ORIGINAL ARTICLE

Sonocatalytic Removal of Diazinon from Aqueous Solutions Using Zinc Oxide Immobilized on Polyethylene Terephthalate

Mahsa Pourrahmati-Shiraz[1]
Azita Mohagheghian[2]
Mehdi Shirzad-Siboni[2]

[1] MSc in Environmental Health Engineering, School of Health, Guilan University of Medical Sciences, Rasht, Iran
[2] Associate Professor, Research Center of Health and Environment, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Guilan University of Medical Sciences, Rasht, Iran

(Received February 20, 2024; Accepted May 11, 2024)

Abstract

Background and purpose: Pesticides are well-known for their carcinogenic, mutagenic, and teratogenic properties, and they exhibit resistance to environmental degradation. Organophosphorus compounds represent one of the largest and most diverse groups of pesticides globally. Diazinon, an organophosphorus pesticide widely used in agriculture, was selected as the target pollutant for the present study.

Materials and methods: The co-precipitation method was employed to synthesize zinc oxide nanocomposites coated on polyethylene terephthalate (PET). Subsequently, the nanoparticle structure was analyzed using XRD, FT-IR, SEM, and EDX analyses. The efficiency of diazinon sonocatalytic removal by zinc oxide nanocomposites coated on PET was investigated, and the impact of various parameters, including pH (3-11), nanocomposite dosage (0.2-2.5 g/L), initial diazinon concentration (5-50 mg/L), contact time (5-60 min), hydrogen peroxide concentration (2-50 mM), different gases (oxygen and nitrogen gas (2 L/min)), organic compounds (folic acid, citric acid, humic acid, EDTA, oxalate acid, phenol), radical scavengers (ammonium oxalate as h^+ scavenger, benzoquinone as $O_2^{\bullet-}$ scavenger, tert-butyl alcohol as $^{\bullet}OH$ scavengers), various processes (PET, US, PET/US, ZnO, ZnO-PET, ZnO/US, ZnO-PET/US), and recycled experiment, was evaluated. Firstly, the pH optimum was acquired to be 5, with changing pH and constant nanocatalyst dosage and initial diazinon concentration. The effects of different parameters on the removal of diazinon were investigated at the constant value of pH. Diazinon residual concentration was measured by a spectrophotometer (UV/VIS, DR5000) at a wavelength of 295 nm.

Results: FT-IR and XRD analyses confirmed the coating of ZnO nanorods onto PET. Under optimal conditions, initial diazinon concentration of 20 mg/L, pH of 5, and nanocomposite dosage of 2.5 g/L for 60 minutes the sonocatalytic removal efficiency of diazinon reached 99.81%. The removal efficiency decreased from 100 to 40.15% as the diazinon concentration increased from 5 to 100 mg/L. The first-order rate constant (k_{obs}) decreased from 0.123 to 0.0086 min^{-1}, while R^2 decreased from 0.985 to 0.9152, and electrical energy per order (E_{Eo}) increased from 181.073 to 2589.77 $kWh.m^{-3}$ with increasing diazinon concentration. The sonocatalytic removal of diazinon increased with rising H_2O_2 concentration up to 5 mM. However, the addition of organic compounds and nitrogen gas led to a decrease in diazinon removal efficiency. The effectiveness of processes for pesticide removal from drinking water decreased due to anions scavenger activity. Examination of radical scavengers revealed that •OH radicals were the most active in diazinon removal. Notably, proper sonocatalytic activity in diazinon removal was observed even after six successive cycles. Intermediate products identified by GC-MS in the sonocatalytic removal process included diazoxon, IMP, hydroxy-diazinon, and diazinon-methyl-ketone.

Conclusion: The findings suggest that zinc oxide coated on polyethylene terephthalate, as an affordable, practical, and environmentally friendly material, exhibits satisfactory efficiency for the sonocatalytic removal of diazinon from water environments.

Keywords: diazinon, advanced oxidation processes, zinc oxide-polyethylene terephthalate, sonolysis, kinetic

J Mazandaran Univ Med Sci 2024; 34 (233): 163-181 (Persian).

Corresponding Author: Mehdi Shirzad-Siboni - Research Center of Health and Environment, Guilan University of Medical Sciences, Rasht, Iran (E-mail: mshirzadsiboni@gums.ac.ir)

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

پژوهشی

مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران
دوره سی و چهارم شماره ۲۳۳ خرداد سال ۱۴۰۳ (۱۸۱-۱۶۳)

حذف سونوکاتالیستی دیازینون از محیط های آبی با استفاده از نانوذرات اکسید روی پوشش داده شده بر روی پلی اتیلن ترفتالات

مهسا پور رحمتی شیراز[۱]
آزیتا محققیان[۲]
مهدی شیرزاد سیبنی[۲]

چکیده

سابقه و هدف: آفت‌کش‌ها به‌عنوان ترکیبات سرطان‌زا، جهش‌زا و ناهنجاری‌زا به خوبی شناخته شده هستند و در برابر تخریب در محیط مقاوم هستند. ترکیبات ارگانوفسفره از بزرگ‌ترین و متنوع‌ترین گروه آفت‌کش‌ها در جهان هستند. دیازینون به عنوان یک آفت‌کش ارگانوفسفره، به‌طور گسترده در کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد و در مطالعه حاضر به‌عنوان آلاینده هدف مورد آزمایش قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه تجربی، روش هم‌رسوبی برای تولید نانوکامپوزیت اکسید روی پوشش داده شده بر روی پلی‌اتیلن‌ترفتالات مورد استفاده قرار گرفت. سپس ساختار نانوکامپوزیت توسط آنالیزهای XRD، FT-IR، SEM و EDX مورد بررسی قرار گرفت و پس از آن کارایی حذف سونوکاتالیستی دیازینون توسط نانوکامپوزیت اکسید روی-پلی‌اتیلن‌ترفتالات بررسی گردید و تاثیر پارامترهای مختلف شامل، pH اولیه (۱۱-۳)، مقدار نانوکامپوزیت (۲/۵ g/L-۰/۲)، غلظت اولیه ی دیاینون (۵۰ mg/L-۵)، زمان تماس (۶۰-۵ دقیقه)، پراکسید هیدروژن (۵۰ mM-۲)، گازهای مختلف (اکسیژن و نیتروژن (۲ L/min))، ترکیبات آلی (فولیک اسید، سیتریک اسید، هیومیک اسید، اتیلن دی آمین ترا اسیدیک اسید، اسید اگزالات، فنل)، به دام انداز های رادیکالی (بنزوکینون (BQ)، آمونیوم اگزالات (AO)، ترت بوتیل الکل (TBA)، به‌ترتیب به‌عنوان به دام انداز سوپراکسید ($O_2^{\cdot-}$)، حفره(h^+) و هیدروکسیل (OH))، فرایندهای مختلف (پلی‌اتیلن ترفتالات، امواج اولتراسونیک، پلی‌اتیلن‌ترفتالات/ امواج اولتراسونیک، اکسیدروی، اکسیدروی-پلی‌اتیلن‌ترفتالات، اکسید روی/ امواج اولتراسونیک، اکسید روی-پلی‌اتیلن‌ترفتالات/ امواج اولتراسونیک) و آزمایش بازیافتی مورد ارزیابی قرار گرفت. ابتدا با تغییر دادن pH نمونه‌ها و ثابت نگه‌داشتن مقدار نانوکاتالیست و غلظت اولیه دیازینون، مقدار بهینه pH برابر ۵ به دست آمد. سپس با ثابت نگه داشتن pH نمونه‌ها، کارایی سایر پارامترها بر روی حذف دیازینون مورد بررسی قرار گرفت. اندازه‌گیری غلظت باقیمانده دیازینون توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (UV/VIS, DR5000) در طول موج ۲۹۵ nm صورت گرفت.

یافته‌ها: نتایج حاصل از آنالیز FT-IR و XRD پوشش داده شدن نانوذرات اکسید روی بر روی پلی‌اتیلن‌ترفتالات را تایید کرد. در شرایط بهینه غلظت اولیه‌ی دیازینون برابر با ۲۰ mg/L، pH برابر با ۵ و مقدار نانوکامپوزیت برابر با ۲/۵ g/L در مدت زمان ۶۰ دقیقه کارایی حذف سونوکاتالیستی دیازینون ۹۹/۸۱ درصد به دست آمد. با افزایش غلظت اولیه دیازینون از ۵ به ۵۰ mg/L کارایی حذف از ۱۰۰ به ۴۰/۱۵ درصد، ضریب ثابت سینتیکی درجه‌ی یک از ۰/۱۲۳ به ۰/۰۰۸۶ min^{-1} و ضریب رگرسیون (R^2) از ۰/۹۸۵ به ۰/۹۱۵۲ کاهش و مقدار انرژی مصرفی از ۱۸۱/۰۷۳ به ۲۵۸۹/۷۷ $kWh.m^{-3}$ افزایش یافت. با افزودن پراکسید هیدروژن تا ۵ mM کارایی حذف دیازینون افزایش یافت. کارایی حذف در حضور انواع ترکیبات آلی و گاز نیتروژن کاهش یافت. به‌طورکلی کارایی فرآیند در حذف دیازینون از آب شهری به دلیل فعالیت رادیکال خواری آنیون‌های موجود کاهش یافت. هم‌چنین آزمایشات مربوط به به‌دام اندازهای رادیکال نشان داد که موثرترین رادیکال در حذف دیازینون رادیکال هیدروکسل است، به‌طور کلی کارایی حذف دیازینون برابر با سیکل اول بعد از سیکل ششم مشاهده گردید. ترکیبات واسطه حذف سونوکاتالیستی دیازینون، دیازوکسون، ۲-ایزوپروپیل-۶-متیل-۴-پیریمیدینول(IMP)، هیدروکسی دیازینون و دیازینون متیل کتون با استفاده از دستگاه GC-MS تعیین گردید.

استنتاج: نتایج حاکی از آن بود که اکسید روی-پلی اتیلن ترفتالات به‌عنوان ماده‌ای ارزان، کاربردی و دوستدار محیط زیست، کارایی قابل قبول برای حذف سونوکاتالیستی دیازینون از محیط‌های آبی را دارد.

واژه های کلیدی: دیازینون، اکسیداسیون پیشرفته، اکسید روی-پلی‌اتیلن‌ترفتالات، سونولیز، سینتیک

مولف مسئول: مهدی شیرزاد سیبنی- رشت: دانشگاه علوم پزشکی گیلان، مرکز تحقیقات بهداشت و محیط زیست E-mail: mshirzadsiboni@gums.ac.ir
۱. کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی گیلان، رشت، ایران
۲. دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات بهداشت و محیط زیست، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی گیلان، رشت، ایران
تاریخ دریافت : ۱۴۰۲/۱۲/۱ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات : ۱۴۰۳/۲/۱ تاریخ تصویب : ۱۴۰۳/۲/۲۲

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

مقدمه

آب یکی از اجزای مهم چرخه زندگی محسوب می‌شود که حفظ کیفیت، نگهداری و توسعه آن از اهمیت زیادی برخوردار است. این سرچشمه حیات در اثر ورود مستقیم و یا تأثیر غیرمستقیم آلاینده‌ها آلوده می‌شود. یکی از این آلاینده‌ها آفت کش‌ها هستند که به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای تأمین نیازهای غذایی جمعیت درحال رشد جهان، توسعه وکاربرد فراوانی یافته‌اند(۲،۱). ترکیبات ارگانوفسفره، بزرگ‌ترین و متنوع‌ترین گروه آفت‌کش‌های موجود هستند و حدود ۴۰ درصد آفت کش‌های ثبت شده در جهان را تشکیل می‌دهند(۴،۳). آفت‌کش‌ها سرطان زا، جهش‌زا و ناهنجاری‌زا شناخته شده‌اند و به تخریب در محیط زیست مقاوم هستند(۶،۵). دیازینون یک آفت‌کش ارگانوفسفره است و به طور گسترده برای کنترل حشرات در خاک، گیاهان و اهداف عمومی دیگر استفاده می‌شود(۹-۷). دیازینون توسط سازمان جهانی بهداشت(WHO) به‌عنوان آلاینده متوسط سمی کلاس ۲ طبقه‌بندی می‌شود(۱۲-۱۰). طبق گزارش سازمان جهانی بهداشت (WHO) و آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده (US EPA)، حداکثر غلظت مجاز دیازینون در آب آشامیدنی ۰/۱ میکروگرم در لیتر است(۱۱). چندین فرآیند متداول مثل جذب، کوآگولاسیون شیمیایی، فرآیندهای غشایی و اصلاح زیستی برای حذف دیازینون از فاضلاب‌ها وجود دارد. با این حال متدهای ذکر شده، فقط آلاینده‌ها را از فاز مایع به فاز جامد انتقال می‌دهند و زائدات ثانویه‌ای تولید می‌کنند که نیازمند تصفیه بیش‌تر است(۱۳). در دهه‌های اخیر، فرآیند اکسیداسیون پیشرفته (AOP) به دلیل تولید رادیکال‌های بسیار اکسیدکننده در شرایط محیطی، به‌عنوان یک روش موثر، ساده و امیدوارکننده برای تصفیه پساب‌ها و هم‌چنین حذف آلاینده‌های مقاوم و سمی از فاضلاب مورد توجه قرار گرفته است(۱۵،۱۴). سونولیز به‌عنوان یکی از فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، به‌علت عدم نیاز به مواد شیمیایی به‌طور گسترده‌ای در فناوری نانو مورد توجه قرار گرفته است(۱۶). امواج مافوق صوت با پدیده کاویتاسیون صوتی باعث ایجاد حباب‌هایی با ابعاد میکرو در محلول‌های آبی می‌شوند که رشد و فروپاشی این حباب‌ها باعث آزاد شدن انرژی زیادی می‌شود و نقاط داغ کوچکی با فشار زیاد ایجاد می‌کند. این نقاط داغ در کسری از ثانیه آلاینده‌ها را از بین می‌برند(۱۹-۱۷). استفاده از امواج مافوق صوت به تنهایی اثر بخش نیستند و دارای معایبی از جمله نیاز به زمان واکنش و انرژی الکتریکی بیش‌تر است. بنابراین، یکی از راه‌های حل این مشکلات استفاده از نیمه هادی‌های کاتالیزوری است(۲۰). با حضور نانوکاتالیزورها در حین سونولیز، می‌توان کارایی سونوکاتالیستی را با ایجاد نقاط فعال بیش‌تر برای هسته‌زایی، رشد و انفجار میکروحباب‌ها، که منجر به تولید رادیکال‌های واکنش‌پذیر بیش‌تر می‌شود، افزایش داد(۲۱). علاوه بر این، نانوذرات با اندازه کوچک‌تر از حباب‌های کاویتاسیون، می‌توانند به راحتی وارد منطقه بین حباب‌ها و آب شوند و به‌عنوان یک حامل و انتقال‌دهنده، آلاینده را با حباب‌ها تماس دهند(۲۲). اندازه کوچک نانوذرات، موجب توزیع زیرسطحی مؤثر و آسان آن‌ها شده در حالی که سطح مقطع بزرگ آن‌ها سبب واکنش‌پذیری بالا و تخریب سریع آلاینده‌ها می‌شود. نانوذرات آلاینده‌ها را به محصولات کم‌خطر احیا نموده و سپس آن‌ها را بر روی خود جذب می‌کنند(۲۳). در میان کاتالیزورها، اکسید روی یک اکسید نیمه‌رسانا با گاف انرژی گسترده (۳ eV) به‌دلیل ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاص، هزینه کم و غیر سمی بودن، به‌طور گسترده برای حذف آلاینده‌ها در فرآیند سونوکاتالیستی استفاده می‌شود(۲۶-۲۴)، با این حال، به‌دلیل جداسازی و بازیابی دشوار اکسید روی از محلول، استفاده از آن به‌عنوان کاتالیزور در تصفیه فاضلاب محدود است. برای حل این مشکلات، نانوذرات توسط مواد دیگر دوپ یا اصلاح می‌شوند که منجر به تثبیت اکسید روی بر روی بسترهای جامد مختلف می‌شود. برای تثبیت اکسید روی

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

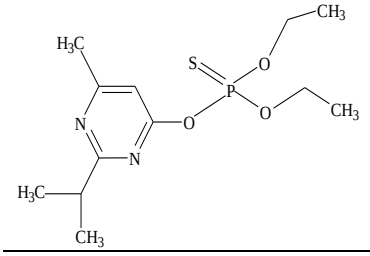
می‌توان از جاذب‌های طبیعی یا مواد بی‌اثر به‌عنوان تکیه‌گاه استفاده کرد. از ویژگی‌های یک تکیه‌گاه مناسب می‌توان به قیمت پایین، مقاومت، دوام، لختی و سطح قابل توجه اشاره کرد(۲۷). پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) یکی از بزرگ‌ترین مواد پلیمری است که قابلیت بازیافت دارد. ازجمله کابردهای پلی‌اتیلن ترفتالات استفاده از آن در ساخت بطری‌های آب معدنی است. به دلیل استفاده گسترده از بطری‌های آب معدنی و هم‌چنین عدم تجزیه زیستی، پلی‌اتیلن ترفتالات به یک مشکل بزرگ زیست محیطی تبدیل شده است(۲۸،۲۹). بنابراین می‌توان از آن به‌عنوان پشتیبان مناسب برای نانوذرات استفاده کرد و با آن‌ها مخلوط کرد تا نانوکامپوزیت‌هایی با خواص فیزیکی و شیمیایی کارآمد تولید کند(۳۰).

هدف اصلی از انجام این تحقیق، سنتز نانوکامپوزیت اکسید روی پوشش داده شده بر روی پلی‌اتیلن ترفتالات و کارایی آن در حذف سونوکاتالیستی دیازینون از محیط‌های آبی در حضور امواج مافوق صوت است. پارامترهای اصلی مؤثر در انجام این فرآیند، شامل تغییرات pH، مقدار نانوکامپوزیت، تغییرات غلظت اولیه دیازینون، زمان تماس، تأثیر پراکسید هیدروژن، تأثیر گاز اکسیژن و نیتروژن، تأثیر ترکیبات آلی، تاثیر به دام اندازهای رادیکال، تاثیر فرآیندهای مختلف، تاثیر آب شرب و آزمایش بازیافتی است. هم‌چنین سینتیک واکنش مورد مطالعه با معادلات درجه صفر، یک و دو و انرژی مصرفی نیز به منظور بررسی جنبه‌ی اقتصادی کار بررسی گردید.

مواد و روش ها

کلیه مواد شیمیایی با درصد خلوص بالا (۹۹ درصد≤) شامل کلرید روی، سدیم هیدروکسید، هیدروکلریک اسید، پراکسید هیدروژن، ترکیبات آلی و رادیکال خوارها از شرکت مرک آلمان و سم دیازینون نیز از شرکت سیگما آلدریچ خریداری گردید. امواج مافوق صوت توسط دستگاه اولتراسونیک (Elmasonic P60H، آلمان) برای فرآیندهای سونوکاتالیستی تولید شد. ساختار و مشخصات دیازینون در جدول شماره ۱ قابل مشاهده است.

جدول شماره ۱: ساختار و مشخصات دیازینون

نام	دیازینون (Diazinon)
حداکثر طول موج جذب(nm)	۲۹۵
وزن مولکولی (g/ mol)	۳۰۴/۳
دانسیته(g/ml) (20 °C)	۱/۱۱
ساختار مولکولی	

سنتز نانوکامپوزیت اکسید روی پوشش داده شده بر روی پلی‌اتیلن ترفتالات

در ابتدا بطری‌های بازیافتی از جنس پلی‌اتیلن ترفتالات پس از شستشو با آب مقطر خشک گردیده و توسط خردکن به قطعات بسیار کوچک بین ۳-۱ میلی‌متر تبدیل گردید. سپس ۱۰ گرم از پلی‌اتیلن ترفتالات خرد شده همراه با پراکسید هیدروژن ۲ درصد وارد راکتور اتوکلاو هیدروترمال ۱۰۰ میلی‌لیتر شد و راکتور درون فور با درجه حرارت ۱۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۷ ساعت قرار داده شد. سپس پلی‌اتیلن ترفتالات تولید شده از درون راکتور خارج و سپس خشک و پودر گردید. در مرحله بعد، محلول استوک کلریدروی (۰/۱ مولار) و سدیم هیدروکسید (۰/۲ مولار) توسط حل کردن کلرید روی و سدیم هیدروکسید به طور مجزا در آب مقطر تهیه گردید. پودر پلی‌اتیلن ترفتالات به نسبت ۱:۱ با محلول کلرید روی مخلوط گردید. برای ایجاد شرایط قلیایی، محلول سدیم هیدروکسید تولید شده برای تولید کامپوزیت اکسیدروی-پلی‌اتیلن ترفتالات به‌صورت قطره‌ای به محلول اضافه شد و به وسیله یک همزن مغناطیسی هم زده شد. سپس سوسپانسیون برای جداسازی ناخالصی‌ها توسط آب مقطر آب‌کشی شد و در فور در ۱۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۴ ساعت خشک گردید و

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

سپس پودر شد و نانوکامپوزیت تولید شده در مراحل بعد مورد استفاده قرار گرفت(۳۱).

آزمایشات ناپیوسته

عوامل مورد بررسی در این پژوهش شامل pH اولیه (۱۱-۳)، مقدار اولیه نانوکاتالیست (۰/۲-۲/۵ g/L)، غلظت اولیه دیازینون (۵۰-۵ mg/L)، تاثیر پراکسید هیدروژن (۵۰-۲ mM)، انواع گاز (اکسیژن و نیتروژن (۲ L/min))، غلظت اولیه ترکیبات آلی (فولیک اسید، سیتریک اسید، هیومیک اسید، اتیلن دی آمین تترا اسیدیک اسید، اسید اگزالات، فنل) هر کدام ۲۰ mg/L و زمان واکنش ۵ تا ۶۰ دقیقه هستند. بهینه‌سازی متغیرها با استفاده از روش یک عامل در زمان (OFAT) انجام شد. ابتدا با تغییر دادن pH نمونه‌ها و ثابت نگه داشتن مقدار نانوکاتالیست و غلظت اولیه دیازینون، مقدار بهینه pH برابر ۵ به‌دست آمد. سپس با ثابت نگه داشتن pH نمونه‌ها، کارایی سایر پارامترها بر روی حذف دیازینون مورد بررسی قرار گرفت. حذف سونوکاتالیستی دیازینون در داخل راکتور اولتراسونیک انجام شد. قبل از شروع فرآیند، برای رسیدن به تعادل جذب-واجذب، محلول شامل دیازینون و نانوکامپوزیت به‌مدت ۳۰ دقیقه در اتاق تاریک قرار گرفتند. سپس دستگاه اولتراسونیک برای انجام روش سونوکاتالیستی روشن شد. نمونه‌برداری در فواصل زمانی مشخص به‌مدت ۶۰ دقیقه و جداسازی نانوکاتالیست از نمونه‌ها توسط دستگاه سانتریفیوژ (Sigma-301، آلمان) با ۴۰۰۰ rpm به‌مدت ۳ دقیقه انجام شد. سپس اندازه‌گیری باقیمانده دیازینون توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (UV/VIS, DR 5000) در طول موج ۲۹۵ nm بر اساس کتاب روش‌های استاندارد برای آزمایشات آب و فاضلاب صورت گرفت(۳۲). هم‌چنین مطالعات سینتیکی و محاسبات انرژی الکتریکی (E_{EO}) برای تخمین بهره‌وری اقتصادی سیستم انجام شد. تمامی معادلات مربوط به محاسبات سینتیک واکنش، مدل لانگمویر- هینشلوود، انرژی الکتریکی و پارامترهای مربوطه در جدول شماره ۲ نشان داده شده است(۳۳). علاوه بر این، در شرایط بهینه، آزمایش قابلیت استفاده مجدد نانوکامپوزیت، به دام‌اندازهای رادیکال و تاثیر فرایندهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت و کارایی نانوکامپوزیت اکسید روی-پلی‌اتیلن‌ترفتالات در حضور تابش اولتراسونیک برای حذف دیازینون از آب آشامیدنی مورد مطالعه قرار گرفت. برای تعیین مواد واسطه تشکیل شده در شرایط بهینه با استفاده از دستگاه GC-MS ابتدا نمونه‌ها با روش استخراج مایع-مایع برای تزریق به دستگاه کروماتوگراف گازی با اسپکترومتر جرمی آماده گردید. به این صورت که ۲mL حلال هگزان به ۵ mL نمونه موجود در لوله آزمایش اضافه شد و توسط ورتکس به مدت ۵ دقیقه مخلوط شد. پس از ساکن شدن لوله به مدت ۱۵ دقیقه، ۱۰ µL نمونه از حلال برداشته و به دستگاه کروماتوگراف گازی مدل (Agilent Technologies 7890A) و با مدل دمایی (حد نهایی دمای ستون ۲۸۰ °C، دمای دتکتور ۲۷۰ °C، دمای انژکتور ۲۵۰ °C، دمای اولیه کوره ۵۰ °C، دمای نهایی کوره ۲۸۰ °C، شیب دمایی کوره (۱۵°C/min) تزریق و سنجش گردید و در نهایت محصولات جانبی مطابق با دایره المعارف دستگاه مشخص شدند.

جدول شماره ۲: معادلات مورد استفاده در مطالعات سینتیکی و انرژی مصرفی

پارامترها و واحدهای آن‌ها	انرژی مصرفی	مدل های سینتیکی	
C_0(mg/L)			
C_t(mg/L)		درجه ی صفر	$C_0 - C_t = K_0 t$
K_0 (mol/L.min)	$E_{EO} = \frac{38.4 \times P}{V \times K_{obs}}$	درجه ی یک	$\ln(\frac{C_0}{C_t}) = K_{obs} t$
K_{obs}(1/ min)		درجه ی دو	$\frac{1}{C_t} - \frac{1}{C_0} = K_2 t$
K_2 (L/mol.min)			
K_C (mg/L.min)		لانگمویر-هینشلوود	
K_e (L/mg)	$E_{EO} = \frac{P \times t \times 1000}{V \times 60 \times \log(C_i/C_f)}$		$-\frac{d[C]}{dt} = \frac{K_c K_e [C]}{1 + K_e [C]_0} = K_{obs}[C]$
P (kW)			
V(L)			$\frac{1}{K_{obs}} = \frac{1}{K_c K_e} + \frac{[C]_0}{K_c}$
E_{EO} (kWh/m^3)			

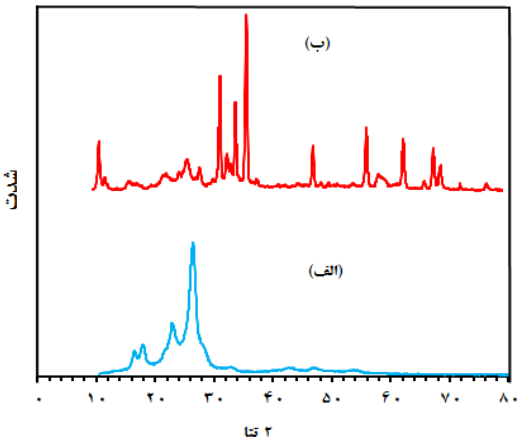
یافته‌ها

مشخصات نانوکامپوزیت اکسید روی-پلی‌اتیلن‌ترفتالات

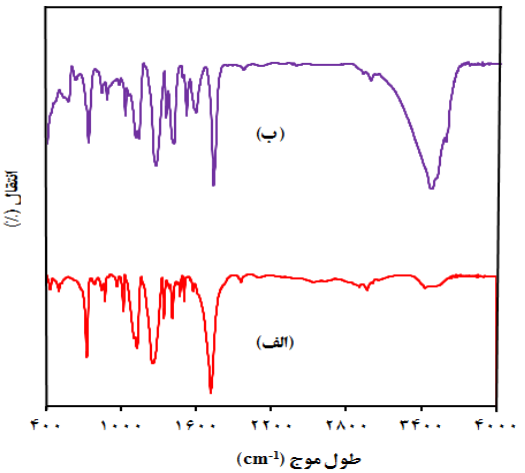
پس از سنتز نانوکامپوزیت، آنالیز پراش اشعه‌ی

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

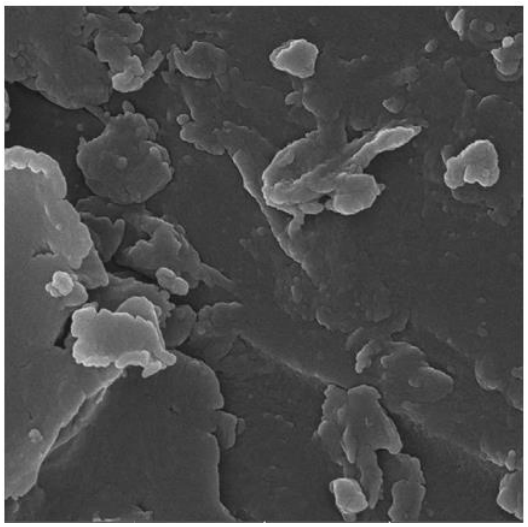
ایکس (XRD) برای تعیین ساختار کریستالی و اندازه‌ی نانو ذرات(نمودار شماره ۱)، آنالیز طیف سنجی تبدیل فوریه‌ی مادون قرمز (FT-IR) برای تعیین گروه‌های عاملی بر سطح نانو ذرات(نمودار شماره ۲)، آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای تعیین شکل و اندازه‌ی نانو ذرات (تصویر شماره ۱)، آنالیز پراش انرژی اشعه‌ی ایکس (EDX) برای تعیین عناصر موجود در مواد سنتز شده (تصویر شماره ۳)، و آنالیز pH نقطه‌ی ایزوالکتریک (pH_{pzc}) برای بررسی مشخصات بار سطحی نانو ذرات با روندی که در مطالعه‌ی فرخی و همکاران ذکر شده انجام شد(۳۴).



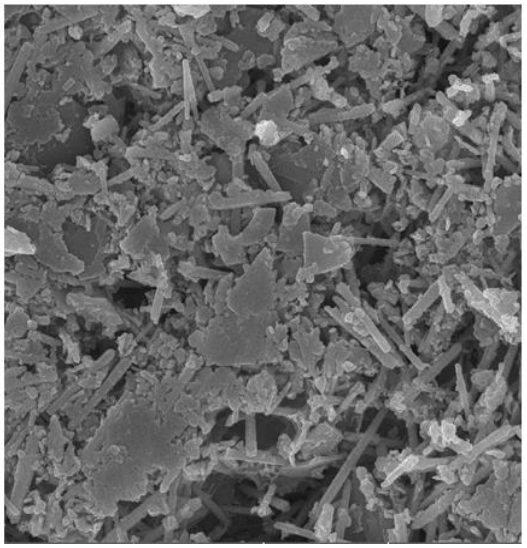
نمودار شماره ۱: تصویر XRD از نمونه‌ها (الف): پلی‌اتیلن‌ترفتالات (ب): نانوذرات اکسیدروی پوشش داده بر روی پلی‌اتیلن‌ترفتالات



نمودار شماره ۲: تصویر FT-IR از نمونه‌ها (الف): پلی‌اتیلن‌ترفتالات (ب): نانوذرات اکسیدروی پوشش داده بر روی پلی‌اتیلن‌ترفتالات

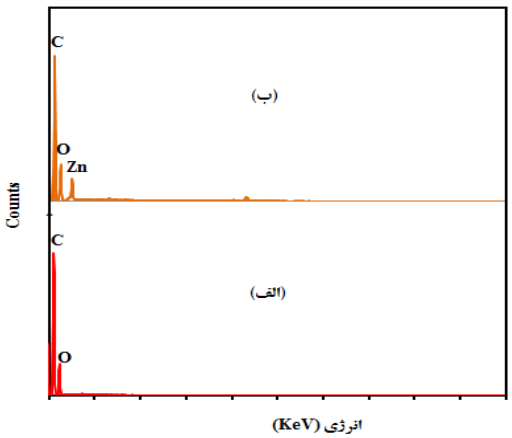


(الف)



(ب)

تصویر شماره ۱: تصویر SEM از نمونه‌ها (الف): پلی‌اتیلن‌ترفتالات (ب): نانوذرات اکسیدروی پوشش داده بر روی پلی‌اتیلن‌ترفتالات

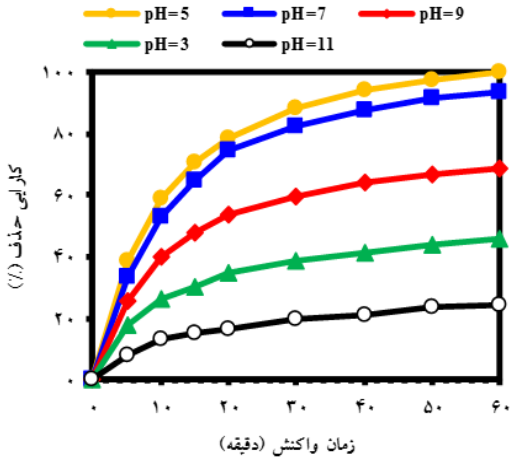


نمودار شماره ۳: تصویر EDX از نمونه ها (الف): پلی‌اتیلن‌ترفتالات (ب): نانوذرات اکسیدروی پوشش داده بر روی پلی‌اتیلن‌ترفتالات

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

تأثیر pH اولیه

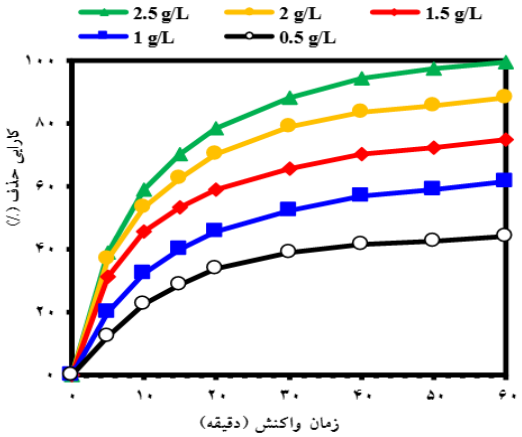
به منظور بررسی تأثیر pH اولیه بر کارایی حذف دیازینون محلول‌هایی با pH های مختلف(۱۱-۳) تهیه شد. پارامترهای دیگر شامل غلظت اولیه‌ی دیازینون، برابر با ۲۰ mg/L و مقدار اولیه‌ی نانوکاتالیست، برابر با ۲/۵ g/L ثابت در نظر گرفته شد و در زمان‌های مختلف، نمونه برداری انجام شد. نتایج حاصل از تأثیر این پارامتر در نمودار شماره ۴، نشان داده شده است. همان طور که از نمودار مشاهده می‌گردد، pH بهینه برای حذف دیازینون برابر با ۵ تعیین گردید.



نمودار شماره ۴: تأثیر pH اولیه بر کارایی حذف سونوکاتالیستی دیازینون (غلظت اولیه‌ی دیازینون برابر با ۲۰mg/L، مقدار اولیه‌ی نانوکامپوزیت برابر با ۲/۵ g/L)

تأثیر مقدار اولیه‌ی نانوکامپوزیت

تأثیر مقدار اولیه‌ی نانوکامپوزیت بر کارایی حذف دیازینون در سیستم مورد مطالعه، با تغییر در مقدار اولیه‌ی نانو کامپوزیت در محدوده (۲/۵ g/L- ۰/۵) و ثابت در نظر گرفتن غلظت اولیه‌ی دیازینون برابر با ۲۰mg/L و pH اولیه برابر با ۵ در زمان‌های تماس مختلف، بررسی شد. نتایج حاصل از تأثیر این پارامتر در نمودار شماره ۵، نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، مشاهده می‌گردد که بیش‌ترین کارایی حذف برای دیازینون در ۲/۵ g/L با کارایی ۹۹/۸۱ درصد، به‌دست آمده است.



نمودار شماره ۵: تأثیر مقدار اولیه‌ی نانوکامپوزیت بر کارایی حذف سونوکاتالیستی دیازینون (غلظت اولیه‌ی دیازینون برابر با ۲۰ mg/L، pH اولیه برابر با ۵)

تأثیر غلظت اولیه‌ی دیازینون

تأثیر غلظت اولیه‌ی دیازینون بر کارایی حذف آن در سیستم مورد مطالعه، با تغییر در غلظت اولیه دیازینون برابر با (۵۰mg/L-۵) در شرایط ثابت مقدار اولیه‌ی نانوکاتالیست برابر با ۲/۵ g/L و pH اولیه برابر با ۵، در زمان‌های تماس مختلف بررسی شد. نتایج حاصله در نمودار شماره ۶، نشان داده شده است. همان طورکه در این نمودار مشاهده می‌گردد، با افزایش غلظت اولیه‌ی دیازینون از ۵ mg/L تا ۵۰ پس از ۶۰ دقیقه،کارایی حذف به ترتیب از ۱۰۰ به ۴۰/۱۵ درصد کاهش یافت. در ادامه آزمایشات برای بررسی کارایی حذف دیازینون در غلظت برابر با ۲۰ mg/L با کارایی حذف ۹۹/۸۱ درصد انجام شد. پارامترهای سینتیکی درجه‌ی صفر، یک و دو برای حذف سونوکاتالیستی دیازینون، در غلظت‌های اولیه‌ی متفاوت دیازینون در جدول شماره ۳ نشان داده شده است.

تأثیر غلظت اولیه ی پراکسید هیدروژن

انتخاب مقدار بهینه‌ی پراکسید هیدروژن، به دلیل افزایش عملکرد سونوکاتالیستی، دارای اهمیّت است. نتایج حاصل از تأثیر غلظت اولیه‌ی پراکسید هیدروژن بر کارایی حذف دیازینون در شرایط بهینه، در نمودار شماره ۷، نشان داده شده است. همان طور که مشاهده

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

می‌گردد، با افزودن پراکسید هیدروژن تا ۵ mM کارایی حذف دیازینون افزایش می‌یابد و به‌طور کامل حذف می‌گردد، اما با افزایش پراکسید هیدروژن به بیش‌تر از ۵ mM کارایی حذف به طور قابل توجهی کاهش یافت.

تأثیر گاز اکسیژن و نیتروژن

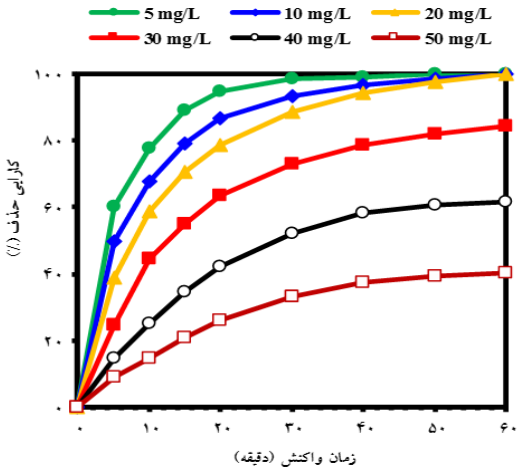
تأثیر گازهای مختلف بر کارایی حذف دیازینون در شرایط بهینه و نرخ جریان گاز اکسیژن و نیتروژن برابر با ۲ L/min بررسی شد. با توجه به نمودار شماره ۸ کارایی حذف دیازینون در شرایط محیطی، با افزایش زمان تماس تا ۶۰ دقیقه، به ۹۹/۸۱ درصد افزایش یافت، در حالی که دیازینون در حضور گاز اکسیژن به طور کامل حذف شد ولی در حضور گاز نیتروژن کارایی به ۸۲/۵۷ درصد کاهش یافت.

تأثیر ترکیبات آلی مختلف

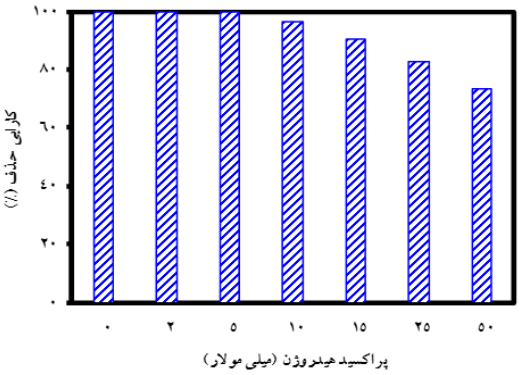
برای بررسی تأثیر ترکیبات‌آلی مختلف برکارایی حذف دیازینون، آزمایشات در حضور ترکیبات آلی مختلف با غلظت برابر با ۲۰ mg/L، در شرایط بهینه انجام شد. نتایج حاصله در نمودار شماره ۹، نشان داده شده است. همان طورکه مشاهده می‌گردد،کارایی حذف سونوکاتالیستی دیازینون در شرایط عدم حضور ترکیبات آلی (۹۹/۸۱ درصد)، در حضور هیومیک اسید (۶۲/۷۳ درصد)، فنل (۷۸/۴۱ درصد)، اتیلن دی آمین ترا استیک اسید (۸۲/۳۲ درصد)، اگزالیک اسید (۸۰/۱۲ درصد)، فولیک اسید (۹۲/۲۱ درصد) و سیتریک اسید (۷۰/۱۱ درصد) بود.

جدول شماره ۳: پارامترهای سینتیکی در حذف سونوکاتالیستی دیازینون در غلظت‌های اولیه‌ی متفاوت (مقدار اولیه‌ی نانوکاتالیست برابر با ۲/۵ g/L و pH اولیه برابربا ۵)

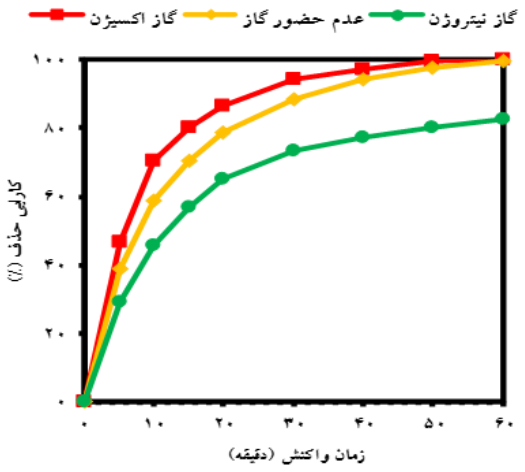
غلظت	درجه صفر			درجه یک				درجه دو	
$mg.L^{-1}$	K_0 $(mol.L^{-1}.min^{-1})$	R^2	K_{obs} (min^{-1})	K_{obs}^{-1} (min)	E_{EO} $(KWh.m^{-3})$	R^2	K_2 $(L.mol^{-1}.min^{-1})$	R^2
۵	۰/۰۵۵۴	۰/۴۹۴۶	۰/۱۲۳	۸/۱۳۰۱	۱۸۱/۰۷۳	۰/۹۸۵	۰/۶۳۳	۰/۸۴۸۷
۱۰	۰/۱۲۳۱	۰/۶۲۱۶	۰/۰۸۳۸	۱۱/۹۳۳	۲۶۵/۷۷۶	۰/۹۹۱۸	۰/۱۴۲۷	۰/۷۳۳۷
۲۰	۰/۲۶۹۶	۰/۷۲۹۳	۰/۰۸۹۸	۱۱/۱۳۶	۲۴۸/۰۱۸	۰/۹۳۳۴	۰/۲۷۵۱	۰/۴۴۸۵
۳۰	۰/۳۶۷۱	۰/۷۸۶۲	۰/۰۳۰۴	۳۲/۸۹۵	۷۳۲/۶۳۲	۰/۹۴۶	۰/۰۰۳۱	۰/۹۹۹
۴۰	۰/۳۸۹۵	۰/۸۵۶۷	۰/۰۱۶۲	۶۱/۷۲۸	۱۳۷۴/۸۱	۰/۹۲۳۹	۰/۰۰۰۷	۰/۹۶۴۶
۵۰	۰/۳۲۵	۰/۸۸۰۷	۰/۰۰۸۶	۱۱۶/۲۸	۲۵۸۹/۷۷	۰/۹۱۵۲	۰/۰۰۰۲	۰/۹۴۱۹



نمودار شماره ۶: تأثیر غلظت اولیه‌ی دیازینون بر کارایی حذف سونوکاتالیستی آن (مقدار اولیه‌ی نانوکامپوزیت برابر با ۲/۵ g/L، pH اولیه برابر با ۵)

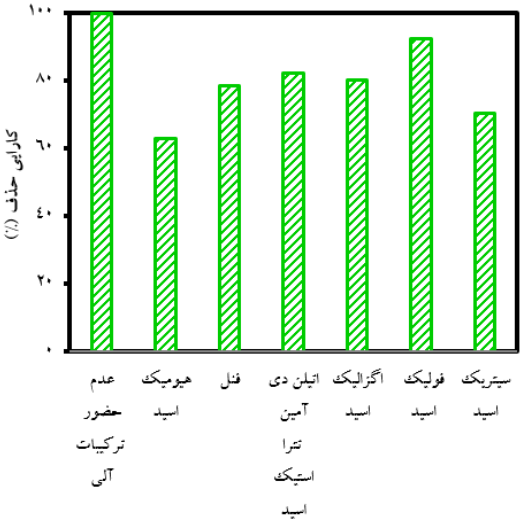


نمودار شماره ۷: تأثیر حضور هیدروژن پراکسید بر کارایی حذف سونوکاتالیستی دیازینون (غلظت اولیه‌ی دیازینون برابر با ۲۰ mg/L، مقدار اولیه‌ی نانوکامپوزیت برابر با ۲/۵ g/L و pH اولیه برابر با ۵)



نمودار شماره ۸: تأثیر گاز اکسیژن و نیتروژن بر کارایی حذف سونوکاتالیستی دیازینون (غلظت اولیه‌ی دیازینون برابر با ۲۰ mg/L، مقدار اولیه‌ی نانوکامپوزیت برابر با ۲/۵ g/L و pH اولیه برابر با ۵)

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]



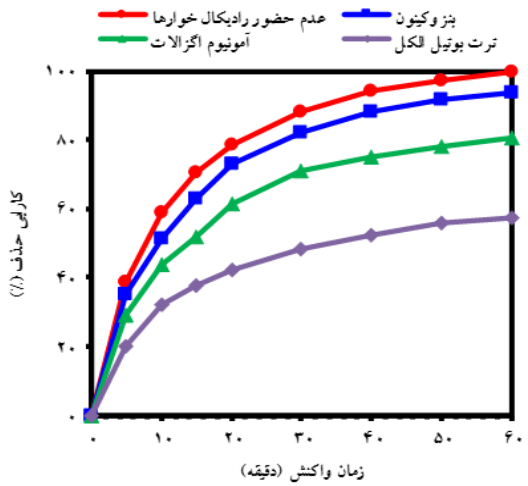
نمودار شماره ۹: تأثیر ترکیبات آلی مختلف بر کارایی حذف سونوکاتالیستی دیازینون (غلظت اولیه‌ی ترکیبات آلی و دیازینون برابر با ۲۰ mg/L، مقدار اولیه‌ی نانوکامپوزیت برابر با ۲/۵ g/L و pH اولیه برابر با ۵)

بررسی تأثیر انواع بدام اندازهای رادیکال

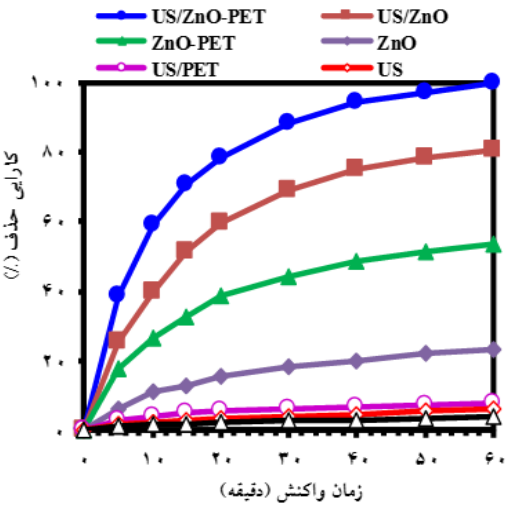
برای بررسی تأثیر انواع به دام اندازهای رادیکال بر کارایی حذف دیازینون در سیستم مورد مطالعه، آزمایشات در حضور بنزوکینون (BQ)، آمونیوم اگزالات (AO)، ترت بوتیل الکل (TBA)، به ترتیب به عنوان به دام انداز سوپراکسید ($O_2^{\cdot-}$)، حفره (h^+) و هیدروکسیل (OH)، در شرایط بهینه انجام شد و نتایج کارایی حذف در نمودار شماره ۱۰، نشان داده شده است. همان طورکه مشاهده می‌گردد، در حالت عدم حضور به دام اندازها، کارایی حذف دیازینون برابر با ۹۹/۸۱ درصد بود، امّا در حضور بنزوکینون، آمونیوم اگزالات و ترت بوتیل الکل به ترتیب به ۹۴/۰۶، ۸۰/۶۵ و ۵۷/۶۶ درصد کاهش یافت.

مقایسه‌ی تأثیر فرآیندهای مختلف

در مطالعه‌ی حاضر، قابلیت فرآیندهای مختلف شامل، پلی‌اتیلن ترفتالات، امواج اولتراسونیک، پلی‌اتیلن ترفتالات/ امواج اولتراسونیک، اکسیدروی، اکسید روی-پلی‌اتیلن ترفتالات، اکسیدروی/ امواج اولتراسونیک و اکسیدروی-پلی‌اتیلن ترفتالات/ امواج اولتراسونیک بر کارایی حذف دیازینون در شرایط بهینه در زمان‌های مختلف بررسی شد. نتایج حاصله درنمودار شماره ۱۱ نشان داده شده است. همان طور که در این نمودار مشاهده می‌گردد، کارایی حذف برای دیازینون به‌ترتیب برابر با ۳/۸۳، ۶/۱۳، ۸/۰۵، ۲۳/۱۸، ۵۳/۸۳، ۸۰/۶۵، ۹۹/۸۱ درصد بود. به طور کلی، اکسیدروی-پلی‌اتیلن ترفتالات/ امواج اولتراسونیک برای حذف دیازینون دارای بیش‌ترین کارایی بود.



نمودار شماره ۱۰: تأثیر رادیکال خوارها بر کارایی حذف سونوکاتالیستی دیازینون (غلظت اولیه‌ی دیازینون برابر با ۲۰ mg/L، مقدار اولیه‌ی نانوکامپوزیت برابر با ۲/۵ g/L و pH اولیه برابر با ۵)

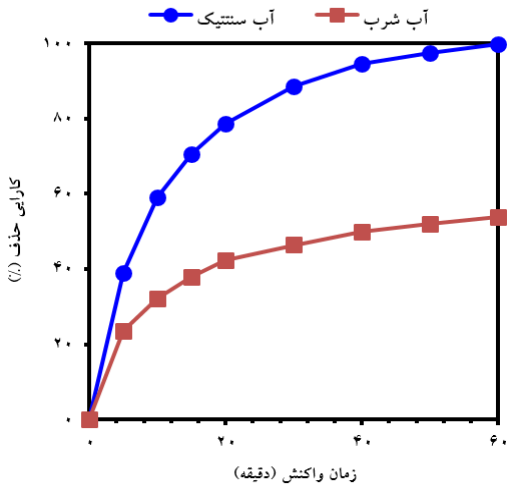


نمودار شماره ۱۱: تأثیر فرآیندهای مختلف بر کارایی حذف سونوکاتالیستی دیازینون (غلظت اولیه‌ی دیازینون برابر با ۲۰ mg/L، مقدار اولیه‌ی نانوکامپوزیت برابر با ۲/۵ g/L، pH اولیه برابر با ۵)

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

حذف دیازینون از نمونه‌ی آب شرب

برای ارزیابی کارایی نانوکاتالیست اکسیدروی-پلی اتیلن ترفتالات در حضور امواج اولتراسونیک در حذف دیازینون از نمونه‌ی آب شرب، از آب آشامیدنی سیستم توزیع شهر رشت، نمونه گرفته شد و سپس به‌طور جداگانه ۲۰ mg/L دیازینون و ۲/۵ g/L نانوکاتالیست به نمونه‌ی آب اضافه شد و در زمان‌های تماس مختلف، بررسی شد. به‌طورکلی مشخصات آب شرب نمونه‌برداری شده در مطالعه قبلی نشان داده شده است(۳۵). نتایج کارایی حذف در نمودار شماره ۱۲ نشان داده شده است. همان طورکه در این نمودار مشاهده می‌شود، کارایی حذف دیازینون در نمونه‌ی آب آشامیدنی در مقایسه با نمونه‌ی سنتتیک کاهش یافت و کارایی حذف، پس از ۶۰ دقیقه در نمونه‌های آب آشامیدنی برابر با ۵۳/۸۳ درصد بود.

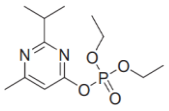
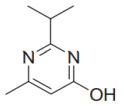
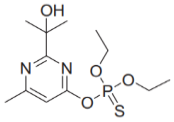
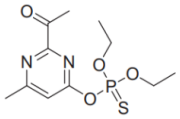


نمودار شماره ۱۲: تأثیر آب شرب بر کارایی حذف سونوکاتالیستی دیازینون (غلظت اولیه ی دیازینون برابر با ۲۰ mg/L، مقدار اولیه‌ی نانوکامپوزیت برابر با ۲/۵ g/L)

بررسی مواد واسطه تشکیل شده در شرایط بهینه با استفاده از دستگاه GC-MS

برای تعیین مواد واسطه تشکیل شده در شرایط بهینه با استفاده از دستگاه GC-MS در شرایط ثابت غلظت دیازینون برابر با ۲۰ mg/L، pH اولیه برابر با ۵ و غلظت نانوکاتالیست برابر با ۲/۵ g/L و زمان تماس برابر با ۶۰ دقیقه در فرآیند حذف سونوکاتالیستی دیازینون توسط نانوکامپوزیت اکسیدروی-پلی‌اتیلن ترفتالات نمونه‌برداری شد، سپس نانوکامپوزیت از نمونه‌ها جداسازی شد، و نمونه‌ها برای تعیین مواد واسطه تشکیل شده در شرایط بهینه با استفاده از دستگاه GC-MS آنالیز گردید و در نهایت محصولات جانبی مطابق با دایره المعارف دستگاه مشخص شدند (جدول شماره ۴).

جدول شماره ۴: مواد واسطه تشکیل شده در شرایط بهینه با استفاده از دستگاه GC-MS در حذف سونوکاتالیستی دیازینون (غلظت اولیه‌ی دیازینون برابر با ۲۰ mg/L، مقدار اولیه‌ی نانو کامپوزیت برابر با ۲/۵ g/L، pH اولیه برابر با ۵)

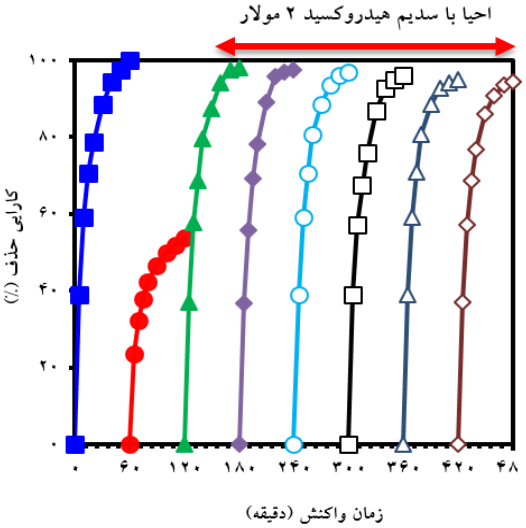
نام ترکیب	ساختار مولکولی	جرم مولی ($g\ mol^{-1}$)
دیازوکسون		۲۸۸
۲-ایزوپروپیل-۶-متیل-۴-پیریمیدینول(IMP)		۱۵۲
هیدروکسی دیازینون		۳۲۰
دیازینون متیل کتون		۳۰۴

بررسی کارایی نانوکامپوزیت بازیافت شده

برای بررسی کارایی نانوکامپوزیت بازیافت شده برای استفاده‌ی مجدد از آن در فرآیندهای سونوکاتالیستی، نانوکاتالیست‌های جمع‌آوری شده از آزمایشات قبلی فقط با آب مقطر احیا شد و سپس آزمایشات مربوطه، در شرایط بهینه انجام گردید، همان‌طورکه در نمودار شماره ۱۳ قابل مشاهده است در طی احیاء نانوکامپوزیت با آب مقطر برای آزمایش‌های سونوکاتالیستی دیازینون کارایی حذف سونوکاتالیستی کاهش یافت و در مرحله بعد با احیا دیازینون با سدیم هیدروکسید ۲ مولار در هر

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

مرحله کارایی حذف سونوکاتالیستی، با تغییر بسیار اندک حفظ شد. نتایج نشان داد که نانوکاتالیست بازیافت شده، قابلیت استفاده‌ی مجدد (بعد از ۶ مرحله) را برای حذف دیازینون را دارد.



نمودار شماره ۱۳: کارایی نانوکامپوزیت بازیافت شده بر حذف سونوکاتالیستی دیازینون (غلظت اولیه‌ی دیازینون برابر با ۲۰ mg/L، مقدار اولیه‌ی نانو کامپوزیت برابر با ۲/۵ g/L، pH اولیه برابر با ۵)

بحث

پراش اشعه X (XRD) پرکاربردترین تکنیک برای تعیین ساختار کریستالی و اندازه‌ی نانو ذرات استفاده می‌شود. پیک‌های پراش اصلی اکسید روی به‌عنوان مقادیر ۲-تتا به ترتیب در ۳۱/۹۶، ۳۴/۶۸ و ۳۶/۴۸ درجه قرار دارند که مربوط به صفحات(۱۰۰)، (۰۰۲) و (۱۰۱) بود. این قله‌ها ساختار شش ضلعی ورتزیت نانوذرات اکسید روی را تایید می‌کند(۳۶). هم‌چنین ساختار کریستالی پلی‌اتیلن ترفتالات با پیک‌های غالب در صفحات (۰۱۱)، (۰۱۰)، (۱۱۰) و (۱۰۰) تایید شد(۳۷). علاوه بر این پیک‌های مربوط به اکسیدروی و پلی‌اتیلن ترفتالات در نانوکامپوزیت اکسیدروی-پلی اتیلن ترفتالات مشاهده شده است که نشان دهنده رشد موثر نانوذرات اکسیدروی بر روی پلی‌اتیلن ترفتالات است. با توجه به فرمول Debye-Scherrer، میانگین اندازه‌های اکسیدروی و نانوکامپوزیت اکسیدروی-پلی‌اتیلن ترفتالات به ترتیب ۱۹/۸۶ و ۲۰/۸۱ نانومتر به‌دست آمد. طبق نمودار شماره ۲-الف، طیف FT-IR دارای چند پیک جذب غالب در باندهای مختلف برای پلی‌اتیلن ترفتالات بود، که باند قرار گرفته در cm^{-1} ۷۲۶/۷۳ به گروه‌های استر قطبی و برهم کنش حلقه‌های بنزن (ارتعاش= حلقه بنزن C-H خارج از صفحه)، نسبت داده می‌شود. باندهای قرار گرفته در cm^{-1} ۱۱۲۷/۷۰ و cm^{-1} ۱۲۵۳/۴۷ با ارتعاش گروه استر مرتبط هستند. باند جذب در cm^{-1} ۱۷۱۷/۲۷ مربوط به ارتعاشات کششی پیوند C=O استرهای اشباع شده است و در cm^{-1} ۲۹۶۸/۴۹، جذب مربوط به ارتعاشات پیوند C-H و باند در cm^{-1} ۳۴۳۰/۹۳ به گروه O-H تعلق دارد(۳۸). در پیک‌های جذب نانوذرات اکسیدروی، باند واقع در cm^{-1} ۴۵۸/۸۹ به ارتعاش کششی نانوذرات اکسیدروی نسبت داده می‌شود. هنگام تهیه اکسیدروی برای آنالیز FT-IR در هوای آزاد، رطوبت جذب شده باعث ایجاد حالت ارتعاش خمشی H-O-H می‌شود که باند مربوطه در cm^{-1} ۱۶۰۸/۹۰ نشان داده شده است(۳۹). علاوه بر این، باند قرار گرفته در cm^{-1} ۳۵۰۰/۲۴ مربوط به گروه‌های OH^- در نانوذرات اکسید روی است(۴۰). به علاوه، در نمودار شماره ۲-ب باندهای مربوط به گروه های عاملی پلی‌اتیلن ترفتالات و اکسیدروی در نانوکامپوزیت اکسید روی-پلی‌اتیلن ترفتالات قابل مشاهده است که تثبیت نانوذرات اکسیدروی بر روی پلی‌اتیلن ترفتالات را تایید می‌کند. آنالیز SEM ساختار میله‌ای نانوکامپوزیت اکسیدروی-پلی‌اتیلن ترفتالات تثبیت نانوذرات اکسید روی بر روی پلی‌اتیلن ترفتالات را نشان می‌دهد. براساس آنالیز EDX، درصد وزن کربن (۵۴/۹۶ درصد) و اکسیژن (۴۵/۰۴ درصد) را در پلی‌اتیلن ترفتالات، درصد اکسیژن (۴۲/۷۲ درصد) و روی (۵۷/۲۸ درصد) را در اکسید روی و درصد کربن (۵۱/۴۸ درصد)، اکسیژن (۴۴/۴۱ درصد) و روی (۴/۱۱ درصد) را در نانوکامپوزیت اکسید روی-پلی‌اتیلن ترفتالات نشان

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

می‌دهد. بنابراین حضور تنها عناصر کربن، اکسیژن و روی در آنالیز نشان‌دهنده خلوص نانوکامپوزیت تولید شده است(۳۰). نتایج حاصل از تاثیر pH نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت در شرایط اسیدی و بازی کارایی خوبی ندارد. یک علت اصلی برای این تاثیر، خوردگی نانوکامپوزیت اکسید روی-پلی‌اتیلن ترفتالات در شرایط اسیدی و بازی است. در pH پایین‌تر از pH نقطه صفر (نقطه ایزوالکتریک) که ۶/۷۶ محاسبه گردید، سطح نانوکامپوزیت دارای بار مثبت و دیازینون دارای بار منفی می‌شود. بنابراین با ایجاد نیروی جذب الکترواستاتیکی بین سطح نانوکامپوزیت و دیازینون بالاترین کارایی حذف دیازینون در pH ۵ رخ می‌دهد(۴۲،۴۱). نتایج حاصل از تأثیر مقدار اولیه‌ی نانوکامپوزیت نشان می‌دهد که، کارایی حذف با افزایش مقدار اولیه‌ی نانوکامپوزیت افزایش یافت، که این امر به علت افزایش تعداد نقاط فعال موجود بر روی نانوکامپوزیت و هم‌چنین افزایش فعالیت کاویتاسیونی ایجاد شده در سیستم سونوکاتالیستی، که منجر به افزایش تعداد رادیکال‌های فعال می‌شود، رخ می‌دهد(۴۴،۴۳). نتایج تاثیر تغییرات غلظت اولیه دیازینون نشان‌دهنده این است که، کارایی حذف با افزایش غلظت اولیه دیازینون از ۵ mg/L به ۵۰ کاهش می‌یابد. علّت کاهش کارایی، جذب آلاینده‌ها بر سطح نانوکامپوزیت و محدود شدن جایگاه‌های فعال بر سطح نانوکامپوزیت است، به‌طوری که باعث کاهش تولید رادیکال‌های آزاد برای حذف دیازینون می‌شوند(۴۶،۴۵). براساس نتایج حاصله از محاسبه مدل‌های سینتیکی، فرآیند سونوکاتالیستی حذف دیازینون توسط اکسید روی-پلی‌اتیلن‌ترفتالات، با مدل سینتیکی درجه‌ی اول تطابق بیش تری دارد. با افزایش غلظت اولیه‌ی رنگ، از ۵ mg/L به ۵۰، ضریب ثابت سینتیکی درجه‌ی یک از ۰/۱۲۳ min^{-1} به ۰/۰۰۸۶، کاهش و مقدار انرژی مصرفی از ۱۸۱/۰۷۳ $kWh.m^{-3}$ به ۲۵۸۹/۷۷ افزایش یافت. مقدار ثابت سینتیکی سطح واکنش (K_C) و ثابت جذب لانگمویر (K_{DZ}) براساس معادله‌ی لانگمویر- هینشلوود، با رسم K_{obs}^{-1} در برابر غلظت اولیه‌ی دیازینون، به‌ترتیب برابر با $mg.L^{-1}.min^{-1}$ ۰/۴۸۸ و $L.mg^{-1}$ ۰/۱۸۹ به‌دست آمد. هم‌چنین میزان انرژی مصرفی، در فرآیند اکسید روی-پلی‌اتیلن ترفتالات/امواج اولتراسونیک ($kWh.m^{-3}$ ۲۱۳/۴۲) کم‌تر از فرآیندهای اکسید روی/ امواج اولتراسونیک ($kWh.m^{-3}$ ۸۱۳/۰۷)، پلی‌اتیلن‌ترفتالات/ امواج اولتراسونیک ($kWh.m^{-3}$ ۱۵۹۲۱/۲۷)، و امواج اولتراسونیک ($kWh.m^{-3}$ ۲۱۱۱۰/۵۴) بود. نتایج حاصل از تاثیر غلظت اولیه پراکسید هیدروژن بر روی کارایی حذف دیازینون نشان می‌دهد که با افزایش غلظت اولیه پراکسید هیدروژن از ۲ mM تا ۵ افزایش یافت. دلیل افزایش کارایی حذف، افزایش واکنش بین پراکسید هیدروژن و الکترون‌ها در باندهادی نانوکامپوزیت است. بر طبق معادله شماره ۱ پراکسید هیدروژن به‌طور موثری از ترکیب مجدد حفره- الکترون جلوگیری می‌کند. هم‌چنین با توجه به این‌که پراکسید هیدروژن نسبت به اکسیژن محلول پذیرنده الکترون بهتری است، بنابراین به عنوان پذیرنده خوب الکترون در واکنش‌های سونوکاتالیستی عمل می‌کند. اما با افزایش غلظت پراکسید هیدروژن به بالاتر از mM ۵ در فرایند سونوکاتالیستی کارایی حذف کاهش یافت. کاهش در کارایی حذف را می‌توان به این صورت توضیح داد که در غلظت‌های بالا پراکسید هیدروژن با رادیکال‌های هیدروکسیل تولید شده ترکیب می‌شود (معادله شماره ۲) و موجب کاهش کارایی حذف دیازینون می‌شود، به علاوه دلیل دیگر این کاهش در کارایی حذف می‌تواند تجزیه خود به خودی پراکسید هیدروژن به آب و اکسیژن باشد (معادله شماره ۳)(۴۸،۴۷).

$$H_2O_2 + e^-_{CB} \rightarrow OH^- + {}^{\bullet}OH \quad \text{(معادله شماره ۱)}$$

$${}^{\bullet}OH + H_2O_2 \rightarrow HO_2^{\bullet} + H_2O \quad \text{(معادله شماره ۲)}$$

$$2\,H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2 \quad \text{(معادله شماره ۳)}$$

کارایی حذف دیازینون در حضور گاز اکسیژن افزایش و در حضور گاز نیتروژن کاهش یافت. اکسیژن

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

محلول می‌تواند ازطریق واکنش با الکترون‌های برانگیخته در باند هدایت نانوکامپوزیت به رادیکال سوپراکسید تبدیل شود. دلیل دیگر افزایش کارایی حذف در حضور گاز اکسیژن افزایش اثر اسکاونجری الکترون است. هم‌چنین الکترون‌های تولید شده در باند هادی ممکن است به‌طور موثری با اکسیژن محلول واکنش دهد،که باعث ممانعت ازترکیب مجدد بین حفره مثبت و الکترون می‌شود. گاز نیتروژن نیز با کاهش تولید رادیکال سوپراکسید باعث کاهش کارایی حذف دیازینون گردید(۴۹). کارایی حذف سونوکاتالیستی دیازینون در حضور ترکیبات آلی مختلف کاهش یافت. از آن‌جا که جایگاه‌های فعال نانوکامپوزیت با مواد آلی پر می‌شود، مکان‌های کم‌تری برای ترکیب هدف در دسترس باقی می‌ماند و تداخلی بین مولکول‌های آلی جذب شده و مولکول‌های آلاینده اتفاق می‌افتد. ساختار ترکیبات آلی شامل مولکول‌های آلی آلیفاتیک و آروماتیک است که می‌تواند مکان‌های فعال بر سطح نانوکامپوزیت را اشغال کند. بنابراین به‌دلیل رقابت بین مولکول‌ها و جلوگیری از تولید رادیکال‌های فعال، روند تخریب کندی اتفاق افتاد(۵۱،۵۰). مشابه به مطالعه حاضر، Zhang و همکاران در سال ۲۰۱۹ گزارش دادند که کارایی حذف دیازینون در حضور ترکیبات اتیلن‌دی‌آمین‌تترا استیک‌اسید و اگزالات، کاهش یافت(۵۲). در بررسی تاثیر به دام اندازهای رادیکالی بر دیازینون مشاهده شد که بیش‌ترین اثر کاهشی بر کارایی حذف دیازینون را به دام انداز ترت بوتیل الکل داشته است که نشان می‌دهد فعال‌ترین رادیکال در حذف دیازینون رادیکال هیدروکسیل بوده است(۵۳). این کاهش می‌تواند از طریق اشغال نقاط فعال کاتالیست توسط رادیکال‌خوارها باشد(۵۴). بر طبق نمودار شماره ۱۱، مشاهده می‌گردد که فرایند نانوکامپوزیت اکسیدروی-پلی‌اتیلن‌ترفتالات/ امواج اولتراسونیک کارایی بالاتری در حذف دیازینون نسبت به فرایندهای دیگر دارد. بنابراین امواج اولتراسونیک به تنهایی نمی‌توانند آلاینده‌ها را حذف کند. اما با افزودن سونوکاتالیست، ازطریق تشکیل هسته و افزایش کاویتاسیون و تولید رادیکال‌های مسئول و در نتیجه، پدیده سونولومینسانس، کارایی حذف آلاینده‌ها افزایش یافت(۵۵). حذف سونوکاتالیستی دیازینون با نانوکامپوزیت اکسیدروی-پلی‌اتیلن‌ترفتالات با سایر مطالعات مقایسه شده است که خلاصه‌ای از نتایج در جدول شماره ۵، مشاهده می شود. با توجه به نمودار شماره ۱۲، نمونه‌ی آب شرب کارایی حذف کم‌تری در تخریب سونوکاتالیستی دیازینون در مقایسه با آب مقطر را داشت که علّت آن وجود مداخله‌کننده‌هایی مانند سولفات، کلراید، کربنات، بی کربنات، نیترات و نیتریت است که مکان‌های فعال بر سطح نانوکامپوزیت اکسیدروی- پلی‌اتیلن‌ترفتالات را پر کرده و از تولید رادیکال‌های فعال جلوگیری می‌کند و در نتیجه کاتالیست

جدول شماره ۵: مقایسه حذف دیازینون در مطالعه حاضر با سایر مطالعات

فرآیند	pH	مقدار کاتالیست (g/L)	غلظت دیازینون (mg/L)	قدرت	زمان تماس (دقیقه)	کارایی (درصد)	k_{obs} (min^{-1})	R^2	منبع
US/Ni-doped ZnO	۵	۱	۱۵	فرکانس: kHz۲۷	۱۵	۸۲/۲۹	–	–	(۵۶)
ZnO/Fe_3O_4	۷	۱	۱۰	نور فرابنفش	۹۰	۹۹/۳	–	–	(۵۷)
Solar/N doped TiO_2	۷	۲/۵	۱۰	لامپ زنون (۳۵۰ W)	۱۸۰	۸۵	–	۰/۹۵	(۵۸)
WO_3-doped ZnO	۷	۱۰	۲۰	نور فرابنفش	۱۲۰	۸۹	–	–	(۵۹)
Fe-TiO_2/Bent-Fe	۵/۶	۰/۵	۲۵	نور مرئی (۳۶ W)	–	۵۸/۳	–	–	(۶۰)
UV/MgO	۷	۰/۱	۵	نور فرابنفش	۱۲۰	۹۹/۴۶	–	–	(۶۱)
UV/Iron doped TiO_2	۵/۵	۰/۴	۳۰	نور فرابنفش (۱۵ W)	۱۰۰	۷۶	–	–	(۴۱)
UV/ZnO- Scallop Shell	۷	۰/۵	۲۰	۱۲۵ W	۱۲۰	۹۸/۹۲	۰/۰۳۴۳	۰/۹۸۷	(۱۳)
UV/WO_3	۷	۰/۵	۲۰	۱۲۵ W	۱۲۰	۹۹/۸۸	۰/۰۵۷	۰/۹۸۹۲	(۶۲)
UV/ZnO-TiO_2	۷	۰/۵	۲۰	۱۲۵ W	۱۲۰	۹۶/۷۹	۰/۰۱۵۸	۰/۹۶۰۷	(۶۳)
β-Cyclodextrin /AGE /thermosensetive polymer /Fe_3O_4@SiO_2	۶	۰/۰۱	۱۰۰	–	۶۰	>۹۷	–	۱	(۶۴)
US/ZnO-PET	۵	۲/۵	۲۰	فرکانس: kHz۲۷	۶۰	۹۹/۸۱	۰/۰۸۹۸	۰/۹۳۳۴	مطالعه حاضر

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

را برای حذف آلاینده غیر فعال می‌کنند (معادلات شماره ۴ تا ۶)(۶۶،۶۵،۴۲).

$SO_4^{2-} + {}^{\bullet}OH \rightarrow SO_4^{\bullet-} + OH^-$ (معادله شماره ۴)

$CO_3^{2-} + {}^{\bullet}OH \rightarrow CO_3^{\bullet-} + H_2O$ (معادله شماره ۵)

$HCO_3^- + {}^{\bullet}OH \rightarrow CO_3^{\bullet-} + H_2O$ (معادله شماره ۶)

به‌طورکلی، تجزیه سونوکاتالیستی آلاینده می‌تواند برخی از مواد واسطه را تولید کند. گاهی اوقات، سمیت این مواد واسطه قوی‌تر از آلاینده‌های اصلی است. بنابراین، تجزیه و تحلیل مواد واسطه تولید شده ضروری است. در این مطالعه، مواد واسطه دیازینون توسط نانوکامپوزیت اکسیدروی-پلی‌اتیلن‌ترفتالات تحت شرایط آزمایشگاهی بهینه پس از ۶۰ دقیقه تابش امواج مافوق صوت با استفاده از GC-MS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. براساس تجزیه و تحلیل GC-MS، ترکیبات اصلی در مسیر تخریب سونوکاتالیستی دیازینون شامل دیازوکسون، ۲-ایزوپروپیل-۶-متیل-۴-پیریمیدینول (IMP)، هیدروکسی دیازینون و دیازینون متیل کتون هستند، که شکل ساختاری این ترکیبات در جدول شماره ۴ قابل مشاهده است. در ابتدای واکنش سونوکاتالیستی از طریق اکسیداسیون باند P=S به باند P=O از طریق رادیکال‌های آزاد، دیازینون به دیازوکسان تبدیل می‌شود. سپس از طریق واکنش‌های هیدرولیز دیازینون و دیازوکسان از طریق شکستن باند P-O (گروه‌های پریمیدین) IMP تولید می‌شود. هم‌چنین واکنش‌های هیدروکسیل‌دار کردن در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته به منظور حذف دیازینون ضروری است و ازطریق حمله هیدروکسیل (OH) به گروه عاملی (ایزوپروپیل) منجر به تشکیل هیدروکسی دیازینون می‌شود. سپس، ترکیب دیازینون متیل‌کتون از اکسیداسیون بیش‌تر هیدروکسی‌دیازینون حاصل می‌شود. در نهایت از تجزیه مولکول‌های دیازینون آب (H_2O) و کربن‌دی‌اکسید (CO_2) تولید می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت استفاده از نانوکامپوزیت اکسید روی-پلی‌اتیلن‌ترفتالات موجب تولید محصولات بی‌خطر در مسیر حذف سونوکاتالیستی دیازینون می‌شود(۶۷،۵۲،۵). قابلیت استفاده مجدد از کاتالیست‌ها در پایان واکنش یک پارامتر مهم است. همان‌طورکه مشاهده گردید، کارایی حذف سونوکاتالیستی دیازینون توسط نانوکامپوزیت بازیافت شده پس از هر بار تکرار در شرایط بهینه، تغییر بسیار اندکی با کارایی حذف در مرحله‌ی اول داشت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نانوذرات اکسید روی پوشش داده شده بر روی پلی‌اتیلن‌ترفتالات، قابلیت استفاده‌ی مجدد برای حذف دیازینون را از محیط‌های آبی دارد.

در این تحقیق از نانوکامپوزیت اکسید روی-پلی‌اتیلن‌ترفتالات در حضور امواج مافوق صوت در حذف دیازینون از محیط‌های آبی استفاده گردید. نانوکامپوزیت اکسید روی-پودر پلی‌اتیلن‌ترفتالات با روش هم‌رسوبی سنتز شد. آنالیز XRD، FT-IR، SEM و EDX ساختار نانوکامپوزیت را تأیید کرد. بیش‌ترین کارایی حذف در pH برابر با ۵ مشاهده گردید. کارایی حذف با افزایش غلظت اولیه دیازینون کاهش یافت و کارایی حذف از سینتیک درجه یک پیروی کرد. با افزایش غلظت اولیه‌ی رنگ، از ۵ mg/L به ۵۰، ضریب ثابت سینتیکی درجه‌ی یک از ۰/۱۲۳ min^{-1} به ۰/۰۰۸۶، کاهش و مقدار انرژی مصرفی از ۱۸۱/۰۷۳ $kWh.m^{-3}$ به ۲۵۸۹/۷۷ افزایش یافت. کارایی حذف دیازینون با افزایش تأثیر غلظت اولیه پراکسید هیدروژن از ۲ تا ۵mM افزایش و سپس کاهش یافت. استفاده از گاز اکسیژن فعالیت سونوکاتالیستی بالاتری را برای حذف دیازینون نسبت به شرایط محیطی نشان می‌دهد. به‌طور کلی کارایی حذف رنگ برابر با سیکل اول بعد از زمان تماس ۶۰ دقیقه بعد از سیکل ششم مشاهده گردید. در مجموع نتایج حاصل از انجام آزمایشات مشخص ساخت که می‌توان از فرآیند مورد مطالعه به‌عنوان یک روش موثر با قابلیت بازیابی کاتالیست به صورت ثقل و استفاده مجدد و کاهش

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

انرژی مصرفی در جهت حذف دیازینون از محیط‌های آبی استفاده کرد.

سپاسگزاری

مقاله حاضر حاصل از پایان نامه دانشجویی کارشناسی ارشد مهسا پور رحمتی- شیراز با کد کمیته اخلاق IR.GUMS. REC.1401.125 است. نویسندگان از معاونت تحقیقات و فناوری و مرکز تحقیقات بهداشت و محیط زیست دانشگاه علوم پزشکی گیلان (GUMS)، رشت، ایران، بابت تمامی حمایت‌ها بابت این کار تشکر می‌کنند.

References

1. Ghanbari F, Kiani Sadr M, Kouckakian M, Melhosseini Darani K. Diazinon Residues in Rice and Associated Health Risks for Human; A Case Study in Rasht, Iran. Journal of Advances in Environmental Health Research 2021; 9(2): 169-166 (Persian).
2. Dehghan S, Shakeri A, Tahergoorabi M, Dadban Shahamat Y. Synthesis of Zinc Oxide/ Reduced Graphene Oxide Nanocatalyst and Its Efficiency in Photocatalytic Degradation of Paraquat Herbicide. J Mazandaran Univ Med Sci 2021; 31(201): 39-58 (Persian).
3. Khodadadi M, Samadi MT, Rahmani AR, Maleki R, Allahresani A, Shahidi R. Determination of Organophosphorous and Carbamat Pesticides Residue in Drinking Water Resources of Hamadan in 2007. IJHE 2010; 2(4): 250-257 (Persian).
4. Paneru S, Kumar D. CeO_2 and PEDOT: PSS modified conducting paper for organophosphate pesticide detection. Journal of Applied Electrochemistry. 2024: 1-11.
5. Wang C, Shih Y. Degradation and detoxification of diazinon by sono-Fenton and sono-Fenton-like processes. Sep Purif Technol 2015; 140: 6-12.
6. Balela MDL, Vega GZD, Suyat YYA. Malathion Detection Using Molecularly-Imprinted Polymer Quartz Crystal Microbalance Sensor. Applied Mechanics and Materials 2024; 918(4): 147-154.
7. Rasoulifard MH, Akrami M, Eskandarian MR. Degradation of organophosphorus pesticide diazinon using activated persulfate: Optimization of operational parameters and comparative study by Taguchi's method. J Taiwan Inst Chem Eng 2015; 57: 77-90.
8. Zarei S, Ghafouri H, Vahdatiraad L, Moghaddam VA, Sohrabi T, Heidari B. Using heat shock protein (HSP) inducers as an approach to increase the viability of sterlet (Pisces; Acipenseridae; Acipenser ruthenus) cells against environmental diazinon toxicity. J Hazard Mater 2024; 465: 133194.
9. Dianati Tilaki R, yazdani charati J, bavandi S. Efficiency of Modified Zeolite with Cationic Surfactant Hexadecyltrimethylammonium Bromide in Removal of Diazinon from Aqueous Solutions. J Mazandaran Univ Med Sci 2020; 29(182): 50-61 (Persian).
10. Júnior FER , Fernandes FA. Degradation of diazinon by dielectric barrier discharge plasma. J Environ Chem Eng 2024; 12(1): 111539.
11. Rodrigues FE, Fernandes FA. Diazinon degradation in water applying glow discharge plasma technology. Braz J Chem Eng 2024: 1-13.
12. Bazrafshan E, Mohammadi L, Balarak D, Keikhaei S, Mahvi AH. Optimization of diazinon removal from aqueous environments by electrocoagulation process using response

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

surface methodology. J Mazandaran Univ Med Sci 2016; 26(138): 118-130 (Persian).

13. Shirzad-Siboni M, Khataee A, Vahid B, Joo SW. Synthesis, characterization and immobilization of ZnO nanosheets on scallop shell for photocatalytic degradation of an insecticide. Science of Advanced Materials 2015; 7(4): 806-814.
14. Pandis PK, Kalogirou C, Kanellou E, Vaitsis C, Savvidou MG, Sourkouni G, et al. Key points of advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater, organic pollutants and pharmaceutical waste treatment: A mini review. ChemEngineering 2022; 6(1): 8.
15. Mahbub P, Duke M. Scalability of advanced oxidation processes (AOPs) in industrial applications: A review. J Environ Manage 2023; 345: 118861.
16. Camargo-Perea AL, Rubio-Clemente A, Peñuela GA. Use of ultrasound as an advanced oxidation process for the degradation of emerging pollutants in water. Water 2020; 12(4): 1068.
17. Meroni D, Djellabi R, Ashokkumar M, Bianchi CL, Boffito DC. Sonoprocessing: From concepts to large-scale reactors. Chem Rev 2021; 122(3): 3219-3258.
18. Li Z, Dong J, Zhang H, Zhang Y, Wang H, Cui X, et al. Sonochemical catalysis as a unique strategy for the fabrication of nano-/micro-structured inorganics. Nanoscale Adv 2021; 3(1): 41-72.
19. Kamani H, Nasseri S, Nabizadeh R, Khoobi M, Ashrafi D, Bazrafshan E, et al. Sonocatalytic oxidation of reactive blue 29 by N-doped TiO_2 from aqueous solution. J Mazandaran Univ Med Sci 2018; 28(166): 157-169 (Persian).
20. Krishna S, Sathishkumar P, Pugazhenthiran N, Guesh K, Mangalaraja R, Kumaran S, et al. Heterogeneous sonocatalytic activation of peroxomonosulphate in the presence of $CoFe_2O_4/TiO_2$ nanocatalysts for the degradation of Acid Blue 113 in an aqueous environment. J Environ Chem Eng 2020; 8(5): 104024.
21. Ghodke S, Sonawane S, Gaikawad R, Mohite K. TiO_2/Nanoclay nanocomposite for phenol degradation in sonophotocatalytic reactor. The Canadian Journal of Chemical Engineering 2012; 90(5): 1153-1159.
22. Pang YL, Abdullah AZ, Bhatia S. Review on sonochemical methods in the presence of catalysts and chemical additives for treatment of organic pollutants in wastewater. Desalination 2011; 277(1-3): 1-14.
23. Li X-q, Elliott DW, Zhang W-x. Zero-valent iron nanoparticles for abatement of environmental pollutants: materials and engineering aspects. Crit Rev Solid State Mater 2006; 31(4): 111-122.
24. Li B, Liu T, Wang Y, Wang Z. ZnO/ graphene-oxide nanocomposite with remarkably enhanced visible-light-driven photocatalytic performance. J Colloid Interface Sci 2012; 377(1): 114-121.
25. Vinitha V, Preeyanghaa M, Vinesh V, Dhanalakshmi R, Neppolian B, Sivamurugan V. Two is better than one: Catalytic, sensing and optical applications of doped zinc oxide nanostructures .Emergent Materials 2021; 4(2): 1093-124.
26. Gholami M, Farzadkia M, Zandsalimi Y, Sadeghi S, Abouee Mehrizi E. Efficacy of Cr-doped ZnO nanoparticles in removal of reactive black 5 dye from aqueous solutions in presence of solar radiation. J Mazandaran Univ Med Sci 2016; 26(141): 59-69 (Persian).
27. Yu J, Yu X. Hydrothermal synthesis and photocatalytic activity of zinc oxide hollow

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

spheres. Environ Sci Technol 2008; 42(13): 4902-4907.

28. Aslani H, Pashmtab P, Shaghaghi A, Mohammadpoorasl A, Taghipour H, Zarei M. Tendencies towards bottled drinking water consumption: Challenges ahead of polyethylene terephthalate (PET) waste management. Health Promot Perspect 2021; 11(1): 60-68.
29. Evode N, Qamar SA, Bilal M, Barceló D, Iqbal HM. Plastic waste and its management strategies for environmental sustainability. Case Stud Chem Environ Eng 2021; 4: 100142.
30. Yasin SA, Zeebaree SYS, Sharaf Zeebaree AY, Haji Zebari OI, Saeed IA. The Efficient Removal of Methylene Blue Dye Using CuO/PET Nanocomposite in Aqueous Solutions. Catalysts 2021; 11(2): 241.
31. Mohagheghian A, Hooshmand Rad S, Ayagh K, Shirzad-Siboni M. Photocatalytic Removal of Acid Blue 113 Dye from Aqueous Solutions Using Zinc Oxide-Kaolin Nanocomposite under Visible Light Irradiation. J Mazandaran Univ Med Sci 2022; 32(209): 146-162 (Persian).
32. APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th ed. Washington, DC: APHA;1999.
33. Jonidi-Jafari A, Shirzad-Siboni M, Yang J-K, Naimi-Joubani M, Farrokhi M. Photocatalytic degradation of diazinon with illuminated ZnO–TiO_2 composite. J Taiwan Inst Chem Eng 2015; 50: 100-107.
34. Farrokhi M, Hosseini S-C, Yang J-K, Shirzad-Siboni M. Application of ZnO–Fe_3O_4 nanocomposite on the removal of azo dye from aqueous solutions: kinetics and equilibrium studies. Water Air Soil Pollut 2014; 225: 1-12.
35. Pourrahmati-Shiraz M, Mohagheghian A, Shirzad-Siboni M. Synthesis of ZnO immobilized on recycled polyethylene terephtalate for sonocatalytic removal of Cr (VI) from synthetic, drinking waters and electroplating wastewater. J Environ Manage 2022; 324: 116395.
36. Premalatha N, Miranda LR. Surfactant modified ZnO–Bi_2O_3 nanocomposite for degradation of lambda-cyhalothrin pesticide in visible light: A study of reaction kinetics and intermediates. J Environ Manage 2019; 246: 259-266.
37. Ali MK, Ibrahim K, Hamad OS, Eisa M, Faraj M, Azhari F. Deposited indium tin oxide (ITO) thin films by dc-magnetron sputtering on polyethylene terephthalate substrate (PET). Rom J Phys 2011; 56(5-6): 730-741.
38. Silva E, Fedel M, Deflorian F, Cotting F, Lins V. Properties of post-consumer polyethylene terephthalate coating mechanically deposited on mild steels. Coatings 2019; 9(1): 28.
39. Babu KS, Narayanan V. Hydrothermal synthesis of hydrated zinc oxide nanoparticles and its characterization. Chem Sci Trans 2013; 2(S1): S33-S36.
40. Hong R, Li J, Chen L, Liu D, Li H, Zheng Y, et al. Synthesis, surface modification and photocatalytic property of ZnO nanoparticles. Powder Technol 2009; 189(3): 426-432.
41. Tabasideh S, Maleki A, Shahmoradi B, Ghahremani E, McKay G. Sonophotocatalytic degradation of diazinon in aqueous solution using iron-doped TiO_2 nanoparticles. Sep Purif Technol 2017; 189: 186-192.
42. Daneshvar N, Aber S, Dorraji MS, Khataee A, Rasoulifard M. Photocatalytic degradation of the insecticide diazinon in the presence of prepared nanocrystalline ZnO powders under irradiation of UV-C light. Sep Purif Technol 2007; 58(1): 91-98.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

43. Guo R, Jiao T, Li R, Chen Y, Guo W, Zhang L, et al. Sandwiched Fe_3O_4/carboxylate graphene oxide nanostructures constructed by layer-by-layer assembly for highly efficient and magnetically recyclable dye removal. ACS Sustainable Chem Eng 2018; 6(1): 1279-1288.
44. Jyothi K, Yesodharan S, Yesodharan E. Ultrasound (US), Ultraviolet light (UV) and combination(US+UV) assisted semiconductor catalysed degradation of organic pollutants in water: Oscillation in the concentration of hydrogen peroxide formed in situ. Ultrason Sonochem 2014; 21(5): 1787-1796.
45. Yang J-K, Lee S-M. Removal of Cr (VI) and humic acid by using TiO_2 photocatalysis. Chemosphere 2006; 63(10): 1677-1684.
46. Goel M, Hongqiang H, Mujumdar AS, Ray MB. Sonochemical decomposition of volatile and non-volatile organic compounds—a comparative study. Water Res 2004; 38(19): 4247-4261.
47. Daneshvar N, Rasoulifard MH, Khataee AR, Hosseinzadeh F. Removal of C.I. Acid Orange 7 from aqueous solution by UV irradiation in the presence of ZnO nanopowder. J Hazard Mater 2007; 143(1-2): 95-101.
48. Kazemizad L, Ghaffari Y, Kermani M, Farzadkia M, Hajizadeh A. Investigation of Photo–Fenton–Like Process Efficiency in Diazinon Pesti-cide Removal from Aqueous Solutions. Journal of Safety, Environment, and Health Research 2016; 1(1): 17-22.
49. Jonidi-Jafari A, Shirzad-Siboni M, Yang J-K, Naimi-Joubani M, Farrokhi M. Photocatalytic degradation of diazinon with illuminated ZnO–TiO_2 composite. J Taiwan Inst Chem Eng 2015; 50: 100-107.
50. Adams WA, Impellitteri CA. The photocatalysis of N, N-diethyl-m-toluamide (DEET) using dispersions of Degussa P-25 TiO_2 particles. J Photochem Photobiol A: Chem 2009; 202(1): 28-32.
51. Hussen A. PANI/g-C_3N_4/CeO_2 nanocomposite for photodegradation of diazinon in aqueous solution. Middle East Journal of Applied Science & Technology 2021; 4(1): 1-22.
52. Zhang H, Qiao J, Li G, Zhang M, Li S, Wang J, et al. Construction of coated Z-scheme Pd-$BaZrO_3$@ WO_3 composite with enhanced sonocatalytic activity for diazinon degradation in aqueous solution. Sci Total Environ 2019; 663: 97-109.
53. Khataee A, Saadi S, Safarpour M, Joo SW. Sonocatalytic performance of Er-doped ZnO for degradation of a textile dye. Ultrason Sonochem 2015; 27: 379-388.
54. Jorfi S, Kakavandi B, Motlagh HR, Ahmadi M, Jaafarzadeh N. A novel combination of oxidative degradation for benzotriazole removal using TiO_2 loaded on $Fe^{II}Fe_2^{III}O_4$@ C as an efficient activator of peroxymonosulfate. Applied Catalysis B: Environmental 2017; 219: 216-230.
55. Geng N, Chen W, Xu H, Ding M, Xie Z, Wang A. Removal of tetracycline hydrochloride by Z-scheme heterojunction sono-catalyst acting on ultrasound/H_2O_2 system. Process Saf Environ Prot 2022; 165: 261-272 .
56. Naimi-Joubani M, Ayagh K, Tahergorabi M, Shirzad-Siboni M, Yang J-K. Design and modeling of diazinon degradation in hydrous matrix by Ni-doped ZnO nanorods under ultrasonic irradiation: process optimization using RSM (CCD), kinetic study, reaction pathway, mineralization, and toxicity assessment. Environ Sci Pollut Res Int 2023; 30(2): 3527-3548.
57. Kalantar S, Bemani A, Sayadi MH, Chamanehpour E. Visible light–driven

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

ZnO/Fe_3O_4 magnetic nanoparticles for detoxification of diazinon: the photocatalytic optimization process with RSM-BBD model. Environ Sci Pollut Res Int 2023; 30(42): 95634-95647.

58. Salarian A-A, Hami Z, Mirzaei N, Mohseni SM, Asadi A, Bahrami H, et al. N-doped TiO_2 nanosheets for photocatalytic degradation and mineralization of diazinon under simulated solar irradiation: Optimization and modeling using a response surface methodology. J Mol Liq 2016; 220: 183-191.
59. Maleki A, Moradi F, Shahmoradi B, Rezaee R, Lee S-M. The photocatalytic removal of diazinon from aqueous solutions using tungsten oxide doped zinc oxide nanoparticles immobilized on glass substrate. J Mol Liq 2020; 297: 111918.
60. Phuong NM, Chu NC, Van Thuan D, Ha MN, Hanh NT, Viet HDT, et al. Novel removal of diazinon pesticide by adsorption and photocatalytic degradation of visible light-driven Fe-TiO_2/Bent-Fe photocatalyst. Journal of Chemistry 2019; 2019: 1-7.
61. Ahmadifard T, Heydari R, Tarrahi MJ, Khorramabadi GS. Photocatalytic degradation of diazinon in aqueous solutions using immobilized MgO nanoparticles on concrete. Int J Chem React Eng 2019; 17(9): 20180154.
62. Mohagheghian A, Karimi S-A, Yang J-K, Shirzad-Siboni M. Photocatalytic degradation of diazinon by illuminated WO_3 nanopowder. Desalination and Water Treatment 2016; 57(18): 8262-8269.
63. Jonidi-Jafari A, Shirzad-Siboni M, Yang J-K, Naimi-Joubani M, Farrokhi M. Photocatalytic degradation of diazinon with illuminated ZnO–TiO_2 composite. J Taiwan Inst Chem Eng 2015;50:100-107.
64. Tizro N, Moniri E, Saeb K, Ahmad Panahi H, Sobhanardakani S. Grafting β-Cyclodextrin/allyle glycidyl ether/ thermosensitive containing polymer onto modified Fe_3O_4@ SiO_2 for adsorption of diazinon from aqueous solution. J Environ Anal Chem 2023; 103(1): 123-139.
65. Shang J, Zong M, Yu Y, Kong X, Du Q, Liao Q. Removal of chromium (VI) from water using nanoscale zerovalent iron particles supported on herb-residue biochar. J Environ Manage 2017; 197: 331-337.
66. Khan S, Han C, Sayed M, Sohail M, Jan S, Sultana S, et al. Exhaustive photocatalytic lindane degradation by combined simulated solar light-activated nanocrystalline TiO_2 and inorganic oxidants. Catalysts 2019; 9(5): 425.
67. Malakootian M, Shahamat YD, Mahdizadeh H. Novel catalytic degradation of Diazinon with ozonation/mg-Al layered double hydroxides: optimization, modeling, and dispersive liquid–liquid microextraction. J Environ Health Sci Eng 2021; 19(2): 1299-1311.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]