مجله مهندسی بهداشت محیط، تابستان ۱۴۰۰، سال ۸، شماره ٤: ۳۵۸-۳۷٤

کاربرد نانوکامپوزیت اکسید روی- داپ شده با فلز نیکل در حذف سم ۲و٤-دی کلروفنوکسی استیک اسید با استفاده از فرآیند الکتروفتوکاتالیستی از محیط‌های آبی

حسن پورمسلمی[۱و۲]، مهدی فرزادکیا[۱و۲]، روشنک رضایی[۱و۲]، مجتبی یگانه[۱و۲]، مهدی حسینی[۱و۲]، میترا غلامی[۱و۲*]

[۱] مرکز تحقیقات تکنولوژی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران

[۲] گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱٤ ؛ تاریخ پذیرش: ۱٤۰۰/۰۵/۱۶

چکیده

سابقه و هدف: افزایش مصرف آفت کش‌ها و روش نامناسب دفع پساب‌های کشاورزی، سبب آلودگی منابع آب شده و محیط زیست را به شدت تحت تاثیر قرار داده است. ۲و٤-دی کلروفنوکسی استیک اسید (۲و٤-دی) یکی از سموم علف‌کش می‌باشد که مصرف نسبتا گسترده ای در سراسر جهان دارد. هدف از مطالعه حاضر بررسی کارایی فرایند الکتروفتوکاتالیستی با استفاده از فتو آند نیکل داپ شده با اکسید روی تثبیت شده بر سطح شیشه فلورین تین اکساید به روش اسپاترینگ در حذف سم ۲و٤-دی کلروفنوکسی استیک اسید از محیط‌های آبی می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در مطالعه حاضر اثرات متغیرهایpH (۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۱)، جریان الکتریکی (۲-۱ میلی آمپر بر سانتی متر مربع)، سطح الکترود (۳۲-۱۶ سانتی متر مربع)، غلظت اولیه ۲و٤-دی کلروفنوکسی استیک اسید (۱۰-۵۰ میلی‌گرم در لیتر) و زمان (۰-۹۰ دقیقه) در مقیاس آزمایشگاهی و به روش ناپیوسته مورد مطالعه قرارگرفت. همچنین مطالعات معدنی سازی و سنتیک فرآیند در شرایط بهینه مورد بررسی قرار گرفت. غلظت باقیمانده ۲و٤-دی کلروفنوکسی استیک اسید توسط دستگاه HPLC در طول موج ۲۸۳ نانومتر تعیین شد.

یافته‌ها: نتایج حاصل نشان دهنده بیشترین کارایی حذف ۲و٤-دی کلروفنوکسی استیک اسید در pH برابر ۷، جریان الکتریکی ۲ میلی آمپر بر سانتی متر مربع، سطح الکترود ۳۲ سانتی متر مربع، غلظت اولیه ۲و٤-دی ۱۰ میلی‌گرم در لیتر و زمان تماس ۹۰ دقیقه، می‌باشد. فرآیند الکتروفتوکاتالیستی جهت تصفیه پساب حاوی ۲و٤-دی در شرایط بهینه می‌تواند ۲و٤-دی را به میزان ۱۰۰ درصد و TOC را به میزان ۷۹/۵ درصد حذف کند. مطالعه مدل‌های سنتیکی مختلف نشان داد که فرایند از واکنش درجه اول پیروی می‌کند.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی با توجه به نتایج به دست آمده، فرآیند الکتروفتوکاتالیست حاضر را می‌توان به‌عنوان یک روش مناسب برای حذف ۲و٤-دی کلروفنوکسی استیک اسید در محیط آبی در نظر گرفت.

کلمات کلیدی: ۲و٤-دی کلروفنوکسی استیک اسید، نورUV ، فرایند الکتروفتوکاتالیستی.

***نویسنده مسئول:** مرکز تحقیقات تکنولوژی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران

ایمیل: gholami.m@iums.ac.ir تلفن تماس: ۰۲۱-۸۶۷۰۴۷۷۵

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.52547/jehe.8.4.358]

مقدمه

وجود ترکیبات آلی و سمی در آب‌های سطحی و زیرزمینی ناشی از مصرف گسترده و دفع آفت کش‌ها توسط کشاورزان و عموم مردم، صدمات جبران ناپذیری به محیط زیست به ویژه محیط زیست آبی تحمیل می‌نمایند [۱،۲]. بنابراین می‌بایست از انتشار این ترکیبات به داخل محیط زیست جلوگیری شود [۳]. یکی از سموم علف‌کش که مصرف نسبتا گسترده‌ای در سراسر جهان دارد، سم علف‌کش ۲ و ٤- دی‌کلروفنوکسی استیک اسید (2,4- D) است. این سم در دسته ترکیبات آلی می باشد که به‌صورت انتخابی بر روی علف‌های هرز پهن برگ اثر گذار است. تولید این سم از سال ۱۹٤٥ آغاز شده و تا به امروز در ساختار بیش از ۱۰۰۰ نوع علف‌کش تجاری استفاده شده است [٤].

۲و٤-دی علف کشی است با ترکیب آلی و فرمول شیمیایی $C_8H_6Cl_2O_3$ که در گروه اکسین‌های مصنوعی قرار می‌گیرد [٥-۷]. بر اساس گزارش آژانس بین المللی تحقیقات سرطان (IARC)، این علف‌کش در طبقه بندی‌های مربوط به سرطان‌زایی، در گروه 2B، یعنی احتمال سرطان‌زایی برای انسان، قرار می‌گیرد. سازمان جهانی بهداشت و استاندارد ۱۰۵۳ ایران، حداکثر غلظت مجاز ۲و٤-دی در آب آشامیدنی را ۳۰ میکروگرم در لیتر بیان کرده است. مواجهه طولانی مدت با ۲و٤-دی، دارای علایم سوزش در پوست و چشم‌ها می‌باشد. جذب این سم از طریق دستگاه گوارش انسان، پوست و ریه به‌طور کامل انجام می‌شود [۸]. بنابراین، با توجه به موارد ذکر شده، لزوم حذف این سم از محیط‌های آبی ضرورت دارد. تا کنون، روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی مختلفی برای حذف سم مورد مطالعه استفاده شده است که می‌توان به روش جذب فیزیکی [٤]، فرایند اکسیداسیون الکتروشیمیایی [۹]، فرایند فتو الکتروشیمیایی [۱۰]، فرایند فتوکاتالیستی [۱۱،۱۲] و غیره اشاره کرد. امروزه فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) به‌دلیل قابلیت بالا و سهولت استفاده در تجزیه و حذف آلاینده‌های آلی، کارایی بالا، عدم تولید مواد باقی مانده و جانبی خطرناک و غیره بسیار مورد توجه قرار دارند. علاوه بر این، پژوهشگران همواره به دنبال فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته هستند تا با تلفیق چند مکانیسم سبب افزایش کارایی حذف سموم شوند [۱۳].

در سال‌های اخیر با توجه به کارایی بالای فرایندهای فتوکاتالیستی در تصفیه پساب از محیط‌های آبی، پژوهشگران نگاه ویژه‌ای به این روش‌ها داشته‌اند. در فرایندهای فتوکاتالیستی طول عمر جفت الکترون حفره تشکیل شده ناشی از تحریک ماده فتوکاتالیستی با بهره‌گیری از اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین آند و کاتد افزایش یافته و امکان باز ترکیب شدن آن‌ها به حداقل رسیده و در نهایت موجب افزایش تولید رادیکال‌های اکسید کننده با پتانسیل اکسیداسیون و احیای بالا از جمله هیدروکسیل می‌شود. افزایش تولید این رادیکال‌ها، سایر رادیکال‌ها و سوپراکسایدها موجب بهبود کارایی سیستم می‌شود. با توجه به این که فناوری فتوکاتالیستی نیمه هادی در دسته فناوری‌های سبز تقسیم بندی می‌شوند، این فرایندها بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند [۱٤]. از جمله فتوکاتالیست‌های نیمه هادی می‌توان به ZnO [۱٥]، SnO_2 [۱٦]، TiO_2 [۱۷]، $BiVO_4$ [۱۸]، Bi_2WO_6 [۱۹] اشاره نمود. اکسید روی (ZnO) یکی از پرکاربردترین فتوکاتالیست‌های نیمه هادی است که با توجه به ویژگی‌های مثبت آن به‌صورت پودر، محلول کلوئیدی، کامپوزیت و غیره مورد استفاده قرارگرفته، و توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب نموده است [۱٤]. این ترکیب، چون از نظر باندهای انرژی، هدایت الکتریکی و موقعیت باندهای ظرفیت انرژی مشابه TiO_2 است، می‌تواند جایگزین مناسبی برای نیمه هادی TiO_2 در فرایندهای فتوکاتالیستی باشد. هر چند در مقایسه با TiO_2، می‌تواند طول موج‌های گسترده‌تری را جذب کند، واکنش شیمیایی بالاتری داشته، و در دمای پایین‌تری سنتز شود [۲۰]. سایر ویژگی‌های ZnO شامل کم هزینه بودن، عدم سمیت،

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.52547/jehe.8.4.358]

خواص الکتریکی و نوری برجسته، خصوصیات منحصر به‌فرد فتوالکتریک، پایداری شیمیایی و حرارتی، خنثی بودن، ایمنی زیستی بالا، قابلیت اطمینان محیطی و فتوکاتالتیک قوی از نظر تخریب آلاینده‌های آلی تحت نور ماورابنفش می‌باشد. با توجه به مزایای اشاره شده برای ZnO معایب آن نیز عبارتند از کارایی فتوکاتالیستی پایین و بر انگیخته شدن در طول موج‌های ناحیه ماورابنفش، که این خصوصیات سبب غیر فعال شدن این ترکیب در طول موج مرئی می‌شود [۲۱].

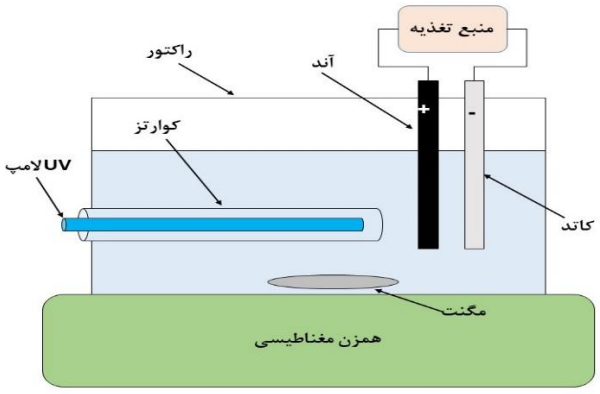
برای فعال نمودن این ترکیب در طول موج ماورا بنفش از روش‌های مختلفی استفاده شده است که می‌توان به استفاده در مقیاس نانو [۲۲]، فرایندهای هیبریدی فتو الکتروشیمیایی [۲۳]، اتصال با مواد نیمه هادی دیگر یا داپ کردن عناصر فلزی و غیر فلزی بر روی اکسید روی [۲۰] اشاره نمود. از عناصر فلزی و نیمه فلزی به عنوان گیرنده‌های مناسب ZnO و انجام عمل داپ استفاده می‌شود [۲۴]. یکی از فلزاتی که در بسیاری از مطالعات به عنوان فلز داپ شده مورد استفاده قرار گرفته است، فلز نیکل است. نیکل فلزی است با نماد علمی Ni که در گروه هفت جدول تناوبی قرار داشته و نتایج مطلوبی در مورد آن گزارش شده است [۲۵،۲۶]. فرایند فتوالکتروکاتالیتیکی فرایند جدیدی در زمینه تصفیه آلاینده‌ها در محیط‌های آبی است [۲۳]. این فرایند جزء فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته محسوب می‌شود [۲۷]. لذا هدف از این تحقیق حذف ۲و٤-دی کلروفنوکسی استیک اسید با فرایند الکتروفتوکاتالیستی از محیط‌های آبی و بررسی تاثیر پارامترهای pH، زمان تماس، جریان الکتریکی، سطح الکترود و غلظت سم در کارایی حذف آن می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه از نوع تجربی-کاربردی می‌باشد که در مقیاس پایلوت انجام گردید.

مواد و تجهیزات

مواد شیمیایی مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از سدیم کلراید، هیدروکسید سدیم، اسید سولفوریک، سم ۲و٤-دی کلروفنوکسی استیک اسید و متانول که از شرکت مرک آلمان تهیه شدند. در این مطالعه، از یک فتوالکتروراکتور ناپیوسته به حجم ۱ لیتر استفاده شد. در میانه راکتور غلاف کوارتز با قطر چهار سانتی متر قرار داده شد (شکل ۱). در بخش کاتد الکترود تیتانیوم و در بخش آند از فتو الکترود Ni-ZnO/FTO استفاده گردید. فتو الکترود Ni-ZnO/FTO با استفاده از روش گزارش شده توسط حسینی و همکاران [۲۸] سنتز گردید. مساحت هر یک از الکترودها ۲۰ سانتی مترمربع (مساحت مؤثر ١٦سانتی متر مربع) بود. منبع نوری مورد استفاده در این راکتور لامپ UVA با مشخصات قدرت الکتریکی٦ وات، طول موج ٤۰۰ -۳۲۰ نانومتر می‌باشد. در این سیستم دستگاه مولد جریان الکتریکی مستقیم، دارای توان الکتریکی حداکثر ۳۰ وات و ۱-۳ آمپر مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از هم‌زن مغناطیسی با شدت ۱۲۰ دور در دقیقه برای ایجاد محیط همگن استفاده شد. pH نمونه‌ها توسط اسید سولفوریک و سدیم هیدروکسید ۰/۱ نرمال تنظیم شد. جهت ایجاد هدایت الکتریکی در نمونه‌ها از کلرید سدیم به میزان **۰/۷۵ g/L** استفاده شد.



شکل ۱: مشخصات راکتور مورد استفاده در این تحقیق

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.52547/jehe.8.4.358]

روش آنالیز

غلظت ۲و٤-دی در نمونه‌های اولیه و تصفیه‌شده توسط دستگاه HPLC مدل Cecil CE49000، ساخت کشور انگلستان در طول‌موج ۲۸۳ نانومتر اندازه‌گیری گردید. فاز متحرک شامل مخلوط بافر فسفات با غلظت ۵۰ میلی‌مولار و متانول با نسبت ۳۰:۷۰ و مقدار جریان ۱ میلی‌لیتر بر دقیقه می‌باشد. برای تعیین pH محلول‌ها ازpH متر مدل HACH-HQ-40D استفاده گردید. از دستگاه آنالیز کننده کل کربن آلی (Multi N/C , 3100) جهت سنجش TOC استفاده گردید.

روش انجام کار

جهت انجام آزمایشات از روش One factor at the time استفاده گردید. ابتدا محلول استوک ۲و٤-دی با غلظت mg/l ۱۰۰۰ تهیه شده و غلظت‌های مورد نظر در آزمایش تهیه گردید، سپس با استفاده از مواد و تجهیزات مربوطه و با تغییر pH، زمان تماس، سطح الکترود، غلظت اولیه ۲و٤-دی، و جریان الکتریکی، نمونه‌های لازم در فواصل زمانی مشخص برداشت و مورد آنالیز قرارگرفت.

در این مطالعه از روابط سینتیک درجه صفر، درجه اول و درجه دوم برای آنالیز داده‌های آزمایش استفاده شدند که به ترتیب روابط آن به‌صورت زیر است [۲۹،۳۰].

$$\boldsymbol{A = -kt + A_0} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\ln(A) = -kt + \ln(A_0)} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\frac{1}{(A)} = \frac{1}{(A_0)} + kt} \quad (3)$$

در این روابط A غلظت در هر زمان، K ثابت سرعت واکنش (min-1) و A0 غلظت در زمان صفر و t زمان بر حسب دقیقه می‌باشد. به منظور تعیین تطبیق بهترین مدل با داده‌های حاصل، از ضریب رگرسیون همبستگی (R2) استفاده شد. به این معنی که بالاترین ضریب رگرسیون نشان‌دهنده بهترین مدل می‌باشد [۳۱].

یافته‌ها

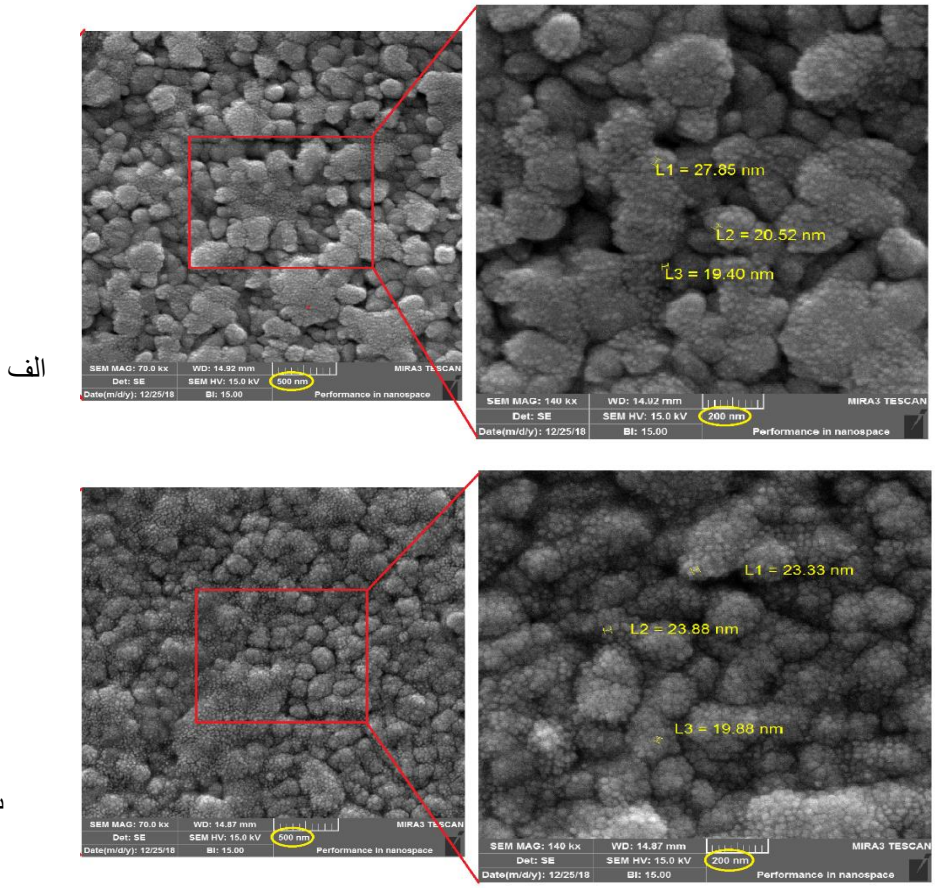
تعیین مشخصات فتوالکترود Ni/ZnO-FTO

تصاویر SEM فتو الکترود Ni/ZnO-FTO در شکل ۲ مشاهده می‌گردند. نانوذرات اکسید روی به صورت صاف و مسطح با شکل کروی و با نظم خوبی بر سطح زیر لایه پوشش داده شده‌اند (شکل ۲ (الف)). همچنین نانوذره‌های اکسید روی با نیکل داپ شده به‌صورت صاف و مسطح با شکل کروی و با نظم خوبی بر سطح زیر لایه پوشش داده شده‌اند (شکل ۲ (ب)).

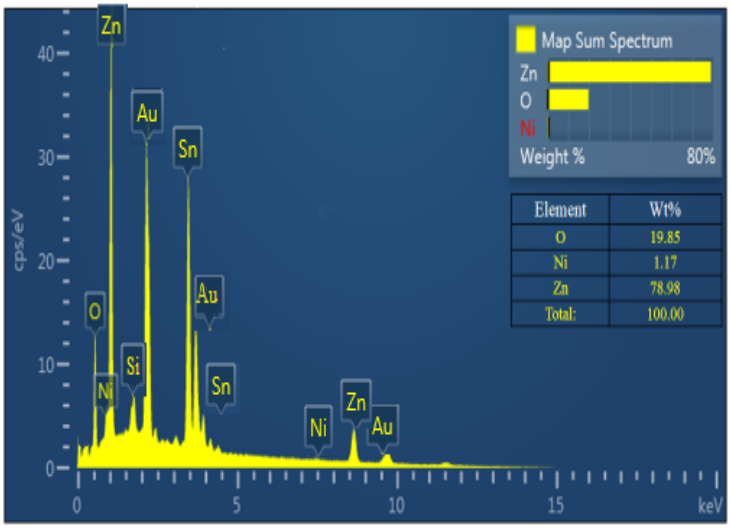
نتایج حاصل از آنالیز EDX در شکل ۳ مشاهده می‌گردد. نتایج حاصل از آنالیز EDX نشان از وجود عناصر نیکل، روی و اکسیژن به ترتیب با مقادیر ۱/۱۷، ۷۸/۹۸ و ۱۹/۸۵ درصد بر سطح زیر لایه شیشه فلورین تین اکساید است که نشان دهنده داپ شدن مناسب نانوذرات نیکل با نانوذرات ZnO و تثبیت آن‌ها بر سطح FTO است.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.52547/jehe.8.4.358]



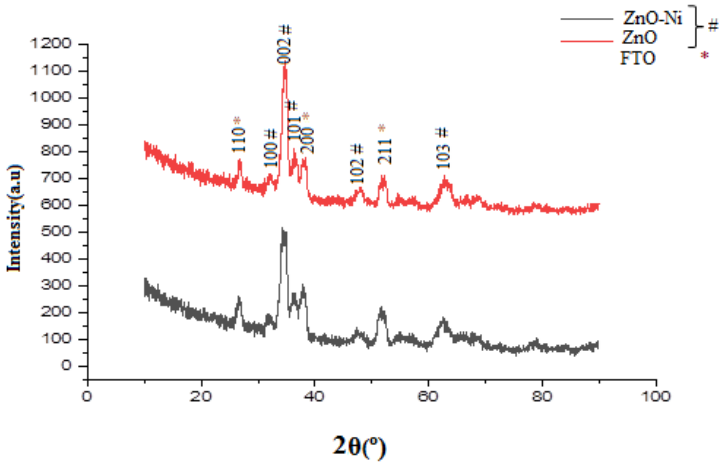
شکل ۲: تصاویر **SEM** (الف) نانوذرات اکسید روی بر روی شیشه **FTO** (ب) نانوذرات اکسید روی داپ شده با نیکل بر روی شیشه **FTO**



شکل۳ : تصویر **EDX** نانوذرات اکسید روی داپ شده با نیکل بر روی شیشه **FTO**

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.52547/jehe.8.4.358]



شکل ٤: تصاویر **XRD** نانوذرات اکسید روی و اکسید روی داپ شده با نیکل بر روی شیشه **FTO**

شـکل ٤ الگوی XRD نمونه‌های ZnO و Ni-ZnO را نشـان می‌دهد. پیک‌های خروجی در سـاختار کریسـتالی و ترکیب فازهای نمونه‌های سـنتز شـده نشـان می‌دهد که نمونه‌ها با کیفیت خوب کریستال شده‌اند و با پیک‌های مدل استاندارد ورتزیت هگزاگونال برای اکسـید روی تطابق دارد. قوی‌ترین پیک به‌دست آمده در موقعیت ٣٤/٤٢ است. پیک‌های موجود در موقعیت‌های ٣١/٧٣، ٣٤/٤٢، ٣٦/٢٢، ٤٧/٥١ و ٦٢/٨٣ به ترتیب مربوط به صـفحات (١٠٠)، (٠٠٢)، (١٠١)، (١٠٢)، (١٠٣) اکسـید روی اسـت. پیک‌های موجود در موقعیت‌های ٢٦/٥٩، ٩٦/ ٣٧ و ٥١/٧٨ به ترتیب مربوط به صفحات (١١٠)، (٢٠٠) و (٢١١) و مربوط به زیر لایه فلورین تین اکسـاید می‌باشد.

تأثیر pH بر میزان حذف ٢و٤-دی در فرایند الکتروفتوکاتالیستی

جهت بررسی تأثیر pH، دامنه‌ی در نظر گرفته شده تحت شـرایط ثابت سـایر عوامل تأثیرگذار، ٣ تا ١١ تعیین گردید. همان‌طوری که در نمودار شـماره ١ مشـاهده می‌شـود، نتایج نشـان داد که با افزایش pH از ٣ به ٧ کارایی حذف افزایش می‌یابد و سپس کارایی کاهش می‌یابد. بیشترین کارایی حذف ٢و٤-دی توسـط فرآیند الکتروفتوکاتالیسـتی در pH برابر ٧ حاصل شد.

تأثیر شـدت جریان الکتریکی بر میزان حذف ٢و٤-دی در فرایند الکتروفتوکاتالیستی

تأثیر تغییرات شـدت جریان الکتریکی ١، ١/٥ و ٢ میلی آمپر بر سـانتی‌متر مربع در حذف ٢و٤-دی مورد بررسـی قرار گرفت (نمودار ٢). نتایج نشان داد که کارایی حذف ٢و٤-دی در فرایند الکتروفتوکاتالیسـتی با افزایش شـدت جریان الکتریکی، افزایش می‌یابد به‌طوری که وقتی شدت جریان از ١ به ١/٥ و سـپس به ٢ افزایش یافت کارایی حذف ٢و٤-دی در فرایند فتوالکتروکاتالیستی به ترتیب از ٦٥/٩ به ٧٢/٤ درصد و سپس به ٨٣/١ درصد افزایش یافت.

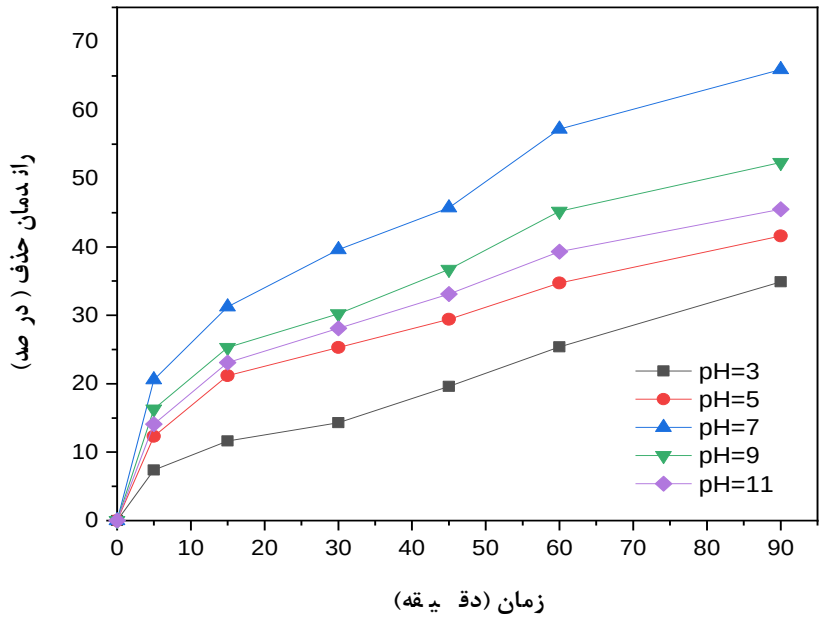
تأثیر غلظت اولیه بر میزان حذف ٢و٤-دی در فرایند الکتروفتوکاتالیستی

به‌منظور بررسـی تأثیر غلظت اولیه ٢و٤-دی بر کارایی فرآیند الکتروفتوکاتالیسـتی، روند اکسـیداسـیون ٢و٤-دی با غلظت‌هـای اولیـه ١٠، ٢٠، ٤٠ و ٥٠ میلی‌گرم بر لیتر مورد

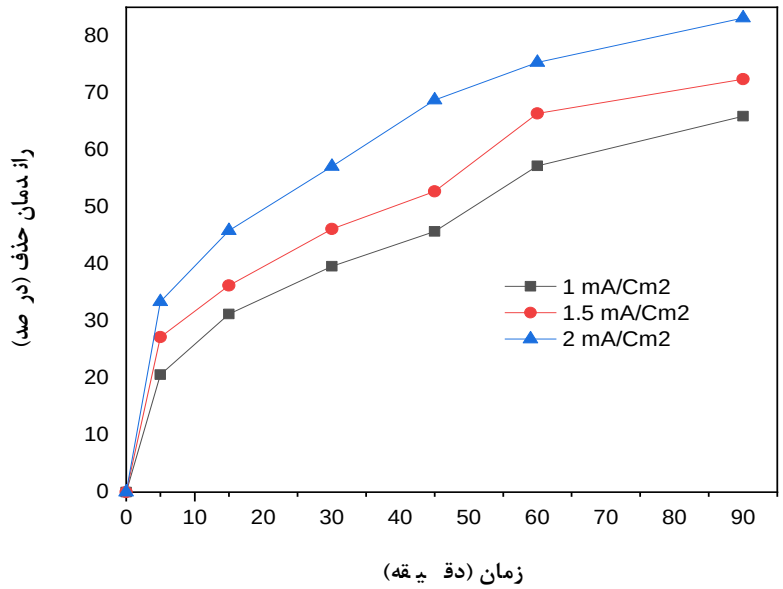
[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.52547/jehe.8.4.358]

بررسی قرار گرفت (نمودار ۳). نتایج نشان داد که، با افزایش غلظت اولیه ۲و٤-دی از ۱۰ به ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر میزان کارایی حذف ۲و٤-دی کاهش میابد. در فرآیند الکتروفتوکاتالیستی بیشترین کارایی حذف در کمترین غلظت که برابر با ۱۰ میلی‌گرم در لیتر بود، مشاهده گردید.



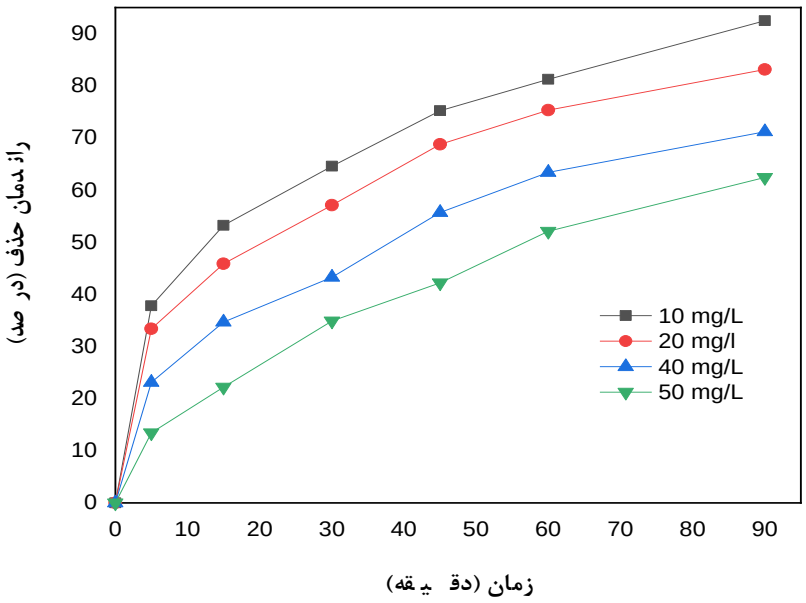
نمودار ۱: تأثیر **pH** بر کارایی حذف ۲و٤-دی در فرایند الکتروفتوکاتالیستی(شدت جریان= ۱ میلی آمپر بر سانتی متر مربع، غلظت آلاینده= ۲۰ میلی گرم بر لیتر، سطح فتوالکترود= ۱٦ سانتی متر مربع)



نمودار ۲: تأثیر جریان الکتریکی بر کارایی حذف ۲و٤-دی در فرایند الکتروفتوکاتالیستی (pH=7، غلظت آلاینده= ۲۰ میلی گرم بر لیتر، سطح فتوالکترود=۱٦ سانتی متر مربع)

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.52547/jehe.8.4.358]



نمودار ۳: تأثیر غلظت اولیه ۲و٤-دی بر کارایی حذف ۲و٤-دی در فرایند الکتروفتوکاتالیستی (**pH=7**، شدت جریان= ۲ میلی آمپر بر سانتی متر مربع، سطح فتوالکترود= ١٦ سانتی متر مربع)

تأثیر سطح فتوالکترود بر میزان حذف ۲و٤-دی در فرایند الکتروفتوکاتالیستی

برای مشخص‌کردن سطح فتوالکترود در حذف ۲و٤-دی، سطح‌های ١٦ و ٣٢ سانتی متر مربع مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در نمودار ٤ مشاهده می‌شود، بیشترین کارایی حذف ۲و٤-دی در سطح فتوالکترود، ٣٢ سانتی متر مربع حاصل گردیده است. نتایج سینتیک و میزان معدنی‌سازی ۲و٤-دی در فرآیند الکتروفتوکاتالیست

منحنی‌های مربوط به مدل‌های سینتیکی درجه صفر، درجه اول و درجه دوم حذف ۲و٤-دی به وسیله فرآیند الکتروفتوکاتالیستی در شرایط بهینه در نمودار ٦ نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود واکنش با ضریب رگرسیون ۰/۹٤٣٦ از سینتیک درجه ۱ پیروی می‌کند

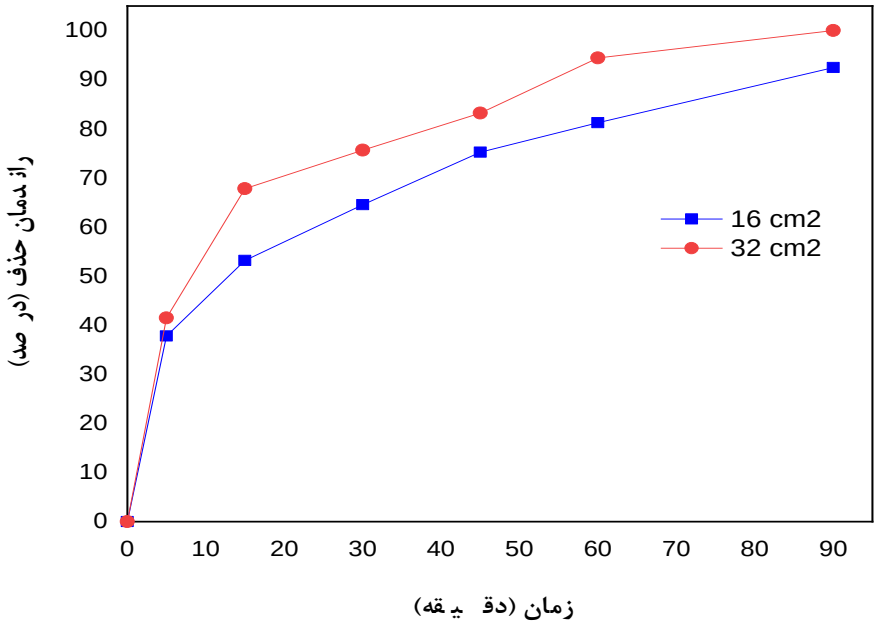
تأثیر زمان تماس بر میزان حذف ۲و٤-دی در فرایند الکتروفتوکاتالیستی

حذف ۲و٤-دی توسط فرآیند الکتروفتوکاتالیستی در زمان‌های ۰ تا۹۰ دقیقه مورد بررسی قرارگرفت (نمودار ٥). نتایج نشان داد که، با افزایش زمان تماس کارایی حذف افزایش یافته است و در ۹۰ دقیقه به بالاترین حد خود رسیده است.

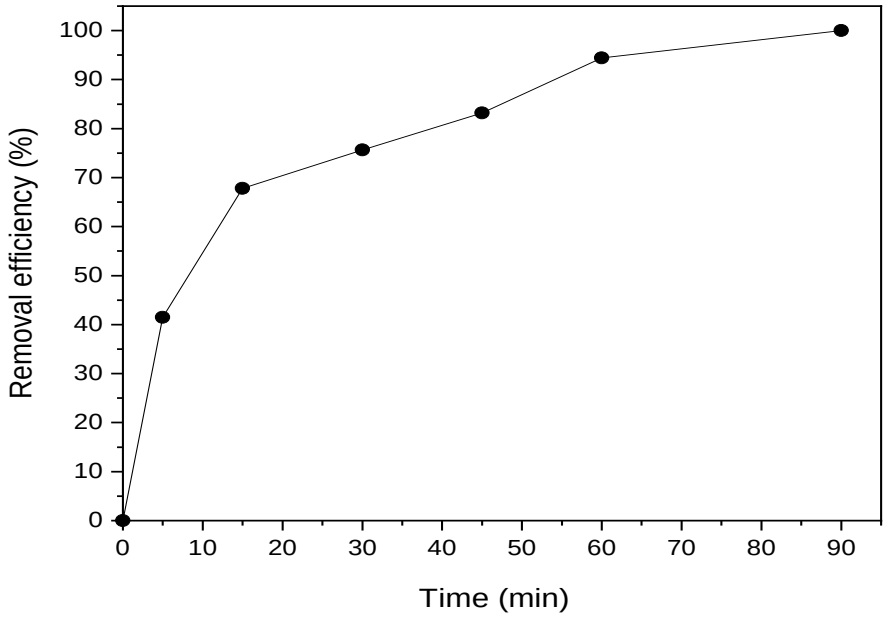
تحت شرایط بهینه به‌دست‌آمده برای فرآیند الکتروفتوکاتالیستی نمونه‌برداری و آزمایش TOC انجام شد (نمودار ۷). میزان TOC در شرایط بهینه بعد از گذشت ۹۰ دقیقه از زمان واکنش ۷۹/٥ درصد کاهش یافت.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.52547/jehe.8.4.358]



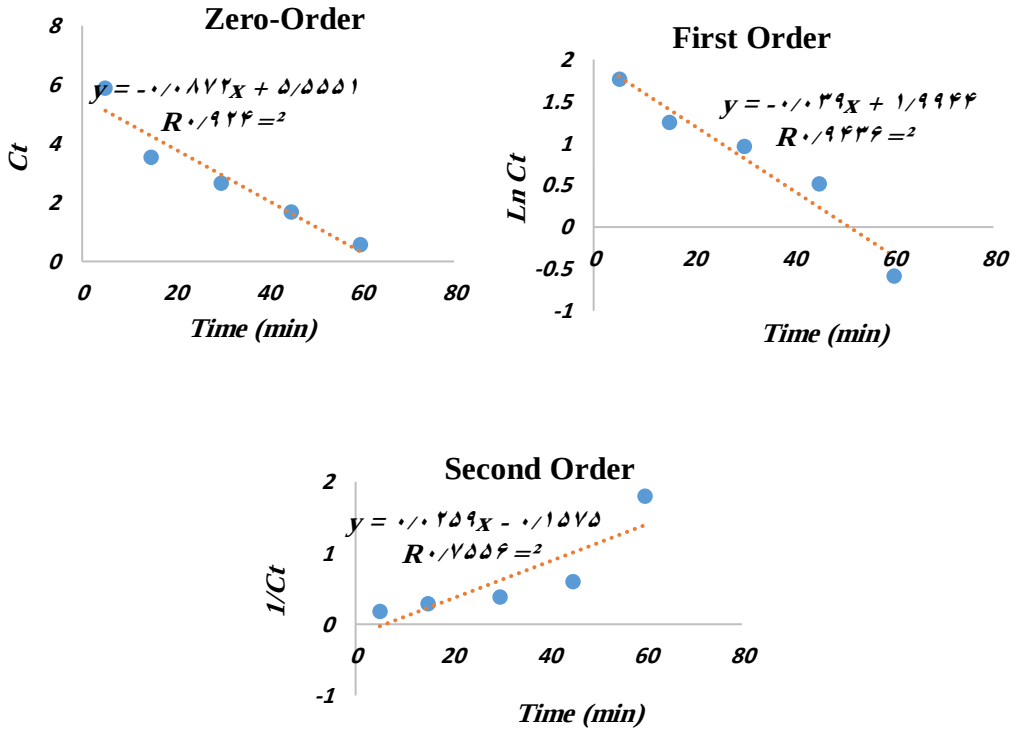
نمودار ٤: تأثیر سطح فتوالکترود بر کارایی حذف ۲و٤-دی در فرایند الکتروفتوکاتالیستی (**pH=7**، شدت جریان= ۲ میلی آمپر بر سانتی متر مربع، غلظت آلاینده= ۱۰ میلی گرم بر لیتر)



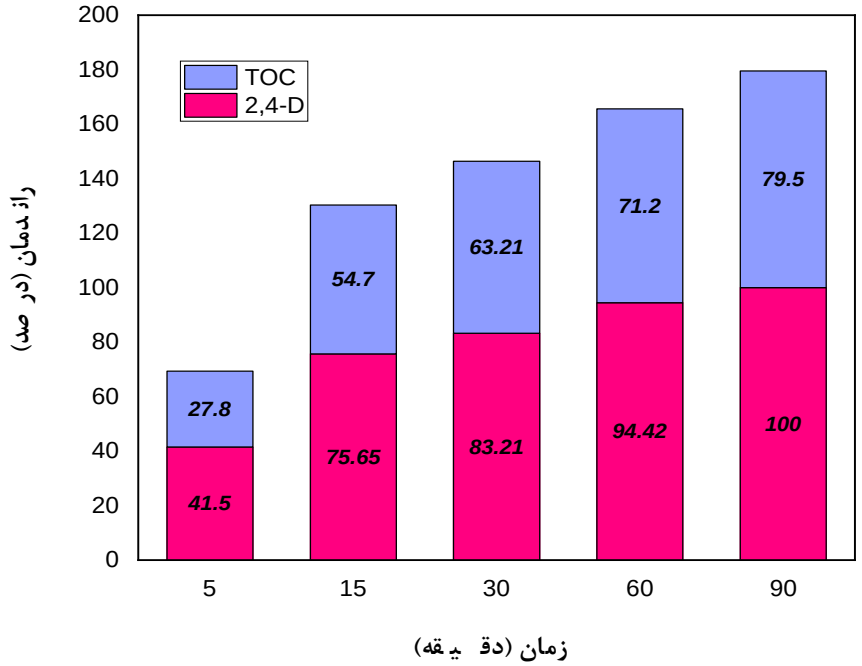
نمودار: تأثیر زمان تماس بر کارایی حذف ۲و٤-دی در فرایند الکتروفتوکاتالیستی (**pH=7**، شدت جریان= ۲ میلی آمپر بر سانتی متر مربع، غلظت آلاینده= ۱۰ میلی گرم بر لیتر، سطح فتوالکترود= ۳۲ سانتی متر مربع)

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.52547/jehe.8.4.358]



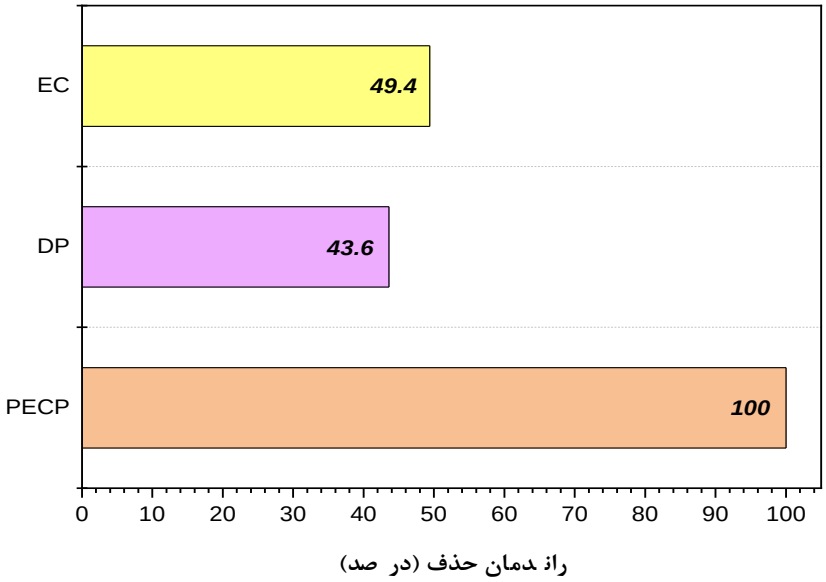
نمودار ۶: بررسی مدل سینتیکی درجه صفر، درجه اول و درجه دوم در فرایند الکتروفتوکاتالیستی(pH=7 ، شدت جریان= ۲ میلی آمپر بر سانتی متر مربع، غلظت آلاینده= ۱۰ میلی گرم بر لیتر، سطح فتوالکترود= ۳۲ سانتی متر مربع)



نمودار ۷: نتایج میزان معدنی سازی ۲و٤-دی با استفاده از فرایند فتوالکتروکاتالیست (pH=7، شدت جریان= ۲ میلی آمپر بر سانتی متر مربع، غلظت آلاینده= ۱۰ میلی گرم بر لیتر، سطح فتوالکترود= ۳۲ سانتی متر مربع)

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.52547/jehe.8.4.358]



نمودار ۸: مقایسه عملکرد سیستم در آرایش‌های مختلف از پارامترهای مورد استفاده در شرایط بهینه (**pH=7**، شدت جریان= ۲ میلی آمپر بر سانتی متر مربع، غلظت آلاینده= ۱۰ میلی گرم بر لیتر، سطح فتوالکترود= ۳۲ سانتی متر مربع، زمان= ۹۰ دقیقه)

نتایج مقایسه فرایندهای مختلف بر کارایی حذف ۲و٤-دی

پس از مشخص شدن شرایط بهینه سیستم، به‌منظور ارزیابی سیستم در حالات مختلف فتولیز (DP)، الکترولیز (EC) و فرآیند الکتروفتوکاتالیست (PECP) در شرایط بهینه، آزمایشاتی انجام و عملکرد سیستم در هر حالت مورد بررسی و مقایسه قرارگرفت. مقایسه تغییرات کارایی سیستم نیز در نمودار ۸ نشان داده شده است. مروری بر نمودار ۸ نشان می‌دهد که فاکتورهای موثر بر فرایند به‌تنهایی در حذف ۲و٤-دی دارای تاثیر می‌باشند، ولی میزان اثر آن‌ها به مراتب پایین‌تر از کاربرد تلفیقی آن‌ها می‌باشد. به نحوی که می‌توان ادعا نمود فاکتورهای مذکور دارای اثر هم افزایی در حذف ۲و٤-دی می‌باشند. به‌عبارتی استفاده از هرکدام از آن‌ها به‌تنهایی و یا حتی دو به دو دارای کارایی به مراتب کمتری نسبت به حالت تلفیقی و کاربرد هم‌زمان هر سه عامل می‌باشند.

بحث

تأثیر pH بر میزان حذف ۲و٤-دی در فرایند الکتروفتوکاتالیستی

pH محیط یکی از عوامل مؤثر بر سرعت واکنش‌های شیمیایی می‌باشد. بیشترین کارایی حذف ۲و٤-دی در فرایند الکتروفتوکاتالیستی در pH برابر ۷ حاصل گردید (نمودار ۱). با تغییرات pH محیط، نوع و تعداد رادیکال‌های تولیدی در فرآیند اکسیداسیون پیشرفته تغییر می‌یابد که می‌توان گفت نوع و تعداد رادیکال‌های تولیدی مهم‌ترین علت تأثیر تغییرات pH محیط بر تجزیه ترکیبات آلی در فرآیندهای اکسیداسیون می‌باشد [۳۳،۳۲]. با توجه به نتایج این مطالعه، با افزایش pH ، کارآیی حذف ۲و٤-دی کاهش می‌یابد. کاهش کارآیی ممکن است به‌علت رادیکال خواری رادیکال هیدروکسیل در pH بالا باشد (رابطه ۱) [۳٤]. به‌عبارت دیگر، در مقادیر بالاتر pH، وجود مقادیر زیاد رادیکال‌های $OH^{\cdot}$ سبب واکنش رادیکال-

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.52547/jehe.8.4.358]

رادیکال شـــده و ســـپس منجر به غیرفعال شـــدن متعاقب رادیکال‌های $OH^{\cdot}$ می‌گردد [۳۵].

$$OH^0 + OH^- \rightarrow O^{\cdot -} + H_2O \qquad (4)$$

حسینی و همکاران پژوهشی را در رابطه با کارایی فرآیند الکتروفتوکاتالیستی در حذف آفلوکساسین از محیط‌های آبی انجام دادند. نتایج حاکی از افزایش کارایی حذف در pH خنثی می باشد. همچنین مطالعه ای که توسط Bian و همکاران با موضوع حذف ۲و٤-دی بوسیله فرآیند فتوکاتالیستی انجام دادند، به این نتیجه دست یافتند که در pH خنثی کارایی حذف بیشتر می‌باشد [۳۶، ۳۷].

تأثیر شـــدت جریان الکتریکی بر میزان حذف ۲و٤-دی در فرایند الکتروفتوکاتالیستی

کارایی حذف ۲و٤-دی در فرایند الکتروفتوکاتالیســـتی با افزایش شـــدت جریان الکتریکی، افزایش می‌یابد. در شـــدت جریان ۲ میلی آمپر بر ســـانتی متر مربع کارایی حذف به بالاترین حد خود می رسد (نمودار ۲). افزایش شدت جریان ســـبب افزایش تولید جفت الکترون – حفره ایجاد شـــده می‌شودکه این خود سبب افزایش تولید رادیکال هیدروکسیل شـــده، در نتیجه کارایی حذف افزایش می‌یابد [۳۸، ۳۹]. در مطالعه‌ای که توســـط حســـینی و همکاران بر روی حذف سیپروفلوکساسین توسط فرآیند الکتروفتوکاتالیستی انجام گرفت نشـــان دادند که با افزایش شـــدت جریان الکتریکی از ۰/٦۲۵ به ۱/۸۷ میلی آمپر بر سانتی متر مربع کارایی از ۷٤/۰۲ به ۹۵/۵۵ درصـــد افزایش می‌یابد [۲۸]. در مطالعه‌ای که توسط Xiao و همکاران بر روی حذف بیس‌فنل آ توسط فرآیند الکتروفتوکاتالیســـتی انجام گرفت، اظهار داشـــتند که از طریق افزایش جریان اعمال شـــده، حذف بیس فنل آ در روند فرایند الکتروفتوکاتالیستی افزایش می‌یابد [٤۰].

تأثیر غلظت اولیه بر میزان حذف ۲و٤-دی در فرایند الکتروفتوکاتالیستی

بررســـی تغییرات غلظت اولیه ۲و٤-دی نشـــان داد که با افزایش غلظت آلاینده، میزان کارایی حذف کاهش می‌یابد. در غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر ۲و٤-دی در ۹۰ دقیقه به کارایی ۹۲/٤ می‌رسد در حالی‌که در غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر ۲و٤-دی به کارایی حذف ٦۲/٤ درصـــد به‌دســـت آمد (نمودار ۳). افزایش غلظت آلاینده، ســـبب تشـــکیل محصـــولات واســـطه می‌شود که این محصولات واسطه تولید شده موجب افزایش جذب اشعه UV و همچنین اشغال سایت‌های فعال کاتالیست می‌شـوند و متعاقباً رادیکال‌های آزاد سایت در دسترس جهت واکنش آلاینـده، کـاهش می‌یـابـد [٤۱، ٤۲]. دلیـل دیگر کـاهش کارایی حذف با افزایش غلظت، تولید تعداد مشـــخصـــی از رادیکال‌ها در محیط با تابش ثابتUV می‌باشـــد. این تعداد رادیکال تولیدی، قادر به جذب و حذف مقدار مشـــخصـــی از مولکول‌های ماده آلی اســـت [٤۳، ٤٤]. به این ترتیب، با افزایش غلظت اولیه آلاینده، مقدار رادیکال‌های موجود در محیط برای حذف مولکول‌های اضـــافی، کافی نبوده و تمامی رادیکال‌های موجود در اکسیداسیون مواد آلی مصرف شده [٤۵] و در نتیجه بازده حذف مواد آلی کاهش می‌یابد. در مطالعه‌ی دیگری که توسطBalakrishnan و همکاران بر روی حذف فتوکاتالیستی ۲و٤-دی با اسـتفاده از کاتالیسـت TiO_2/chitosan انجام شـد نشـان دادند که با افزایش غلظت اولیه ۲و٤-دی از ۲۵ به ۱۰۰ میلی گرم در لیتر، بازده تخریب از ۹٦/۲ به ٦۲/۳ درصـــد کاهش می‌یابد [٤٦].

تأثیر ســـطح فتوالکترود بر میزان حذف ۲و٤-دی در فرایند الکتروفتوکاتالیستی

بررسـی تغییرات سـطح فتوالکترود نشـان داد که با افزایش سـطح فتوالکترود، میزان کارایی حذف افزایش می‌یابد. این امر به‌دلیل افزایش جفت الکترون – حفره ایجاد شـــده با ســـطح

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.52547/jehe.8.4.358]

فتوالکترود در دسترس برای جذب نور و در نهایت تولید بیشتر رادیکال هیدروکسل می‌باشد. افزایش در جذب نور سبب افزایش تولید جفت الکترون حفره‌ها شده، که به دنبال آن تجزیه مواد آلاینده را افزایش می‌دهد (۲۰۶). در مطالعه‌ای که Xin و همکاران در حذف فنل با استفاده از فرآیند فتوالکتروکاتالیستی انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که با افزایش سطح فتوالکترود از ۱ به ۲ سانتی متر مربع، میزان حذف از ۶۰ درصد به ۹۰ درصد افزایش می‌یابد [۴۷].

تأثیر زمان تماس بر میزان حذف ۲و۴-دی در فرایند الکتروفتوکاتالیستی

زمان تماس، یکی از متغیرهای مؤثر و تأثیرگذار در افزایش عملکرد سیستم‌های اکسیداسیون پیشرفته می‌باشد. نتایج نشان داد که، با افزایش زمان تماس، کارایی حذف ۲و۴-دی افزایش می‌یابد (نمودار ۵). افزایش زمان تماس منجر به تماس بیشتر بین ماده آلاینده و عامل تصفیه کننده شده و کارایی نهایی را افزایش می‌دهد. با افزایش زمان تماس، روند واکنش‌های اکسایش-کاهش و تولید رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل ادامه داشته و رادیکال‌های آزاد تولید شده، صرف تجزیه آلاینده و ترکیبات واسط و میانی حاصله می‌شود [۴۸]. در مطالعه‌ای که توسط Ebrahimi و همکاران بر روی حذف ۲و۴-دی توسط فرآیند فتوکاتالیستی با نانوکامپوزیت Mn-doped ZnO/Graphene انجام گرفت، نتایج نشان دهنده افزایش کارایی با افزایش زمان تماس می باشد. زمان ۱۲۰ دقیقه را به عنوان زمان بهینه گزارش کردند [۴۹].

نتایج سینتیک و میزان معدنی‌سازی ۲و۴-دی در فرآیند الکتروفتوکاتالیست

نتایج این مرحله نشان می‌دهد که سرعت کاهش غلظت ۲و۴-دی از واکنش درجه یک پیروی می‌کند. سینتیک شیمیایی یکی از شاخه‌های علوم شیمی می‌باشد که به مطالعه سرعت واکنش‌های شیمیایی، عوامل مؤثر بر سرعت این واکنش‌ها و چگونگی انجام آن‌ها می‌پردازد. سرعت واکنش کمیتی تجربی بوده و با اندازه‌گیری سرعت مصرف واکنش دهنده‌ها، سرعت تولید فرآورده‌ها، لندازه‌گیری ویژگی‌های کمی و کیفی واکنش دهنده‌ها یا فرآورده‌ها مانند تغییر جرم، حجم، غلظت و رنگ و با توجه به شرایط لازم برای انجام واکنش به‌ویژه دما و فشار، می‌توان سرعت واکنش را به‌دست آورد [۵۰]. در مطالعه انجام شده بر روی حذف ۲و۴-دی در فرایند فتوکاتالیستی با استفاده از نانوکاتالیست TiO_2/ graphene oxide based molecularly imprinted polymer (SGOTNT@MIP) در حضور نور خورشید نشان دادند که فرآیند با ثابت سرعت $0/041\ min^{-1}$ از واکنش درجه یک پیروی می‌کند [۵۱].

تحت شرایط بهینه به‌دست‌آمده برای فرآیند الکتروفتوکاتالیستی، نمونه‌برداری و آزمایش TOC انجام شد. میزان TOC در شرایط بهینه بعد از گذشت ۹۰ دقیقه از زمان واکنش، ۷۹/۵ درصد کاهش یافت. در واقع کربن موجود در ۲و۴-دی در اوایل واکنش علی رغم کاهش میزان ۲و۴-دی با توجه به فعل و انفعالات شیمیایی، به صورت یک ترکیب آلی دیگر حاوی کربن در می‌آید. اما با ادامه واکنش رادیکال‌های تولیدی در فرایند با کاهش غلظت ۲و۴-دی اولیه، به محصولات واسط حمله کرده، آن‌ها را نیز تجزیه، و به محصولات آلی ساده تر و یا در نهایت به آب و دی اکسید کربن تبدیل می‌نمایند [۷، ۵۲، ۵۳].

نتایج مقایسه فرایندهای مختلف بر کارایی حذف ۲و۴-دی

فاکتورهای موثر بر فرایند به تنهایی در حذف ۲و۴-دی دارای تاثیر می باشند، ولی میزان اثر آن‌ها به مراتب پایین‌تر از کاربرد تلفیقی آن‌ها می‌باشد. به‌نحوی که می‌توان ادعا نمود فاکتورهای مذکور دارای اثر هم افزایی در حذف ۲و۴-دی می‌باشند. به‌عبارتی استفاده از هرکدام از آن‌ها به تنهایی و یا حتی دو به دو دارای کارایی به مراتب کمتری نسبت به حالت

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.52547/jehe.8.4.358]

تلفیقی و کاربرد هم‌زمان هر سه عامل می‌باشند. وقتی چندین فرآیند باهم به‌کار گرفته می‌شود، تولید رادیکال هیدروکسیل نسبت به هر فرآیند به تنهایی افزایش می‌یابد و سبب افزایش کارایی حذف می‌گردد [۵۴،۵۵]. فرایند الکتروفتوکاتالیست با استفاده از اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین آند و کاتد، سبب افزایش طول عمر جفت الکترون- حفره می‌گردد. در این حالت، امکان باز ترکیب شدن آن‌ها به حداقل می‌رسد و در نهایت موجب افزایش تولید رادیکال‌های هیدروکسیل می‌شود. به این ترتیب تولید رادیکال‌های اکسید کننده با پتانسیل اکسیداسیون و احیای بالا مانند رادیکال هیدروکسیل و سایر رادیکال‌ها و سوپراکسایدها افزایش یافته و موجب بهبود کارایی سیستم می‌شود [۱۴]. تاوفانگ و همکاران در مطالعه‌ای که بر روی حذف فتوالکتروکاتالیستی دیپترکس با استفاده از الکترود TiO_2/Ni انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که میزان تخریب دیپترکس با استفاده از فرایندهای فتوکاتالیست، الکتروکاتالیست و الکتروفتوکاتالیست پس از ۱۲۰ دقیقه واکنش به ترتیب ۴۲/۹، ۳۰/۳ و ۸۲/۶ درصد در حضور نور UV است [۵۶].

نتیجه‌گیری

در این تحقیق کارایی روش الکتروفتوکاتالیست در حضور نور UV-A و فتوالکترود Ni-ZnO تثبیت شده بر سطح فلورین تین اکساید (FTO) در حذف ۲و۴-دی از محیط‌های آبی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اثر پارامترهای بهره برداری شامل pH، میزان جریان الکتریکی، غلظت ۲و۴-دی، سطح الکترود و زمان واکنش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایشات حذف ۲و۴-دی نشان داد که در غلظت‌های پایین‌تر آلاینده و در pH برابر ۷، سطح الکترود ۳۲ سانتی متر مربع و شدت جریان برابر ۲ میلی آمپر بر سانتی متر مربع و حداکثر زمان تماس، سیستم دارای بیشترین کارآیی می‌باشد. فرآیند الکتروفتوکاتالیست جهت تصفیه پساب حاوی ۲و۴-دی در شرایط بهینه دارای کارایی حدود ۱۰۰ درصد می باشد. مطالعه سینتیکی سیستم نیز نشان داد که فرایند از واکنش درجه اول پیروی می‌نماید. میزان TOC در شرایط بهینه ۷۹/۵ درصد کاهش یافت. حالات مختلف فتولیز (DP)، الکترولیز (EC) و فرآیند الکتروفتوکاتالیست (PECP) به تنهایی در حذف ۲و۴-دی دارای تاثیر می‌باشند، ولی میزان اثر آن‌ها به مراتب پایین‌تر از کاربرد تلفیقی آن‌ها است. به‌طور کلی نتایج نشان داد، این فرآیند الکتروفتوکاتالیستی را می‌توان به‌عنوان یک روش مناسب برای حذف ۲و۴-دی در محیط آبی در نظر گرفت.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت‌های مالی و معنوی دانشگاه علوم پزشکی ایران برای انجام طرح تحقیقاتی با کد ۱۶۶۱۰ تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

References

1. Fadaei A, Dehghani MH, Nasseri S, et al. Organophosphorous pesticides in surface water of Iran. Bull Environ Contam Toxicol 2012;88(6): 867-9.
2. Mijin D, Savić M, Snežana P, et al. A study of the photocatalytic degradation of metamitron in ZnO water suspensions. Desalination 2009;249(1): 286-92.
3. Bazrafshan E, KORD MF, Faridi H, et al. Removal of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid (2, 4-D) from aqueous environments using single-walled carbon nanotubes. Health Scope 2013;2(1): 39-46 [In Persian].
4. Trivedi NS, Kharkar RA, Mandavgane S, editors. Utilization of Biomass Char for Removal of 2, 4-Dichlorophenoxyacetic Acid: a Study Using Cotton Plant Char. International Conference on Separation Technologies; 2016; India.
5. Retzinger Jr EJ, Mallory-Smith C. Classification of herbicides by site of action for weed resistance management strategies. Weed Technol 1997: 384-93.
6. Wang JZ, Zhong C, Wexler D, et al. Graphene-Encapsulated Fe3O4 Nanoparticles with 3D Laminated

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.52547/jehe.8.4.358]

Structure as Superior Anode in Lithium Ion Batteries. Chem Eur J 2011;17(2): 661-7.

7. Olmez-Hanci T, Arslan-Alaton I, Genc B. Bisphenol A treatment by the hot persulfate process: Oxidation products and acute toxicity. J Hazard Mater 2013;263, Part 2: 283-90.
8. Loomis D, Guyton K, Grosse Y, et al. Carcinogenicity of lindane, DDT, and 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid. Lancet Oncol 2015;16(8): 891.
9. Brillas E, Calpe JC, Casado J. Mineralization of 2, 4-D by advanced electrochemical oxidation processes. Water Res 2000;34(8): 2253-62.
10. Souza F, Saéz C, Lanza MR, et al. Removal of pesticide 2, 4-D by conductive-diamond photoelectrochemical oxidation. Appl Catal B 2016;180: 733-9.
11. Lee SC, Hasan N, Lintang HO, et al., editors. Photocatalytic removal of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid herbicide on copper oxide/titanium dioxide prepared by co-precipitation method. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; 2016: IOP Publishing.
12. Rezaei R, Mohseni M. Impact of pH on the kinetics of photocatalytic oxidation of 2, 4-dichlorophenoxy acetic acid in a fluidized bed photocatalytic reactor. Appl Catal B 2017;205: 302-9.
13. Navarro P, Gabaldón JA, Gómez-López VM. Degradation of an azo dye by a fast and innovative pulsed light/H 2 O 2 advanced oxidation process. Dyes and Pigm 2017;136: 887-92.
14. Kołodziejczak-Radzimska A, Jesionowski T. Zinc oxide—from synthesis to application: a review. Mater 2014;7(4): 2833-81.
15. Zhang X, Qin J, Xue Y, et al. Effect of aspect ratio and surface defects on the photocatalytic activity of ZnO nanorods. Sci Report 2014;4: 4596.
16. Nejati-Moghadam L, Esmaeili Bafghi-Karimabad A, Salavati-Niasari M, Safardoust H. Synthesis and characterization of SnO2 nanostructures prepared by a facile precipitation method. Journal of Nanostruct 2015;5(1): 47-53.
17. Schneider J, Matsuoka M, Takeuchi M, et al. Understanding TiO2 photocatalysis: mechanisms and materials. Chem Rev 2014;114(19): 9919-86.
18. Kim TW, Choi K-S. Nanoporous BiVO4 photoanodes with dual-layer oxygen evolution catalysts for solar water splitting. Science 2014;343(6174): 990-4.
19. Li C, Chen G, Sun J, et al. Doping effect of phosphate in Bi2WO6 and universal improved photocatalytic activity for removing various pollutants in water. Appl Catal B 2016;188: 39-47.
20. Senthilraja A, Subash B, Krishnakumar B, et al. Novel Sr–Au–ZnO: synthesis, characterization and photocatalytic activity. Superlattices Microstruct 2014;75: 701-15.
21. Pudukudy M, Hetieqa A, Yaakob Z. Synthesis, characterization and photocatalytic activity of annealing dependent quasi spherical and capsule like ZnO nanostructures. Appl Surf Sci 2014;319: 221-9.
22. Vayssieres L. Growth of arrayed nanorods and nanowires of ZnO from aqueous solutions. Adv Mater 2003;15(5): 464-6.
23. Kashi G, Hydarian N. Optimization Electrophotocatalytic Removal of Sulfanilamide From Aqueous Water by Taguchi Model. Bio Chem Res 2014;2015: 86-98.
24. Pramod N, Pandey S. Influence of Sb doping on the structural, optical, electrical and acetone sensing properties of In2O3 thin films. Ceram Int 2014;40(2): 3461-8.
25. Ashokkumar M, Muthukumaran S. Effect of Ni doping on electrical, photoluminescence and magnetic behavior of Cu doped ZnO nanoparticles. Journal Lumin 2015;162: 97-103.
26. Saharan P, Chaudhary GR, Lata S, et al. Ultra fast and effective treatment of dyes from water with the synergistic effect of Ni doped ZnO nanoparticles and ultrasonication. Ultrason Sonochem 2015;22: 317-25.
27. Pandiyan R, Delegan N, Dirany A, et al. Probing the electronic surface properties and bandgap narrowing of in situ N, W, and (W, N) doped magnetron-sputtered TiO2 films intended for electro-photocatalytic applications. J Phys Chem C 2015;120(1): 631-8.
28. Hosseini M, Esrafili A, Farzadkia M, et al. Degradation of ciprofloxacin antibiotic using photo-electrocatalyst process of Ni-doped ZnO deposited by RF sputtering on FTO as an anode electrode from aquatic environments: Synthesis, kinetics, and ecotoxicity study. Microchem J 2020;154: 104663.
29. Asgari. G, Chavoshani. A, Seid-Mohammadi. A, Rahmani. A. Removal of Pentachlorophenol Using Microwave Assisted Persulfate from Synthetic Wastewater. J Water Wastewater 2013;25(3): 29-37 [In Persian].
30. Guo Y, Zhou J, Lou X, et al. Enhanced degradation of Tetrabromobisphenol A in water by a UV/base/persulfate system: Kinetics and intermediates. Chem Eng J 2014;254: 538-44.
31. Yegane Badi M, Dehghanifard E. Study of the Efficiency of Non-Homogeneous Catalytic Ozonation Process using a Catalyst of Magnetic Nanoparticles of Iron Oxide Doped with Silica and Titanium Dioxide in Removal of Metronidazole from Synthetic Wastewater. J Environ Health Eng 2018;5(4): 323-36 [In Persian].
32. Movahedyan H, Mohammadi AS, Assadi A. Comparison of different advanced oxidation processes degrading p-chlorophenol in aqueous solution. J Environ Health Sci Eng 2009;6(3): 153-60.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.52547/jehe.8.4.358]

33. Shiying Y, Ping W, Xin Y, et al. A novel advanced oxidation process to degrade organic pollutants in wastewater microwave-activated persulfate oxidation. J Environ Sci 2009;21(9): 1175-80.

34. Huang K-C, Couttenye RA, Hoag GE. Kinetics of heat-assisted persulfate oxidation of methyl tert-butyl ether (MTBE). Chemosphere 2002;49(4): 413-20.

35. Norzaee S, Djahed B, Khaksefidi R, Mostafapour FK. Photocatalytic degradation of aniline in water using CuO nanoparticles. J Water Supply Res T 2017;66(3): 178-85.

36. Hosseini M, Esrafili A, Farzadkia M, et al. Application of Ni-doped ZnO deposited by RF magnetron sputtering technique on FTO as a photoanod in Photo-Electrocatalysis process of Ofloxacin degradation: synthesis, kinetics, and ecotoxicity study. Int J Environ Anal Chem 2020: 1-17.

37. Bian X, Chen J, Ji R. Degradation of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid (2, 4-D) by novel photocatalytic material of tourmaline-coated TiO2 nanoparticles: kinetic study and model. Mater 2013;6(4): 1530-42.

38. Ranjit PJD, Palanivelu K, Lee C-S. Degradation of 2, 4-dichlorophenol in aqueous solution by sono-Fenton method. Korean J Chem Eng 2008;25(1): 112-7.

39. Ghosh D, Solanki H, Purkait M. Removal of Fe (II) from tap water by electrocoagulation technique. J Hazard Mater 2008;155(1-2): 135-43.

40. 4Xiao K, Liang H, Chen S, et al. Enhanced photoelectrocatalytic degradation of bisphenol A and simultaneous production of hydrogen peroxide in saline wastewater treatment. Chemosphere 2019;222: 141-8.

41. 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): 1-10.

42. Liu X, Zhou Z, Jing G, Fang J. Catalytic ozonation of Acid Red B in aqueous solution over a Fe–Cu–O catalyst. Sep Purif Technol 2013;115: 129-35.

43. Daneshvar N, A.O.b., Djafarzadeh N. Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: An investigation of the effect of operational parameters. J Hazard Mater 2006: 116-22.

44. Mollah SP, Patil M. Treatment of orange II azo-dye by electrocoagulation (EC) technique in a continuous flow cell using sacrificial iron electrodes. J Hazard Mater 2004;109: 165-71.

45. M. Panizza GC. Influence of anode material on the electrochemical oxidation of 2-naphthol Part 2. Bulk electrolysis experiments. Electrochim 2004;49: 3221-6.

46. Balakrishnan A, Sowmya A, Gopalram K. Immobilized TiO2/chitosan beads for photocatalytic degradation of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid. Int J Bio Macromol 2020.

47. Xin Y, Gao M, Wang Y, Ma D. Photoelectrocatalytic degradation of 4-nonylphenol in water with WO3/TiO2 nanotube array photoelectrodes. Chem Eng J 2014;242: 162-9.

48. Lin H, Wu J, Zhang H. Degradation of bisphenol A in aqueous solution by a novel electro/Fe3+/peroxydisulfate process. Sep Purif Technol 2013;117: 18-23.

49. Ebrahimi R, Mohammadi M, Maleki A, et al. Photocatalytic degradation of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid in aqueous solution using Mn-doped ZnO/graphene nanocomposite under LED radiation. J Inorg Organomet Polym Mater 2020;30(3): 923-34.

50. Sharma J, Mishra, IM, Dionysiou, Dionysios D, Kumar, Vineet. Oxidative removal of Bisphenol A by UV-C/peroxymonosulfate (PMS): Kinetics, influence of co-existing chemicals and degradation pathway. Chem Eng J 2015;276: 193-204.

51. Anirudhan T, Anju SM. Synthesis and evaluation of TiO2 nanotubes/silylated graphene oxide-based molecularly imprinted polymer for the selective adsorption and subsequent photocatalytic degradation of 2, 4-Dichlorophenoxyacetic acid. J Environ Chem Eng 2019;7(5): 103355.

52. Subagio DP, Srinivasan M, Lim M, Lim T-T. Photocatalytic degradation of bisphenol-A by nitrogen-doped TiO2 hollow sphere in a vis-LED photoreactor. Appl Catal B 2010;95(3–4): 414-22.

53. Kohzadi O, Reshadi P, Jamshidi N. Comparing the performance of advanced photochemical oxidation technologies for the removal of phenol and bisphenol A from aqueous solutions. National Conference of wastewater and solid waste management in the oil and energy industries2012.

54. Yi H, Yan M, Huang D, et al. Synergistic effect of artificial enzyme and 2D nano-structured Bi2WO6 for eco-friendly and efficient biomimetic photocatalysis. Appl Catal B 2019;250: 52-62.

55. Zhao X, Pan D, Chen X, et al. g-C3N4 photoanode for photoelectrocatalytic synergistic pollutant degradation and hydrogen evolution. Appl Surf Sci 2019;467: 658-65.

56. Fang T, Yang C, Liao L. Photoelectrocatalytic degradation of high COD dipterex pesticide by using TiO2/Ni photo electrode. J Environ Sci 2012;24(6): 1149-56.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.52547/jehe.8.4.358]

Journal of Environmental Health Engineering, August;2020; Vol. 8, No4: 358-374

Application of Ni-Doped ZnO Nanoparticles for the removal of 2,4-D Pesticide from aqueous Environment by Electro-photo catalytic Process

Hassan Pourmoslemi[1,2], Mahdi Farzadkia[1,2], Roshanak Rezaei[1,2], Mojtaba yegane[1,2], Mahdi Hoseini[1,2], Mitra Gholami[1,2*]

[1] Research Center for Environmental Health Technology, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
[2] Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Email: gholamim@iums.ac.ir

Received:; Accepted:

ABSTRACT

Background and objective: Increasing use of pesticides along with an inadequate discharging of agricultural effluents has polluted water resources and severely affected the environment. 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) is one of the herbicides which is widely used all over the world. The aim of this study was to evaluate the efficiency of an electro-photo catalytic process for the removal of the 2,4-D from aqueous media. In this regard, Zn-doped Ni anode was stabilized on FTO surface by sputtering method.

Materials and methods: In the present study, the effects of different variables on the efficiency of the electro-photo catalytic process such as pH (3, 5, 7, 9, and 11), electricity current (1-2 mA/cm^2), electrode surface area (16-32 cm^2), initial concentration of 2,4-D (10-50 mg/L) and retention time (0-90 min) were investigated in a batch model and on a laboratory scale. Besides, mineralization and kinetics of the process under the optimal conditions were studied. The residual concentration of 2,4-D was measured by HPLC at 283 nm.

Results: The results showed that the highest removal efficiency of 2,4-D was obtained under the following conditions: pH=7, electricity current=2 mA/cm^2, electrode surface area=32 cm^2, initial concentration=10 mg/L and retention time=90 min. Under the optimal conditions, the maximum removal efficiency (i.e., 100%) and TOC of 79.5% were achieved. In addition, the kinetic studies revealed that the current process followed the first-kinetic-order model.

Conclusion: According to the obtained results, the applied electro-photo catalytic process can be considered as a suitable method for the removal of 2,4-D in aqueous solutions.

Keywords: 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid, Electro-photo catalytic process, UV light.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.52547/jehe.8.4.358]