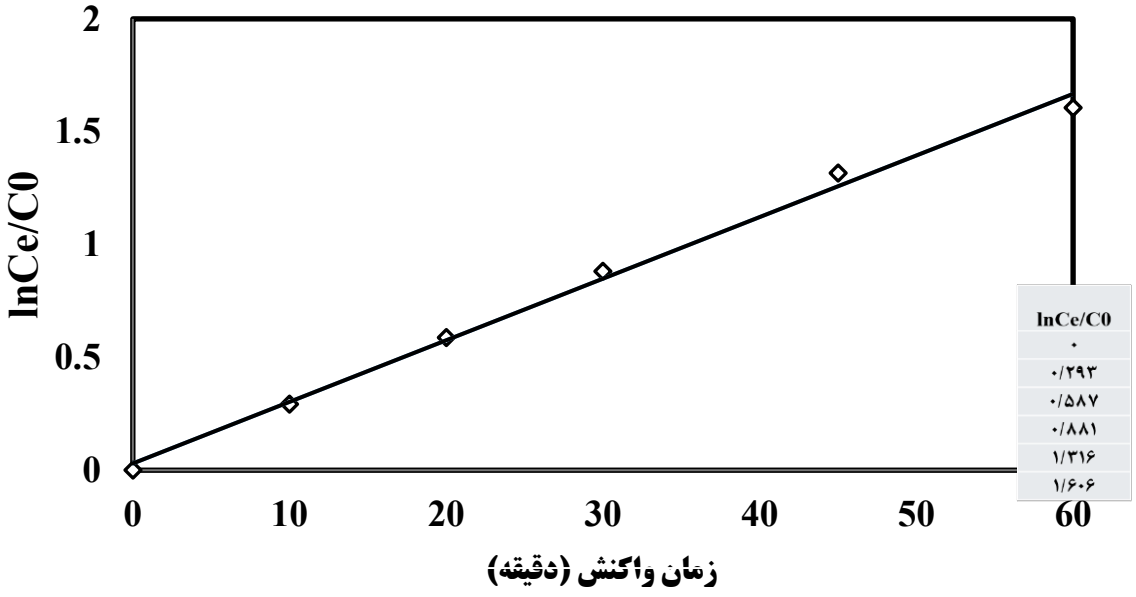
نتایج این بخش از مطالعه در جدول ۴ و شکل ۴ ارایه شده است. مدل درجه اول به خوبی با داده‌ها تطابق دارد (R^2=۰/۹۹۸)، که نشان‌دهنده وابستگی کارایی فرایند پلاسمای سرد اتمسفری به غلظت اولیه میکروپلاستیک پلی پروپیلن است. در این فرآیند، این رفتار معمولاً به دلیل حمله گونه‌های فعال اکسیدکننده به سطح ترکیب آلی رخ می‌دهد، که منجر به شکست زنجیره و کاهش اندازه ذرات می‌شود [۲۸].

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

جدول۴. جدول داده‌های سینتیکی فرایند پلاسمای سر اتمسفری در شرایط بهینه (pH=۶/۶، ولتاژ=۲۵کیلوولت، جریان هوای ورودی=۱۴ لیتر در دقیقه، غلت اولیه میکروپلاستیک=۵۰۰ ذره در لیتر)

پارامتر سینتیکی	واحد	مقدار
ثابت سرعت (k)	min^{-1}	۰/۰۲۹۲ ± ۰/۰۰۱۱
ثابت سرعت (k)	hr^{-1}	۱/۷۵
نیمه‌عمر ($t_{1/2}$)	min	۲۳/۷
زمان تخریب ۹۰ % (t_{90})	min	۷۹
زمان تخریب ۹۹ % (t_{99})	min	۱۵۷
ضریب همبستگی (R)	-	۰/۹۹۸
ضریب تبیین (R^2)	-	۰/۹۹۶
خطای استاندارد	-	۰/۰۳۸
سطح معنی‌داری (p-value)	-	<۰/۰۰۱



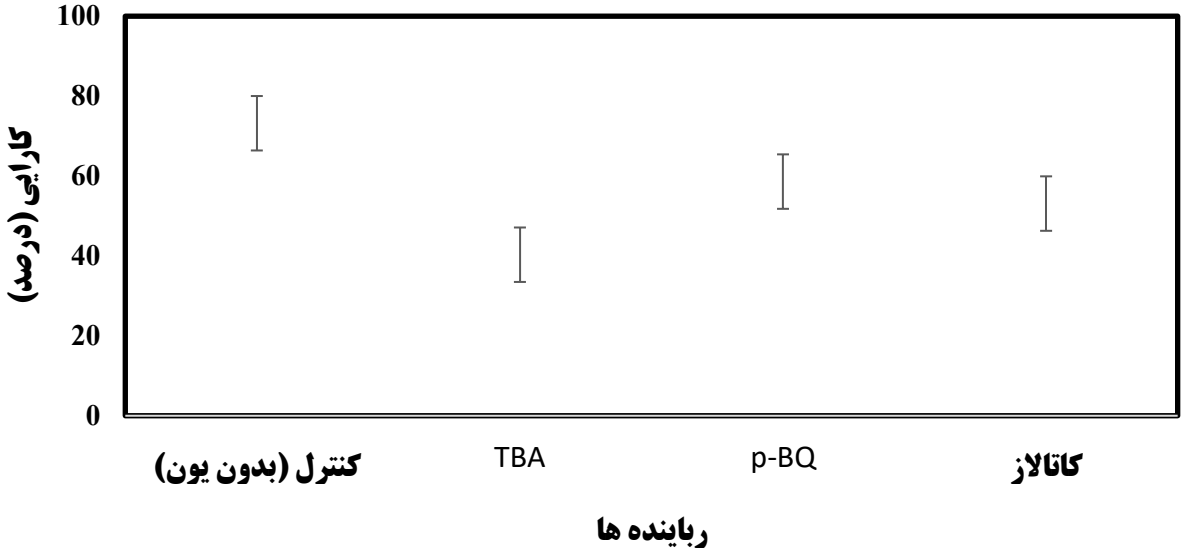
شکل۴. نمودار سینتیک درجه اول پلاسمای سرد اتمسفری در شرایط بهینه (pH=۶/۶، ولتاژ=۲۵کیلوولت، جریان هوای ورودی=۱۴ لیتر در دقیقه، غلظت اولیه میکروپلاستیک=۵۰۰ ذره در لیتر)

تاثیر ربایندە های رادیکال

به منظور شناسایی گونه‌های اصلی واکنش‌پذیر در فرآیند تجزیه میکروپلاستیک‌های پلی‌پروپیلن با استفاده از فرایند پلاسمای سرد اتمسفری، مهارکننده‌های اختصاصی به کار گرفته شدند تا به طور انتخابی رادیکال‌های فعال را حذف کنند. در شکل ۵، تغییرات عملکرد تخریب میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن در حضور هر یک از این مهارکننده‌ها نمایش داده شده است.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

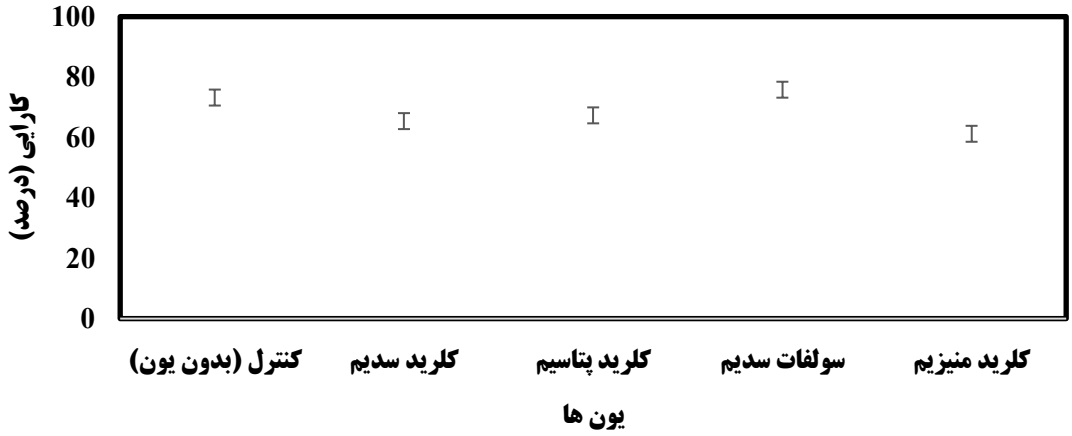
[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]



شکل ۵. تاثیر رباینده های رادیکال بر کارایی فرایند پلاسمای سرد اتمسفری در شرایط بهینه (pH=۶/۶، ولتاژ=۲۵کیلوولت، جریان هوای ورودی=۱۴ لیتر در دقیقه، غلت اولیه میکروپلاستیک=۵۰۰ ذره در لیتر)

تاثیر یون‌های معدنی

نتایج بررسی تاثیر یون‌های معدنی متداول در محیط‌های آبی بر روی راندمان تخریب میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن در شکل ۶ ارائه شده است. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه و معنی‌دار حضور این یون‌ها بر عملکرد فرآیند پلاسمای سرد اتمسفری می‌باشند. بر اساس یافته‌ها، حضور این یون‌های معدنی می‌تواند تأثیرات چندجانبه و رقابتی بر کارایی فرایند پلاسمای سرد اتمسفری در تخریب میکروپلاستیک‌های پلی‌پروپیلن داشته باشد.



شکل ۶. تاثیر حضور یون های معدنی بر کارایی فرایند پلاسمای سرد اتمسفری در شرایط بهینه (pH=۶/۶، ولتاژ=۲۵کیلوولت، جریان هوای ورودی=۱۴ لیتر در دقیقه، غلت اولیه میکروپلاستیک=۵۰۰ ذره در لیتر)

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

حذف COD و TOC

در این مطالعه برای ارزیابی تأثیر فرآیند پلاسمای سرد بر حذف آلاینده‌های آلی، علاوه حذف میکروپلاستیک، میزان کاهش شاخص های COD و TOC مورد مطالعه قرار گرفتند (جدول ۵).

جدول ۵. مقادیر COD و TOC قبل و بعد از فرآیند در شرایط بهینه (pH=۶/۶، ولتاژ=۲۵کیلوولت، جریان هوای ورودی=۱۴ لیتر در دقیقه، غلت اولیه میکروپلاستیک=۵۰۰ ذره در لیتر)

پارامتر	واحد	قبل از پلاسما	بعد از پلاسما	درصد حذف
COD	میلی گرم در لیتر	۱۵۰ ± ۵	۶۰ ± ۳	۶۰
TOC		۲۵ ± ۱	۸ ± ۰/۵	۶۸/۱
مقادیر به‌صورت میانگین از سه تکرار مستقل گزارش شده‌اند.				

نتایج نشان داد که تحت شرایط بهینه تعیین‌شده برای حذف میکروپلاستیک پلی اتیلن (راندمان حذف ۷۳/۲ درصد)، پارامترهای آلی COD و TOC نیز به‌طور قابل توجهی کاهش یافتند. با توجه به اینکه COD معرف میزان آلودگی آلی قابل اکسیداسیون است، کاهش ۶۰ درصدی آن نشان‌دهنده برهم‌کنش مؤثر گونه‌های فعال تولیدشده در پلاسمای سرد با ترکیبات آلی محلول می‌باشد. به‌علاوه، کاهش ۶۸ درصدی در TOC حاکی از مصرف کل ترکیبات آلی در نمونه می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که گونه‌های واکنش‌پذیر تولیدشده در پلاسمای سرد نه‌تنها در تخریب میکروپلاستیک‌ها مؤثر هستند بلکه می‌توانند باعث اکسیداسیون ترکیبات آلی محلول نیز شوند، که منجر به بهبود کیفیت آب پس از تصفیه می‌گردد.

تعیین میزان انرژی مصرفی در شرایط بهینه عملکردی

برای ارزیابی میزان بهره‌وری انرژی در فرآیند پلاسمای سرد اتمسفری به منظور تخریب میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن، شاخص‌های مصرف انرژی ویژه (EEC) و مصرف انرژی ویژه نسبت به جرم آلاینده حذف شده (EEC_m) بر اساس روابط (۸) و (۹) محاسبه شدند. این معیارها به ترتیب نشان‌دهنده مقدار انرژی مصرفی برای تصفیه هر واحد حجم از محلول و میزان انرژی لازم برای حذف هر واحد جرم آلاینده هستند و نقش مهمی در تحلیل‌های اقتصادی و فنی فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته ایفا می‌کنند. نتایج این بخش در جدول ۵ ارائه شده است.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

جدول ۶ . میزان انرژی مصرفی در شرایط بهینه (pH=۶/۶، ولتاژ= ۲۵ کیلوولت، جریان هوای ورودی= ۱۴ لیتر در دقیقه، غلت اولیه میکروپلاستیک= ۵۰۰ ذره در لیتر)

پارامتر	واحد	مقدار	کاربرد
ولتاژ کاری	kV	۲۵	**پارامتر ورودی**
جریان متوسط	mA	۷۵	**پارامتر ورودی**
توان مصرفی	kW	۱/۸۷۵	**توان کل**
زمان فرآیند	دقیقه	۴۵	**زمان ماند**
انرژی کل	kJ/L	۸۴/۴	**انرژی حجمی**
انرژی کل	kWh/m^3	۱/۴۰۷	**مقیاس صنعتی**
حذف‌شده MP جرم	میلی گرم	۰/۳۶۶	**محاسبه کارایی**
انرژی ویژه	kJ/mg	۲۳۰/۶	**شاخص کلیدی**
EEO	kJ/order	۱۴۷/۳	**کارایی الکتریکی**

بحث

در این فرایند، تخریب پلی پروپیلن از طریق اکسیداسیون و شکست زنجیره‌های C-C/C-H آغاز می‌شود، که به تولید گروه‌های عاملی اکسیژنه (مانند کربوکسیل و هیدروکسیل) منجر می‌گردد. با افزایش زمان، کارایی جهش پیدا می‌کند. این به دلیل انباشت انرژی پلاسما (با ولتاژ/فرکانس ثابت) است که نفوذ عمیق‌تر به ماتریس پلی پروپیلن را امکان‌پذیر می‌سازد. در مطالعه Nguyen و همکاران که بر روی تصفیه فاضلاب با استفاده از روش پلاسمای سرد کار کرده اند، نتایج نشان داد که بازده حذف آنتی‌بیوتیک‌ها و آلاینده‌ها در فرآیند پلاسمای سرد در پنج دقیقه نخست واکنش بیشترین مقدار را داشته و با افزایش زمان تا حدود ۱۵ دقیقه به حالت اشباع نزدیک شده است. این روند نشان می‌دهد که سرعت تخریب در مراحل اولیه بسیار بالا بوده و پس از آن به دلیل کاهش غلظت مواد هدف و محدودیت رادیکال‌های فعال، نرخ حذف کاهش می‌یابد [۲۹]. تفاوت زمان واکنش موردنیاز برای حذف آلاینده‌های مختلف در فرآیند پلاسمای سرد اتمسفری به ماهیت شیمیایی، ساختار مولکولی و پایداری پیوندهای آن‌ها در برابر رادیکال‌های فعال بستگی دارد. ترکیباتی با پیوندهای مزدوج، حلقه‌های آروماتیک یا گروه‌های عاملی مقاوم‌تر، معمولاً نیاز به زمان واکنش طولانی‌تری برای تجزیه کامل دارند، در حالی که آلاینده‌های ساده‌تر یا با پیوندهای ضعیف‌تر به‌سرعت توسط گونه‌های واکنش‌پذیری مانند $^{\bullet}OH$ ، O_3 و H_2O_2 اکسید می‌شوند. علاوه بر این، تفاوت در حلالیت، جذب سطحی بر حباب‌های پلاسما و دسترسی مولکول‌ها به ناحیه تخلیه الکتریکی نیز می‌تواند موجب تغییر در نرخ واکنش شود. در نتیجه، زمان بهینه واکنش برای هر

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

آلاینده تابعی از سینتیک تخریب، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و مکانیسم غالب اکسیداسیون در محیط پلاسما است [۳۰، ۳۱].

بررسی تأثیر غلظت اولیه آلاینده در فرآیند پلاسمای سرد اتمسفری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا این متغیر نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی تخریب و مکانیسم واکنش دارد. افزایش غلظت اولیه معمولاً موجب افزایش تعداد مولکول‌های هدف در محلول می‌شود، اما در عین حال تراکم بالای آلاینده می‌تواند موجب کاهش دسترسی گونه‌های فعال اکسیدکننده به هر مولکول و در نتیجه کاهش بازده حذف گردد. از سوی دیگر، در غلظت‌های پایین‌تر، گونه‌های واکنشی به‌طور مؤثرتری با آلاینده برخورد کرده و نرخ تخریب بالاتری حاصل می‌شود. بنابراین، بررسی این پارامتر نه‌تنها برای تعیین شرایط بهینه واکنش ضروری است، بلکه به درک بهتر روابط سینتیکی و ظرفیت اکسیداسیون سیستم پلاسما در مقیاس‌های واقعی تصفیه فاضلاب کمک می‌کند. غلظت اولیه (n/L) بر تراکم ذرات پلی پروپیلن در حجم واکنش تأثیر می‌گذارد و مستقیماً با قانون Lambert-Beer (برای جذب گونه‌های پلاسما) مرتبط است [۳۲]. در غلظت‌های بالا، ذرات میکروپلاستیک ممکن است سایه‌اندازی ایجاد کنند، که دسترسی یکنواخت پلاسما را مختل می‌سازد [۳۳]. پلی پروپیلن به عنوان یک پلیمر هیدروفوب، در غلظت بالا تمایل به تجمع دارد، که ضخامت لایه بیوفیلم‌مانند را افزایش می‌دهد و نفوذ گونه های اکسید کننده را کاهش می‌دهد. در مطالعه Tang و همکاران، حذف آنتی‌بیوتیک اکسی‌تتراسایکلین از محلول آبی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که غلظت اولیه آلاینده تأثیر قابل‌توجهی بر نرخ و بازده تجزیه دارد و فرآیند تخریب از سینتیک واکنش مرتبه اول پیروی می‌کند. با افزایش غلظت اولیه ، سرعت حذف کاهش یافت، که نشان‌دهنده محدودیت گونه‌های فعال اکسیدکننده در شرایط بار آلودگی بالا است [۳۴]. در شکل ۳-ب، میزان تخریب میکروپلاستیک بر اساس متغیرهای زمان واکنش و ولتاژ نشان داده شده است. سطح پاسخ، منحنی صعودی و محدب است که با افزایش زمان و ولتاژ، راندمان حذف به طور پیوسته افزایش می‌یابد. حداکثر کارایی در ناحیه زمان بالا و ولتاژ بالا قرار دارد. در مقابل، در ناحیه زمان کم و ولتاژ پایین، راندمان به حداقل می‌رسد. این نشان‌دهنده تعامل مثبت بین زمان و ولتاژ است، جایی که افزایش هر دو متغیر، تولید گونه‌های فعال پلاسما را تقویت می‌کند. این نتایج نشان می‌دهند که فرایند با تنظیم دقیق زمان و ولتاژ می‌تواند راندمان قابل قبولی در حذف میکروپلاستیک پلی پروپیلن ارائه دهد. ولتاژ، شدت میدان الکتریکی و تولید گونه‌های فعال در پلاسما را کنترل می‌کند. افزایش ولتاژ، انرژی یون‌ها و الکترون‌ها را بالا می‌برد، که به تولید بیشتر گونه‌های فعال و تخریب زنجیره‌های پلی پروپیلن منجر می‌شود. این فرایند با قانون پاسچن (Paschen's Law) برای تخلیه الکتریکی مرتبط است، که ولتاژ بالاتر، تخلیه پایدارتر را در فشار اتمسفری فراهم می‌کند [۳۵]. با افزایش ولتاژ از ۲۰ به ۲۵ کیلوولت، راندمان از حدود ۶۰ درصد به ۷۵ درصد می‌رسد. این به دلیل افزایش چگالی پلاسما و نفوذپذیری آن به ذرات پلی پروپیلن است. در شکل ۳-ج، کارایی تخریب بر حسب زمان واکنش و میزان جریان هوای ورودی نشان داده شده است. با افزایش زمان واکنش و نرخ جریان هوای ورودی، کارایی حذف به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. حداکثر کارایی در

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

ناحیه زمان بالا (نزدیک به ۵۴–۴۸ دقیقه) و نرخ جریان متوسط تا بالا (نزدیک به l/hr ۱۸–۱۵) قرار دارد. در مقابل، در ناحیه زمان کم و نرخ جریان پایین یا بالا، راندمان به حداقل (حدودا ۶۰ درصد) می‌رسد. این نشان‌دهنده تعامل غیرخطی بین متغیرها است، جایی که نرخ جریان بهینه (حدود l/hr ۱۶) با زمان طولانی‌تر، تولید گونه‌های فعال پلاسما را به حداکثر می‌رساند، اما نرخ جریان بیش از حد ممکن است به رقیق‌سازی یا اختلال در پلاسما منجر شود. جریان هوای ورودی یکی از متغیرهای کلیدی در کارایی فرایند پلاسمای سرد محسوب می‌شود، زیرا به‌طور مستقیم بر تولید و توزیع گونه‌های فعال اکسیدکننده مانند $^{\bullet}OH$، O_3 و H_2O_2 تأثیر می‌گذارد [۳۶]. افزایش جریان هوا موجب افزایش تراکم مولکول‌های اکسیژن و نیتروژن در ناحیه تخلیه الکتریکی شده و در نتیجه، شدت برهم‌کنش‌های پلاسمایی و تولید رادیکال‌های واکنش‌پذیر را تقویت می‌کند. با این حال، در دبی‌های بسیار بالا، زمان ماند گاز در راکتور کاهش یافته و فرصت واکنش گونه‌های فعال با آلاینده‌ها کم می‌شود، که می‌تواند بازده حذف را کاهش دهد. بنابراین، انتخاب جریان هوای بهینه اهمیت زیادی دارد تا بین تولید کافی رادیکال‌ها و زمان تماس مؤثر با آلاینده‌ها تعادل برقرار گردد و حداکثر کارایی در حذف ترکیبات آلی و میکروپلاستیک‌ها حاصل شود [۳۷]. در مطالعه Kumar و همکاران، مقدار جریان گاز ورودی به راکتور به عنوان یک متغیر حیاتی نام برده شده است [۳۸]. در شکل ۳–د، کارایی تخریب بر حسب زمان واکنش و pH نمایش داده شده است. طبق این شکل، سطح پاسخ با افزایش زمان واکنش و تغییرات pH به مقادیر متوسط (حدود ۶–۵)، راندمان حذف به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. حداکثر کارایی، در ناحیه زمان بالا و pH منطقه نسبتا اسیدی تا خنثی قرار دارد.

pH محیط بر تعادل شیمیایی گونه‌های فعال در فرایند پلاسما تأثیر می‌گذارد و تولید گونه های آزاد اکسید کننده وابسته به غلظت یون های هیدروژن و هیدروکسیل است [۳۹]. در pH اسیدی، واکنش‌های اکسیدانی افزایش می‌یابد، در حالی که در pH قلیایی، گونه‌های کاهشی غالب می‌شوند [۴۰]. در pH اسیدی پایین (کمتر از ۵)، غلظت بالای H^+ باعث پروتونه شدن گونه‌های فعال مانند رادیکال هیدروکسیل می‌شود، که فعالیت اکسیدانی را کاهش می‌دهد که در نتیجه کاهش کارایی به دلیل کاهش نرخ تخریب زنجیره‌های میکروپلاستیک پلی پروپیلن اتفاق می افتد [۴۱]. در pH نسبتا اسیدی تا خنثی تعادل بین H^+ و OH^- تولید حداکثری $^{\bullet}OH$ را فراهم می‌کند، که به شکست پیوندهای C-H/C-C در میکروپلاستیک پلی پروپیلن منجر می‌شود. افزایش نفوذپذیری سطح میکروپلاستیک و تکه تکه شدن است [۴۲]. در pH قلیایی غلظت بالای OH^- باعث تبدیل گونه‌های اکسیدانی به کاهشی می‌شود، که برای تخریب میکروپلاستیک پلی پروپیلن کمتر مؤثر است [۴۳]. در مطالعه Baniya و همکاران، تاثیر پارامتر pH را کارایی فرایند پلاسمای اتمسفری سرد چشمگیر بیان کرده اند و pH محدوده ۶–۷ را pH بهینه گزارش کرده اند [۴۴].

مطالعه رفتار سینتیکی واکنش‌های شیمیایی در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، مانند پلاسمای سرد اتمسفری، اهمیت بالایی دارد چرا که شناخت زمان‌بندی واکنش‌ها، مکانیزم‌های تخریب آلاینده‌ها و بهره‌وری تولید گونه‌های فعال را ممکن می‌سازد. تحلیل سینتیکی موجب فهم سرعت واکنش و مسیرهای طی شده

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

می‌شود و برای طراحی راکتورها، تعیین زمان ماند بهینه، توسعه مقیاس صنعتی و پیش‌بینی عملکرد فرآیند ضروری است. در بسیاری از پژوهش‌های مرتبط با پلاسمای سرد، مدل سینتیکی مرتبه اول به دلیل سادگی و کارآمدی، به‌کار گرفته می‌شود؛ چون در شرایط معمول غلظت آلاینده‌ها پایین است و غلظت گونه‌های اکسیدکننده نسبت به آن بسیار زیاد و تقریباً ثابت فرض می‌شود. بدین ترتیب نرخ واکنش با غلظت آلاینده نسبت مستقیم دارد و رفتار واکنش مطابق مدل درجه اول است. افزون بر این، با توجه به ثبات نسبی گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن فعال و محدودیت در اندازه‌گیری مستقیم آن‌ها، استفاده از مدل‌های پیچیده‌تر مانند درجه دوم یا چندمرحله‌ای رایج نیست. به همین دلیل، مدل درجه اول را می‌توان به عنوان رویکرد قابل اعتماد و ساده برای تحلیل تجربی و تعیین ثابت سرعت واکنش در مطالعات پلاسمای سرد به‌کار برد [۲۹، ۴۵].

نتایج به‌دست‌آمده بیانگر آن است که بیشترین کاهش راندمان با TBA (از ۷۳/۲ به ۴۰/۳ درصد) مشاهده شد، که حاکی از نقش اصلی رادیکال‌های هیدروکسیل در تخریب میکروپلاستیک پلی پروپیلن است. این رادیکال‌ها از تجزیه آب در پلاسما تولید می‌شوند و حمله اکسیداتیو به زنجیره‌های پلیمری انجام می‌دهند. BQ کاهش کمتری ایجاد کرد (۵۸/۶ درصد)، نشان‌دهنده نقش ثانویه سوپراکسید که ممکن است در تشکیل زنجیره‌های اکسیداتیو کمتر مؤثر باشد. کاتالاز (۵۳/۱ درصد) نشان می‌دهد H_2O_2 نیز نقش دارد، اما کمتر از رادیکال هیدروکسیل، زیرا H_2O_2 اغلب پیش‌ماده این رادیکال است. در مطالعه Hamza و همکاران، از ترکیبات پارابنزوکویین، سدیم آزاید، ایزوپروپیل الکل و کاتالاز به عنوان رباینده های رادیکال استفاده شده است. کارایی فرایند پلاسمای سرد اتمسفری در حضور این ترکیبات کاهش قابل ملاحظه ای داشته است [۴۶].

افزایش یونی‌سختی و شوری باعث کاهش پتانسیل زتا و خنثی‌سازی بار سطحی ذرات می‌شود که تمایل به تجمع/فلوکوله شدن ذرات پلی‌پروپیلن را افزایش می‌دهد. این تجمع سطح اختصاصی مؤثر را کاهش داده و در نتیجه دسترسی رادیکال‌های فعال اکسید کننده به سطح میکروپلاستیک را پایین می‌آورد و کارایی تخریب سطحی را کاهش می‌دهد [۴۷]. همچنین در تعاملات پلاسمای-آب، آنیون کلر نقش پیچیده‌ای ایفا می‌کند. از یک سو کلرید می‌تواند به‌عنوان اسکاونجر رادیکال هیدروکسیل عمل کند و بنابراین بازده اکسیداسیون را کاهش دهد؛ از سوی دیگر، تحت شرایط خاص کلر فعال‌شده ($HOCl$، $Cl^{\bullet}$، Cl_2) تولید می‌شود که خود می‌تواند مسیرهای اکسیداسیونی یا کلرینه‌سازی متفاوتی فراهم کند [۴۸]. در نهایت کاتیون‌های دوظرفیتی مانند Mg^{2+} اثرات تقویت‌کننده در تجمع و تثبیت فلوکولاسیون الکترواستاتیک دارند و می‌توانند انتقال جرم واکنش‌پذیر به سطح آلاینده را محدود سازند؛ همچنین یون سولفات با افزایش ظرفیت الکترولیتی محیط، طول عمر و مسیرهای خوردگی شیمیایی گونه‌های رادیکالی را تغییر می‌دهد که می‌تواند به‌صورت موزاییکی هم موجب کاهش و هم در موارد خاص تقویت تخریب شود [۴۹].

بر اساس نتایج، میزان انرژی (۱/۴۰۷ کیلووات ساعت بر مترمکعب)، در محدوده‌ی متعارف فرایندهای پلاسما برای تصفیه آب و تخریب ترکیبات مقاوم آلی قرار دارد (معمولاً ۰/۵ تا ۵ kWh/m^3 بسته به نوع آلودگی). حذف جرم میکروپلاستیک برابر ۰/۳۶۶ میلی‌گرم نشان

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

می‌دهد که در توان و مدت زمان مشخص، راندمان حذف محدود اما قابل‌قبول است، زیرا پلی‌پروپیلن از جمله پلیمرهای با پیوندهای C – C بسیار پایدار و مقاومت بالا در برابر اکسیداسیون است [۵۰]. شاخص کلیدی انرژی ویژه برابر ۲۳۰/۶ کیلو ژول بر میلی گرم بیانگر میزان انرژی موردنیاز برای تخریب واحد جرم میکروپلاستیک است. مقدار نسبتاً بالای این شاخص نشان می‌دهد که هرچند پلاسما در ایجاد گونه‌های واکنشی فعال مؤثر است، اما بازده انرژی هنوز پایین است. از سوی دیگر، مقدار EEO برابر ۱۴۷/۳ kJ/order نشان‌دهنده‌ی کارایی الکتریکی فرآیند است. بر اساس معیارهای USEPA برای فناوری‌های اکسیداسیون پیشرفته، مقادیر زیر ۲۰۰ kJ/order به‌عنوان عملکرد مطلوب و اقتصادی تلقی می‌شوند، بنابراین فرآیند حاضر در محدوده‌ی قابل‌قبول و نسبتاً بهینه قرار دارد [۵۱].

نتیجه گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد فرایند پلاسمای سرد اتمسفری در تجزیه میکروپلاستیک‌های پلی‌پروپیلن از محلول‌های آبی انجام گرفت. فناوری پلاسمای سرد به‌دلیل تولید گونه‌های اکسیدکننده‌ی فعال نظیر رادیکال‌های هیدروکسیل، سوپراکسید، اوزون و دیگر حالت‌های برانگیخته، به‌عنوان یکی از روش‌های نوین و کارآمد اکسیداسیون پیشرفته مطرح است که بدون نیاز به مواد شیمیایی خارجی، توان تخریب آلاینده‌های پایدار را داراست. در این مطالعه، برای دستیابی به شرایط بهینه‌ی عملکرد، تأثیر عوامل مؤثر شامل مدت زمان واکنش، ولتاژ ورودی، دبی هوای تغذیه، pH محیط و غلظت اولیه ذرات میکروپلاستیک با بهره‌گیری از طراحی آزمایش بر مبنای روش سطح پاسخ و طراحی ترکیبی مرکزی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل آماری مدل درجه دوم نشان داد که مدل ارائه‌شده از برازش مناسبی برخوردار است و از دقت پیش‌بینی بالایی بهره می‌برد. هم‌خوانی زیاد بین مقادیر R^2 تعدیل‌شده و R^2 پیش‌بینی‌شده و نیز مقدار بسیار پایین ($p\text{-value} < 0/0001$) نشان‌دهنده اعتبار و کفایت مدل است. بر اساس تحلیل اثر متغیرها، افزایش زمان واکنش و ولتاژ اعمالی بیشترین نقش را در بهبود راندمان حذف داشتند، در حالی که افزایش بیش از حد غلظت اولیه، نرخ جریان هوا و تغییرات شدید pH منجر به افت کارایی فرآیند گردید. تحلیل پاسخ‌ها نشان داد که بیشترین بازدهی فرآیند در زمان‌های طولانی‌تر و در غلظت‌های پایین آلاینده، حدود ۵۰۰ نانوگرم بر لیتر، حاصل می‌شود. راندمان واقعی فرآیند تحت شرایط بهینه به ۷۳/۲ درصد رسید. ولتاژ اعمالی نزدیک به ۲۵ کیلوولت نقش مؤثری در تحریک مولکول‌های گازی و تولید گونه‌های رادیکالی ایفا می‌کند که موجب تجزیه زنجیره‌های پلیمری پلی‌پروپیلن می‌گردد. نرخ جریان بهینه برای فرآیند حدود ۱۴ لیتر بر دقیقه تعیین شد؛ به گونه‌ای که افزایش بیش از حد این مقدار باعث کاهش زمان تماس پلاسمای سرد با آلاینده شده و در نتیجه راندمان کاهش می‌یابد. داده‌ها همچنین نشان دادند که pH در محدوده خنثی (حدود ۶/۶) بیشترین کارایی را دارد زیرا در این شرایط پایداری و عمر طولانی‌تر گونه‌های رادیکال فعال حفظ می‌شود؛ در حالی که در محیط‌های اسیدی یا بازی شدید، فعالیت اکسیدکننده‌ها کاهش یافته و بازترکیب گونه‌های واکنش‌پذیر منجر به کاهش راندمان می‌شود. سینتیک واکنش مطابق مدل درجه اول (با مقدار ضریب تعیین R^2 برابر ۰/۹۹۸ است. برای بررسی جزئی‌تر

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

مکانیزم واکنش، آزمایش‌های با مهارکننده‌های رادیکال انجام شد که نتایج آن حاکی از سهم بیشتر رادیکال‌های هیدروکسیل در فرآیند تخریب بوده و نقش مکمل و تقویتی رادیکال‌های سوپراکساید مشخص گردید. مهار مسیرهای وابسته به H_2O_2 تأثیر محدود و ناچیزی بر کاهش راندمان داشت که نشان‌دهنده نقش کم‌اهمیت این مسیر است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که اکسیداسیون مستقیم توسط رادیکال‌های بسیار واکنش‌پذیر، مسیر اصلی تخریب پلی‌پروپیلن در این فرایند است. همچنین اثر یون‌های معدنی متداولی مانند Na^+، K^+، Mg^{2+} و SO_4^{2-} در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بررسی شد که نشان داده شد حضور این یون‌ها بسته به نوع و بار الکتریکی‌شان می‌تواند فرآیند را تحت تأثیر قرار داده و آن را تضعیف یا تقویت کنند. یون‌های چندظرفیتی مانند Mg^{2+} تمایل به کاهش راندمان داشتند، در حالی که آنیون‌های پایدار مانند سولفات تأثیر کمتری بر بازدهی نشان دادند. از لحاظ مصرف انرژی، شاخص‌های مصرف انرژی ویژه و مصرف انرژی ویژه به ازای جرم آلاینده حذف شده به ترتیب برابر با ۲۳۰/۶ کیلوژول بر میلی گرم و ۱۴۷/۳ محاسبه شدند که بیانگر بازدهی بالا و صرفه اقتصادی فرآیند پلاسمای سرد در حذف میکروپلاستیک پلی پروپیلن است. در مجموع، یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که فناوری پلاسمای سرد اتمسفری جهت تجزیه میکروپلاستیک‌های پلی پروپیلن در محیط‌های آبی، روشی مؤثر، سازگار با محیط‌زیست و بدون نیاز به مواد شیمیایی است. مزایای این فناوری شامل قابلیت تنظیم پارامترهای عملیاتی، تولید مستقیم گونه‌های فعال، هزینه‌های پایین و تاثیرات منفی کم بر محیط زیست می‌باشد. علاوه بر این، مصرف انرژی در این فرآیند به حداقل می‌رسد و عملکرد آن در مقیاس‌های صنعتی قابل توسعه است، که این موضوع می‌تواند به توسعه سامانه‌های پلاسمایی در عملیات تصفیه آب‌های آلوده کمک کند.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله صمیمانه از حمایت‌های ارزشمند دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب در اجرای این پژوهش قدردانی می‌شود. پشتیبانی علمی، پژوهشی و فراهم‌سازی امکانات آزمایشگاهی این دانشگاه نقش بسزایی در پیشبرد اهداف تحقیق و تکمیل این پایان‌نامه داشته است. همچنین از اعضای هیأت علمی، کارشناسان آزمایشگاه و مسئولان پژوهشی دانشگاه که با راهنمایی‌ها و همکاری‌های خود زمینه انجام این مطالعه را فراهم کردند، صادقانه سپاسگزاری می‌گردد.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع مالی، علمی یا شخصی در ارتباط با انجام و انتشار این پژوهش وجود ندارد.

حمایت مالی

این پژوهش بدون دریافت هرگونه حمایت مالی از سازمان‌ها، نهادها یا مؤسسات تأمین بودجه انجام شده است.

ملاحظات اخلاقی

این مطالعه مطابق با اصول اخلاقی پژوهش و استانداردهای ملی و بین‌المللی انجام شده است. از آنجا که پژوهش حاضر فاقد هرگونه مداخله انسانی یا استفاده از نمونه‌های انسانی و حیوانی بوده است، نیاز به دریافت کد اخلاق نداشته است.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

مشارکت نویسندگان

تمام نویسندگان در تمامی مراحل پژوهش شامل طراحی مطالعه، گردآوری داده‌ها، تحلیل یافته‌ها و نگارش یا بازنگری نسخه نهایی مقاله مشارکت داشته‌اند و همه مسئولیت صحت و سقم مطالب ارائه‌شده را می‌پذیرند.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

References

1. He D, Zhu T, Sun J, Pan X, Li J, Luo H. Emerging organic contaminants in sewage sludge: Current status, technological challenges and regulatory perspectives. Science of The Total Environment. 2024;955:177234.
2. Cheng L, Fan C, Jin M, Zhang R. Deep eutectic solvent-based framework materials for emerging organic contaminants detection in food: Synthesis techniques, opportunities, and future trends. Microchemical Journal. 2025:112859.
3. Shao D, Zhang B, Zhao W, Feng J, Xu H, Zhu C, et al. Enhanced removal of aromatic emerging contaminants through the electrochemical co-degradation with polystyrene microplastics. Chemical Engineering Journal. 2025;509:161535.
4. Wisniewski FF, Martins EC, Hakoyama DS, Batista LFA, Grassi MT, Zawadzki SF, et al. Microplastics and organic contaminants: Investigation of the sorption process on different polymer types. Journal of Contaminant Hydrology. 2025;272:104567.
5. Jiménez-Skrzypek G, Lusiardi R, González-Sálamo J, Vega-Moreno D, Hernández-Borges J. Insights into emerging organic pollutants extraction from polypropylene, polystyrene, and polyethylene microplastics. Analytica Chimica Acta. 2024;1287:342071.
6. Rahman MM, Sultan MB, Alam M. Microplastics and adsorbed micropollutants as emerging contaminants in landfill: A mini review. Current Opinion in Environmental Science & Health. 2023;31:100420.
7. Ma J, Niu X, Wang G. Optical characteristics and molecular transformation of polypropylene microplastic-derived dissolved organic matter driven by trichloroisocyanuric acid disinfectant. Process Safety and Environmental Protection. 2025:107202.
8. Romphophak P, Faikhaw O, Sairiam S, Thuptimdang P, Coufort-Saudejaud C. Removal of microplastics and nanoplastics in water treatment processes: A systematic literature review. Journal of Water Process Engineering. 2024;64:105669.
9. Muthulakshmi L, Mohan S, Tatarchuk T. Microplastics in water: types, detection, and removal strategies. Environmental Science and Pollution Research. 2023;30(36):84933–48.
10. Park H, Park B. Review of microplastic distribution, toxicity, analysis methods, and removal technologies. Water. 2021;13(19):2736.
11. Cui B, Rong H, Tian T, Guo D, Duan L, Nkinahamira F, et al. Chemical methods to remove microplastics from wastewater: A review. Environmental research. 2024;249:118416.
12. Kim H-J, Lee U, Lee I, Hong Y, Lee J. Enhancement of polystyrene microplastic removal by near dissolved organic matter microfiltration (NDOM MF) coupled with cold plasma treatment. Journal of Water Process Engineering. 2023;54:103901.
13. Velasquez JA, Bao Y, Huang J-Y. Atmospheric cold plasma as a novel approach to remediating microplastics pollution in water. Environmental Pollution. 2024;356:124390.
14. Mehralipour J, Kermani M. Ultrasonic coupling with electrical current to effective activation of Persulfate for 2, 4 Dichlorophenoxyacetic acid herbicide degradation: modeling, synergistic effect, and a by-product study. Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2021;19(1):625–39.
15. Mehralipour J, Kermani M. Optimization of photo-electro/Persulfate/nZVI process on 2–4 Dichlorophenoxyacetic acid degradation via central composite design: a novel combination of advanced oxidation process. Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2021;19(1):941–57.
16. Shim WJ, Hong SH, Eo SE. Identification methods in microplastic analysis: a review. Analytical methods. 2017;9(9):1384–91.
17. Zhou L, Ma R, Yan C, Wu J, Zhang Y, Zhou J, et al. Plasma-mediated aging process of different microplastics: Release of dissolved organic matter and formation of disinfection by-products. Separation and Purification Technology. 2022;303:122143.
18. Khoramipour S, Mehralipour J, Hosseini M. Optimisation of ultrasonic-electrocoagulation process efficiency in the landfill leachate treatment: a novel advanced oxidation process. International Journal of Environmental Analytical Chemistry. 2023;103(19):7587–605.
19. Kadac-Czapska K, Trzebiatowska PJ, Mazurkiewicz M, Kowalczyk P, Knez E, Behrendt M, et al. Isolation and identification of microplastics in infant formulas–A potential health risk for children. Food Chemistry. 2024;440:138246.
20. Zhou M, Zhang L, Wang Z, Jiang Y, Sui Y, Li Z. Impact wear resistance of in-situ TiC particles reinforced Mn18Cr2 steel dual-scale architecture composites. Ceramics International. 2024;50(14):25170–81.
21. Zhu Y, Li Y, Huang J, Zhang Y, Ho YW, Fang JKH, et al. Advanced optical imaging technologies for microplastics identification: progress and challenges. Advanced Photonics Research. 2024;5(11):2400038.
22. Ren J, Li J, Zhen Y, Wang J, Niu Z. Removal of polyvinyl chloride microplastic by dielectric barrier discharge plasma. Separation and Purification Technology. 2022;290:120832.
23. Naciri Y, Chennah A, Jaramillo-Páez C, Navío J, Bakiz B, Taoufyq A, et al. Preparation, characterization and photocatalytic degradation of Rhodamine B dye over a novel Zn3 (PO4) 2/BiPO4 catalyst. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2019;7(3):103075.
24. Pan Y, Zhang Y, Zhou M, Cai J, Tian Y. Enhanced removal of emerging contaminants using persulfate activated by UV and pre-magnetized Fe0. Chemical Engineering Journal. 2019;361:908–18.
25. Toolabi A, Tahergorabi M, Mehralipour J, Seyedi N, Nasseh N. Photocatalytic Degradation of Acetaminophen by g-C3N4/CQD/Ag Nanocomposites from Aqueous Media. Journal of Composites Science. 2025;9(5):197.
26. Siddekha A, HS L, GK P. Plant-mediated synthesis of biocompatible ZnO NPs: comprehensive characterisation and investigation of their catalytic, corrosion inhibition, antibacterial, scavenging and anti-oncogenic activities. Materials Research Innovations. 2025;29(4):215–25.
27. Mehralipour J, Akbari H, Adibzadeh A, Akbari H. Tocilizumab degradation via photo-catalytic ozonation process from aqueous. Scientific Reports. 2023;13(1):22402.
28. Sarangapani C, Ziuzina D, Behan P, Boehm D, Gilmore BF, Cullen P, et al. Degradation kinetics of cold plasma-treated antibiotics and their antimicrobial activity. Scientific reports. 2019;9(1):3955.
29. Nguyen PTT, Nguyen HT, Tran UNP, Manh Bui H. Removal of antibiotics from real hospital wastewater by cold plasma technique. Journal of Chemistry. 2021;2021(1):9981738.
30. Ben Amor I, Hemmami H, Zeghoud S, Zahnit W, Nedjoud G, Ferhat M, et al. Cold plasma technology in wastewater

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]

treatment: mechanisms, applications, and key challenges for organic pollutant removal. International Journal of Environmental Science and Technology. 2025:1–18.
31.Kyere-Yeboah K, Qiao X-c. Application of cold plasma technology for the simultaneous degradation and viscosity removal of polyacrylamide and its copolymers from contaminated wastewater. Journal of Environmental Management. 2024;370:122861.
32.Kazak A, Kirillov A, Simonchik L, Kuraica M, Obradovic B, Sretenovic G. Diagnosis of Bactericidal Components of Air-Plasma Jets by IR and UV Absorption Spectroscopy. Journal of Applied Spectroscopy. 2024;91(3):511–9.
33.Thirumdas R, Sarangapani C, Annapure US. Cold plasma: a novel non-thermal technology for food processing. Food biophysics. 2015;10(1):1–11.
34.Tang S, Yuan D, Rao Y, Zhang J, Qu Y, Gu J. Evaluation of antibiotic oxytetracycline removal in water using a gas phase dielectric barrier discharge plasma. Journal of Environmental Management. 2018;226:22–9.
35.Roomy HM, Al-Gaffer ANA, Khalaf MK. The electrical characteristic of plasma discharge by using different operating conditions in vanadium sputtering system. Al-Nahrain Journal of Science. 2019;22(2):41–8.
36.Shahsavari N, Zhang X. Microbubble-enhanced cold plasma activation for water decontamination: Degradation dynamics and energy yield in relation to pollutant concentration, total volume and flow rate of water. Journal of Water Process Engineering. 2023;55:104169.
37.Van Nguyen D, Ho PQ, Van Pham T, Van Nguyen T, Kim L. Treatment of surface water using cold plasma for domestic water supply. Environmental Engineering Research. 2019;24(3):412–7.
38.Kumar S, Pipliya S, Srivastav PP. Effect of cold plasma on different polyphenol compounds: A review. Journal of Food Process Engineering. 2023;46(1):e14203.
39.Gururani P, Bhatnagar P, Bisht B, Kumar V, Joshi NC, Tomar MS, et al. Cold plasma technology: advanced and sustainable approach for wastewater treatment. Environmental Science and Pollution Research. 2021;28(46):65062–82.
40.Gao Y, Saedi Z, Shi H, Zeng B, Zhang B, Zhang X. Machine learning-assisted optimization of microbubble-enhanced cold plasma activation for water treatment. ACS ES&T Water. 2024;4(2):735–50.
41.Fitzpatrick R. Plasma physics: an introduction: Crc Press; 2022.
42.Pimklang T, Watthanaphanit A, Pakawatpanurut P. Novel green synthesis of graphene oxide-manganese dioxide using solution plasma process for energy storage. Chemical Engineering Journal. 2022;442:136244.
43.Wang J, Zhou X, Li J, Pan D, Du L. Enhancing the functionalities of chickpea protein isolate through a combined strategy with pH-shifting and cold plasma treatment. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2024;93:103607.
44.Baniya HB, Guragain RP, Panta GP, Dhungana S, Chhetri GK, Joshi UM, et al. Experimental studies on physicochemical parameters of water samples before and after treatment with a cold atmospheric plasma jet and its optical characterization. Journal of Chemistry. 2021;2021(1):6638939.
45.Liao X, Liu D, Chen S, Ye X, Ding T. Degradation of antibiotic resistance contaminants in wastewater by atmospheric cold plasma: kinetics and mechanisms. Environmental technology. 2021;42(1):58–71.
46.Hamza IA, El-Kalliny AS, Abd-Elmaksoud S, Marouf MA, Abdel-Wahed MS, El-Liethy MA, et al. Cold atmospheric plasma: a sustainable approach to inactivating viruses, bacteria, and protozoa with remediation of organic pollutants in river water and wastewater. Environmental Science and Pollution Research. 2023;30(54):116214–26.
47.Shams M, Alam I, Chowdhury I. Aggregation and stability of nanoscale plastics in aquatic environment. Water Research. 2020;171:115401.
48.Haghighat G, Sohrabi A, Shaibani PM, Van Neste C, Naicker S, Thundat T. The role of chloride ions in plasma-activated water treatment processes. Environmental Science: Water Research & Technology. 2017;3(1):156–68.
49.Velasquez J. Novel Microplastics Remediation Strategy Using High-Voltage Atmospheric Cold Plasma: Purdue University Graduate School; 2023.
50.Melo TFd, Rocha LC, Silva RP, Pessoa RS, Negreiros AMP, Sales Junior R, et al. Plasma–saline water interaction: a systematic review. Materials. 2022;15(14):4854.
51.Liu J, Deng H, Liu Y, Xie Y. Removal of Polypropylene Microplastics by Using Air Dielectric Barrier Discharges. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025:117273.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.66224/jehe.13.4.367]