ORIGINAL ARTICLE

Comparing the Efficiency of UV/TiO_2 and UV/O_3 Processes in Degradation of Sulfonamide Antibiotics in Aquatic Solution

Mahsa Tahergorabi[1],
Mohammad Malakootian[2],
Samaneh Dehghan[3],
Ali Esrafili[4],
Majid Kermani[5],
Mojtaba Yegane Badi[6]

[1] Assistant Professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Jiroft University of Medical Sciences, Jiroft, Iran
[2] Professor, Department of Environmental Health Engineering, Environmental Health Engineering Research Center, Faculty of Public Health, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran
[3] Assistant Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Public Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
[4] Associate Professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran
[5] Professor, Research Center for Environmental Health Technology, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran
[6] PhD Student in Environmental Health Engineering, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

(Received December 14, 2021 ; Accepted April 5, 2021)

Abstract

Background and purpose: Emerging pollutants such as antibiotics are resistant to biodegradation. The aim of this study was to compare the effect of photocatalytic and Ozonation photolysis on decomposition of Sulfonamide antibiotics (Sulfacetamide, Sulfathiazole, Sulfamethoxazole, and Sulfadiazine) in aquatic environments.

Materials and methods: In this study, experiments were conducted discontinuously. The effect of some parameters, including pH, initial antibiotic concentration, ozone concentration, contact time, and concentration of TiO2 on degradation of Sulfonamide antibiotic was investigated. Characteristics of this catalyst were analyzed using FTIR, XRD, SEM, and EDX techniques. The concentrations of antibiotics were measured by an HPLC analyzer equipped with a UV detector at a wavelength of 270 nm.

Results: The highest percentage of sulfonamide removal under optimal conditions (pH 5, initial concentration of antibiotics= 10 mg/l, ozone concentration= 0.22 g/h, and catalyst concentration= 1 g/l) were obtained by photocatalytic and photolysis processes (92.1% and 100%, respectively). Intermediate products produced under these conditions included acetic acid, butyric acid, and low molecular weight products. TOC removal efficiencies of sulfonamides by photocatalytic and ozonation photolys were 80% and 79.6%, respectively.

Conclusion: The study showed that the rate of ozonation photolysis reaction in the removal of sulfonamides was 2.6 times faster than the photocatalytic process.

Keywords: Antibiotics sulfonamides, Photocatalytic, Ozonation photolysis

J Mazandaran Univ Med Sci 2021; 31(198): 73-86 (Persian).

* **Corresponding Author: Mahsa Tahergorabi -** School of Health, Jiroft University of Medical Sciences, Jiroft, Iran
(E-mail: tahergorabi.m@gmail.com)

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.17359260.1400.31.198.13.5]

پژوهشی

مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران
دوره سی و یکم شماره 198 تیر سال 1400 (86-73)

مقایسه کارایی فرآیندهای فتوکاتالیستی و فتولیز ازناسیون در تجزیه آنتی بیوتیک های سولفانامید از محلول آبی

مهسا طاهرگورابی[1]
محمد ملکوتیان[2]
سمانه دهقان[3]
علی اسرافیلی دیزجی[4]
مجید کرمانی[5]
مجتبی یگانه بادی[6]

چکیده

سابقه و هدف: مهم‌ترین علت بررسی آلاینده‌های نوظهور از جمله آنتی‌بیوتیک‌ها در مطالعه حاضر به سبب مقاومت آن‌ها به تجزیه بیولوژیکی است. هدف از این تحقیق، تجزیه آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید از محیط‌های آبی با مقایسه نمودن کارایی دو فرایند فوتوکاتالیستی و فتولیز ازناسیون است.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه آزمایشات در فاز ناپیوسته انجام شدند. اثر پارامترهای اجرایی شامل pH، غلظت اولیه آنتی‌بیوتیک، غلظت ازن، زمان تماس و غلظت کاتالیست TiO_2 بر روی تجزیه آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید بررسی شد. مشخصات کاتالیست دی‌اکسید تیتانیوم با تکنیک‌های FTIR,XRD, SEM, EDX مورد آنالیز قرار گرفت. غلظت آنتی‌بیوتیک‌ها توسط دستگاه آنالیزور HPLC مجهز به دتکتور UV در طول موج 270 نانومتر اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد بالاترین درصد حذف سولفانامیدها درشرایط بهینه، pH =5، غلظت اولیه آنتی‌بیوتیک‌ها 10 میلی‌گرم بر لیتر، غلظت ازن 0/22 گرم بر ساعت، غلظت کاتالیست 1 گرم بر لیتر به ترتیب در فرایندهای فتوکاتالیستی و فتولیز ازناسیون 92/1 و 100 درص حاصل شد. محصولات واسطه تولیدی در این شرایط شامل اسیدهای استیک، بوتیریک و محصولاتی با وزن مولکولی پایین بوده است. راندمان حذف TOC سولفانامیدها 80 و 79/6 درصد به‌دست آمد.

استنتاج: نتایج نشان داد سرعت واکنش فتولیز ازناسیون در حذف سولفانامیدها، 2/6 برابر بیش‌تر از فرایند فوتوکاتالیستی است.

واژه های کلیدی: آنتی‌بیوتیک سولفانامید، فوتوکاتالیستی، فتولیز ازناسیون

مقدمه

آنتی‌بیوتیک‌ها برای درمان بیماری‌ها و جلوگیری از شیوع بیماری‌های عفونی استفاده می‌شوند(1). در کل 50-80 درصد آن‌ها از طریق ادرار و مدفوع، نسبتا متابولیزه شده و از بدن انسان دفع می‌شود. مهم‌ترین علت

مولف مسئول: مهسا طاهرگورابی - تهران: دانشگاه علوم پزشکی ایران، دانشکده بهداشت E-mail:tahergorabi.m@gmail.com

1. استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جیرفت، جیرفت، ایران
2. استاد، گروه بهداشت محیط، مرکز تحقیقات مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران
3. استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
4. دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران
5. استاد، مرکز تحقیقات تکنولوژی مهندسی بهداشت محیط، گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران
6. دانشجوی دکترا گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت : 1399/9/24 تاریخ ارجاع جهت اصلاحات : 1399/10/8 تاریخ تصویب : 1400/1/16

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-21]
[DOR: 20.1001.1.17359260.1400.31.198.13.5]

بررسی آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط، مقاومت آن‌ها علیه میکروارگانیسم‌ها است(1). افزایش یافتن بروز مقاومت آنتی‌بیوتیک‌ها درمحیط سبب مستعدشدن میکروارگانیسم‌ها به آن‌ها و کاهش درمان موثر علیه آنتی‌بیوتیک‌ها، سلامتی بشر را تهدید خواهد کرد(2). آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید از دسته آلاینده‌های آلی مقاوم به تجزیه بیولوژیکی است(2). سولفانامیدها معمول‌ترین آنتی‌بیوتیک‌های مورد استفاده در درمان دام‌های حیوانی است. از اوایل دهه 1940 بیش از 150 نوع سولفانامید به عنوان داروی انسانی و حیوانی شناخته شده است(2). تمام سولفانامیدها به جزء سولفاسالازین در آب محلول و از دسته مولکول‌های قطبی با ویژگی‌های آمفوتریک هستند(3). سولفانامیدهای آلیفاتیک نسبت به سولفانامیدهای آروماتیک دارای حلالیت بیش‌تری هستند(4). ارزیابی عملکرد فرآیندهای متداول تصفیه آب درحذف آلاینده‌های نوظهور توسط Ternes و همکارانش بر روی حذف داروهای بزافیبرات، کلوفیبریک اسید، کاربامازپین و دیکلوفناک نشان داد کارایی آن در حذف آلاینده‌های نوظهور کم‌تر از 30 درصد بوده است(5).

احمدی و اسدی در سال 1398 با حذف آنتی‌بیوتیک سیپروفلوکساسین از محلول‌های آبی توسط فرایند انعقاد شیمیایی نشان دادند حذف آن با استفاده از ماده منعقد کننده آلوم قادر به تامین حد استاندارد حفاظت محیط زیست نبوده است(6). محمدی کلهری و همکارانش در سال 1395 نشان دادند درصد جذب مترونیدازول با پامیس کربنه دارای کم‌ترین مقدار بوده است(7). غلامی و همکارانش در سال 1399 مشاهده کردند حذف آنتی‌بیوتیک تتراسایکلین و سیپروفلوکساسین با آنزیم هورس رادیش پراکسیداز از فاضلاب با افزایش زمان واکنش فعالیت آنزیم به تدریج کاهش می‌یابد و پس از 2 ساعت اکثر آنزیم‌ها فعالیت خود را از دست می‌دهند. بنابراین بازده حذف آنتی‌بیوتیک‌ها به ترتیب 40 و 95 درصد به‌دست آمد(8). بنابراین فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته با تولید رادیکال هیدروکسیل با قدرت اکسیداسیون بالا قادر به حذف ترکیبات آلی مقاوم به تجزیه بیولوژیکی است(9). در فرآیند فوتوکاتالیستی، دی‌اکسید تیتانیوم یک نیمه هادی می‌باشد که قادر است نور UV در طول موج کم‌تر از 385 نانومتر را جذب کند و سبب انتقال الکترون از باند والانس به باند هدایت می‌شود(9). $hole^+$ در باند والانس عامل اکسیدکننده قوی است که در حضور آب و مولکول اکسیژن به عنوان پذیرنده الکترون تولید رادیکال هیدروکسیل می‌کند(10). Abellan و همکارانش با بررسی سینتیک تجزیه سولفامتاکسازول در فرایند فوتوکاتالیستی با غلظت اولیه 10 میلی‌گرم بر لیتر و دوزاژ کاتالیست 250 میلی‌گرم بر لیتر نشان دادند کارایی حذف سولفامتاکسازول بعد از 30 دقیقه زمان تماس برابر با 90 درصد حاصل شد(11). حضور بدام اندازهای رادیکال مانند اگزالات آمونیوم، ترت بوتانل، متانول و اتانول تولید گونه های اکسیداتیو در محلول را کاهش و جذب رادیکال خوارها بر سطح نانوکاتالیست Tio_2 سبب بازدارندگی در تولید جفت الکترون/$hole^+$ و کاهش فعالیت اکسیداسیون می‌شود(12). هدف از این مطالعه، بررسی پارامترهای موثر اجرایی و تعیین نوع محصولات واسطه تولیدی توسط GC-MS بر روی کارایی حذف آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید در محلول آبی با مقایسه کارایی فرآیندهای فوتوکاتالیستی و فتولیز ازناسیون است.

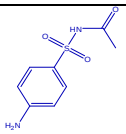
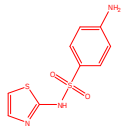
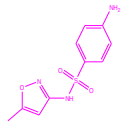
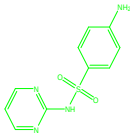
مواد و روش ها

مواد مصرفی

آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید و مواد شیمیایی از شرکت سیگما آلدریچ و نانوکاتالیست دی اکسید تیتانیوم دگوسا P25 از شرکت دگوسا خریداری شد. همه سولفانامیدها دارای گروه‌های عامل اسیدی و بازی هستند و حالت یونیزاسیون آن‌ها با ثابت انحلال اسیدی (PK_{a1} , PK_{a2}) بیان می‌شود(13). ساختار شیمیایی آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید در جدول شماره 1 نشان داده شده است(13).

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-21]
[DOR: 20.1001.1.17359260.1400.31.198.13.5]

جدول شماره 1: ساختار شیمیایی و خصوصیات آنتی بیوتیک های سولفانامید

ترکیب	ساختار شیمیایی	فرمول شیمیایی	وزن مولی (g/mole)	PK_{a1}	PK_{a2}	حلالیت در آب (g/L)
سولفاستامید		$C_8H_{10}N_2O_3S$	214.243	2.5	5.27	12.5
سولفاتازول		$C_9H_9N_3O_2S_2$	255.3	2	7.1	0.48
سولفامتاکسازول		$C_{10}H_{11}N_3O_3S$	253.3	1.7	5.6	0.281
سولفادیازین		$C_{10}H_{10}N_4O_2S$	250.3	2	6.4	0.13

مشخصات نانوکاتالیست TiO_2

تعیین مرفولوژی، گروه‌های عامل سطحی و کریستاله بودن نانوکاتالیست TiO_2 توسط آنالیزهای XRD، FTIR، FE-SEM و پ EDX مشخص شد. ویژگی بار سطحی کاتالیست نقطه زتا پتانسیل (pH_{PZC}) طبق روش دیگر محققین اندازه‌گیری شد(14).

خصوصیات پایلوت

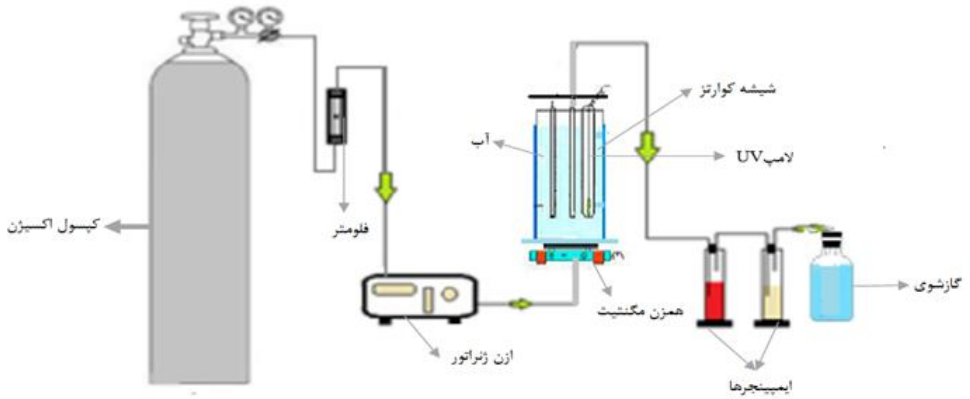
راکتور مورد استفاده در این مطالعه شامل کپسول اکسیژن، ژنراتور ازن، ظرف واکنش به حجم 1 لیتر و لامپ UVC فشار بالا 150 وات با طول موج کمتر از 280 نانومتر طراحی شده است. شماتیک راکتور در تصویر شماره 1 نشان داده شده است. برای تعیین غلظت ازن تولیدی از روش یدومتریک و تیتراسیون استفاده شد. سپس با استفاده از معادله شماره 1 غلظت ازن تولیدی تعیین شد.

معادله شماره 1 :

$$O3 = \frac{(A+B) \times N \times 24}{T}$$

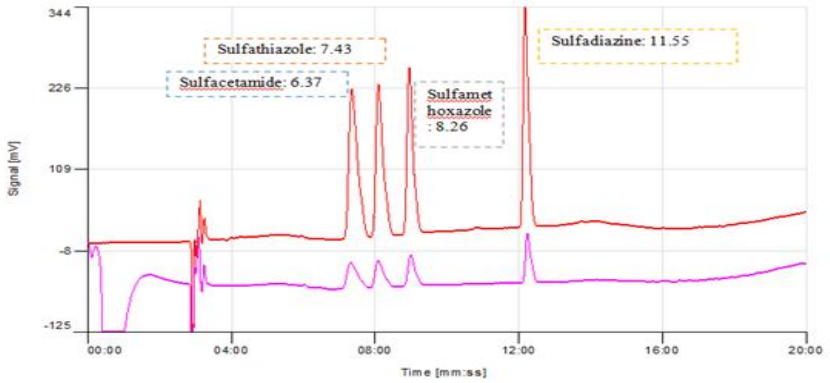
دستگاه‌های مورد استفاده

برای تعیین غلظت آنتی‌بیوتیک‌ها از دستگاه HPLC مدل Cecil CE4200 و ستون C18 با قطر داخلی 4/6 میلی‌متر در طول موج 270 نانومتر با فاز حامل متانول و بافر تری‌کلرواستیک اسید تعدیل شده در pH=3 با اسیدسولفوریک به نسبت حجمی (v/v) 80:20 با دبی 1/5ml/min استفاده شد(15). مواد واسطه تشکیل شده حاصل از تجزیه آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید با استفاده از GC-MS و جهت معدنی‌سازی آن‌ها از آنالیزکننده کل کربن آلی (TOC) مدل Multi N/C,3100 استفاده گردید. کروماتوگرام آنالیز سولفانامیدها در نمودار شماره 1 و کروماتوگرام محصولات واسطه تولیدی در نمودار شماره 2 نشان داده شده است.

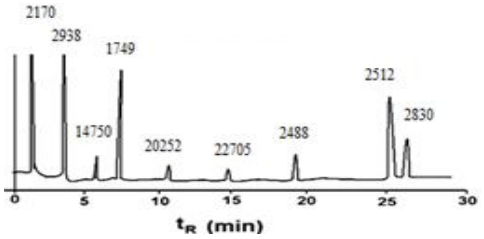


تصویر شماره 1: نمای شماتیک راکتور مورد استفاده در این مطالعه

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-21]
[DOR: 20.1001.1.17359260.1400.31.198.13.5]



نمودار شماره 1: کروماتوگرام حاصل از آنالیز سولفانامیدها توسط HPLC



نمودار شماره 2: کروماتوگرام محصولات واسطه تولیدی توسط GC/MS

روش آزمایش

مطالعه حاضر در مقیاس آزمایشگاهی به صورت ناپیوسته انجام گرفت. نمونه‌برداری بر اساس روش یک فاکتور در زمان صورت‌گرفت. اثر پارامترهایی مانند غلظت کاتالیست (0/1، 0/5 و 1 گرم بر لیتر)، pH (3، 5، 7، 9 و 11)، غلظت اولیه آنتی‌بیوتیک (10، 20 و 40 میلی گرم بر لیتر)، زمان تماس (5-60 دقیقه)، غلظت ازن (0/1، 0/15، 0/22 گرم بر ساعت)، نوع بدام انداز رادیکال (ترت بوتانل، اگزالات آمونیوم و بنزوکوئینون) و مطالعات سینتیکی بر روی تجزیه فتولیز ازناسیون و فوتوکاتالیستی آنتی‌بیوتیک‌ها بررسی شد. برای تعیین وضعیت پراکندگی بار الکتریکی در سطح کاتالیست مقدار pH_{zpc} سنجش گردید. در این روش محلول نیترات سدیم 0/1 نرمال به حجم 40 میلی‌لیتر تهیه شد. pH محلول تهیه شده با اسید کلریدریک و هیدروکسید سدیم 0/1 نرمال در رنج 2 تا 12 تنظیم شد. سپس با افزودن 0/2 گرم نانوذره دی‌اکسید تیتانیوم در هریک از نمونه‌ها بعد از 48 ساعت pH هر یک از نمونه‌ها اندازه‌گیری و pH_{zpc} تعیین شد. در کلیه آزمایشات تمام متغیرها ثابت بوده و با تغییر در یک متغیر، مقدار پارامتر بهینه تعیین و در آزمایشات مراحل بعدی مورد استفاده قرار گرفت.

یافته ها

مشخصات نانوذرات کاتالیست Tio_2

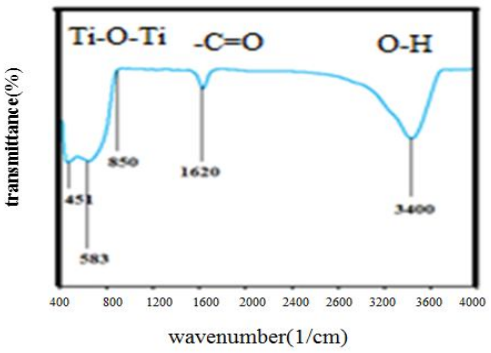
آنالیز FTIR، XRD، SEM و EDX

آنالیز FTIR بر روی نانوکاتالیست دی‌اکسید تیتانیوم در دامنه $400cm^{-1}$-$4000cm^{-1}$ انجام شد. در نمودار شماره3، طیف مشاهده شده بین cm^{-1} 850-451 مربوط به باند Ti-O-Ti، طیف $1620cm^{-1}$ و $3370cm^{-1}$-$3400cm^{-1}$ به‌ترتیب مربوط به باند C=O– و O-H از گروه هیدروکسیل است. نمودار شماره4، پیک‌های مشاهده شده برای نانوکاتالیست دی‌اکسید تیتانیوم در زوایای 2θ برابر با 25/5، 38، 48، 54، 55، 70/5 و 75 نشان‌دهنده نوع آناتاز دی اکسید تیتانیوم و در زوایای 27، 37، 42 و 62 نشان دهنده نوع روتایل دی‌اکسید تیتانیوم می‌باشد. با استفاده از رابطه دبای-شرر اندازه تقریبی ذرات نانوکاتالیست دی‌اکسید تیتانیوم برابر با 21 نانومتر تعیین گردید(14). آنالیز SEM دی‌اکسید تیتانیوم در تصویر شماره 2 و آنالیز EDX در نمودار شماره5 نشان می‌دهد ذرات نانوکاتالیست تجمع فراوانی دارند و نانوذرات TiO_2 دارای عناصر Ti-O-Ti است.

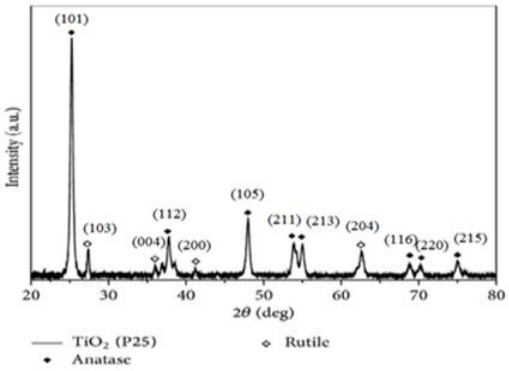
معادله شماره 2 :

$$D = k\frac{\delta}{\beta cos_\theta}$$

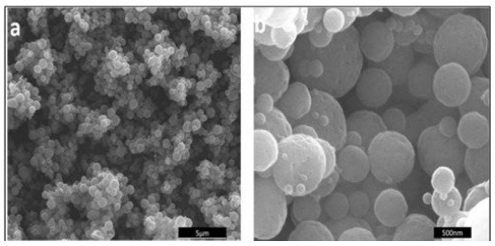
[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-21]
[DOR: 20.1001.1.17359260.1400.31.198.13.5]



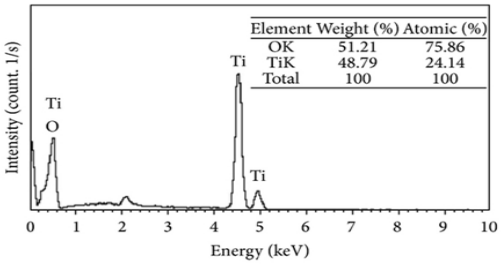
نمودار شماره 3: تصویر FTIR از نانوکاتالیست دی اکسید تیتانیوم



نمودار شماره 4: تصویر XRD از دی اکسید تیتانیوم



تصویر شماره 2: تصویر SEM از دی اکسید تیتانیوم



نمودار شماره 5: تصویر EDX از دی اکسید تیتانیوم

بررسی تاثیر pH بر کارایی فرایند فوتوکاتالیستی و فتولیز ازناسیون

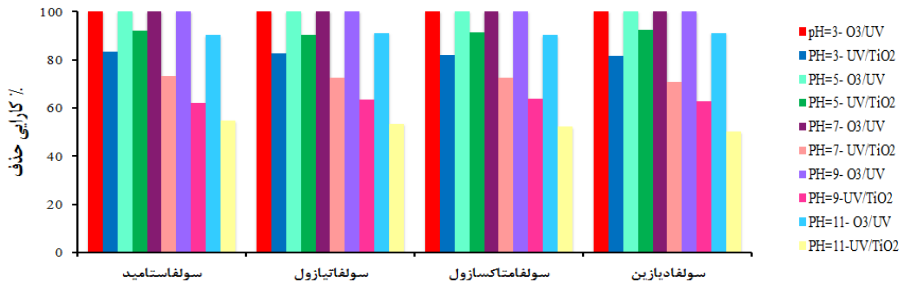
اثر pH اولیه بر روی تجزیه آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید با متغیر بودن pH از 3 تا 11 در غلظت اولیه آنتی‌بیوتیک‌ها 10 میلی گرم بر لیتر، غلظت ازن ورودی 0/22 گرم بر ساعت و غلظت کاتالیست 1 گرم بر لیتر در زمان تماس بهینه بررسی شد. نمودار شماره6 نشان می‌دهد کارایی تجزیه از 83/1 به 92/1 درصد از 82/7 به 90/1 درصد، از 81/7 به 91/2 درصد و از 81/4 به 92/3 درصد برای سولفاستامید، سولفاتیازول، سولفامتاکسازول و سولفادیازین به ترتیب از pH 3 به 5 افزایش یافت. کارایی تجزیه به 54/6 درصد برای سولفاستامید، 53/4 درصد برای سولفاتیازول، 52/1 درصد برای سولفامتاکسازول و 50/1 درصد برای سولفادیازین در pH برابر با 11 کاهش یافت. همچنین کارایی تجزیه فتولیز ازناسیون از 93/7 به 100 درصد، از 92/1 به 100 درصد، از 93/2 به 100 درصد و از 92/1 به 100 درصد برای سولفاستامید، سولفاتیازول، سولفامتاکسازول و سولفادیازین به ترتیب از pH 3 به 5 افزایش یافت. کارایی تجزیه به 54/3 درصد برای سولفاستامید، 55/2 درصد برای سولفاتیازول، 52/1 درصد برای سولفامتاکسازول و 53/1 درصد برای سولفادیازین در pH برابر با 11 کاهش یافت. در مطالعه حاضر، بیش‌ترین راندمان حذف در pH برابر با 5 مشاهده شد.

بررسی تاثیر دوزاژ کاتالیست برکارایی فرایند فوتوکاتالیستی

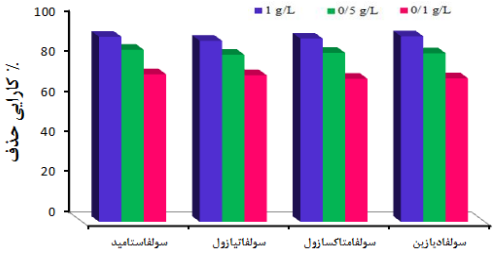
اثر دوزاژ کاتالیست بر روی تجزیه آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید با متغیر بودن دوزاژ کاتالیست (0/1، 0/5 و 1 گرم بر لیتر) در شرایط بهینه و مدت زمان تماس 60 دقیقه بررسی شد. نمودار شماره 7 نشان می‌دهد با افزایش غلظت اولیه نانوکاتالیست‌ها، کارایی حذف افزایش یافت. کارایی تجزیه فوتوکاتالیستی از 73/4 به 92/1 درصد برای سولفاستامید، از 72/9 به 90/1 درصد برای سولفاتیازول، از 71/2 به 91/2 درصد برای سولفامتاکسازول، از 71/4 به 92/3 درصد برای سولفادیازین است. دوزاژ 1 گرم بر لیتر به عنوان دوز بهینه کاتالیست در نظر گرفته شد.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.17359260.1400.31.198.13.5]



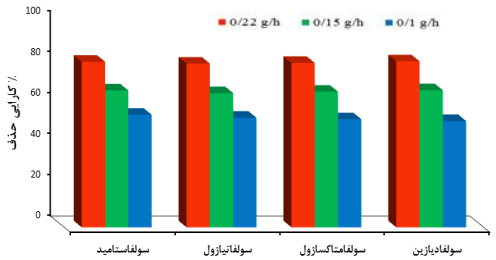
نمودار شماره 6: اثر pH بر تجزیه آنتی بیوتیک های سولفانامید



نمودار شماره 7: اثر غلظت کاتالیست بر تجزیه آنتی‌بیوتیک های سولفانامید

بررسی تاثیر غلظت گاز ازن برکارایی فرایند فتولیز ازناسیون

اثر غلظت گاز ازن ورودی بر روی تجزیه آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید با متغیر بودن غلظت گاز ازن (0/1، 0/15 و 0/22) گرم بر ساعت در شرایط بهینه بررسی شد. نمودار شماره 8 نشان می‌دهد تجزیه آنتی‌بیوتیک‌ها از 54/9 به 80/7 درصد برای سولفاستامید، از 53/4 به 79/8 درصد برای سولفاتیازول، از 52/7 به 80/1 درصد برای سولفامتاکسازول، از 51/8 به 80/9 درصد برای سولفادیازین با افزایش غلظت ازن در مدت زمان 15 دقیقه افزایش یافت. بنابراین غلظت بهینه ازن 0/22 گرم بر ساعت در نظر گرفته شد.



نمودار شماره 8 : اثر غلظت گاز ازن ورودی بر تجزیه آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید

بررسی تاثیر غلظت آنتی بیوتیک ها بر کارایی فرایند فتولیز ازناسیون و فتوکاتالیستی

اثر غلظت اولیه آنتی‌بیوتیک‌ها (۴۰،۲۰،۱۰ میلی‌گرم بر لیتر) بر روی تجزیه آن‌ها تحت شرایط بهینه بررسی شد. نمودار شماره 9 نشان می‌دهد تجزیه فوتوکاتالیستی آنتی‌بیوتیک‌ها از 92/1 به 63/1 درصد برای سولفاستامید، از 90/1 به 62/4 درصد برای سولفاتیازول، از 91/2 به 61/8 درصد برای سولفامتاکسازول، از 92/3 به 62/7 درصد برای سولفادیازین و برای فتولیز ازناسیون کارایی حذف آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید از 80/7 به 57/6 درصد برای سولفاستامید، از 79/8 به 57/1 درصد برای سولفاتیازول، از 80/1 به 58/2 درصد برای سولفامتاکسازول، از 81/2 به 57/3 درصد برای سولفادیازین با افزایش غلظت اولیه آنتی‌بیوتیک‌ها از 10 به 40 میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافت. حداکثر راندمان در غلظت 10میلی‌گرم برلیتر حاصل شد.

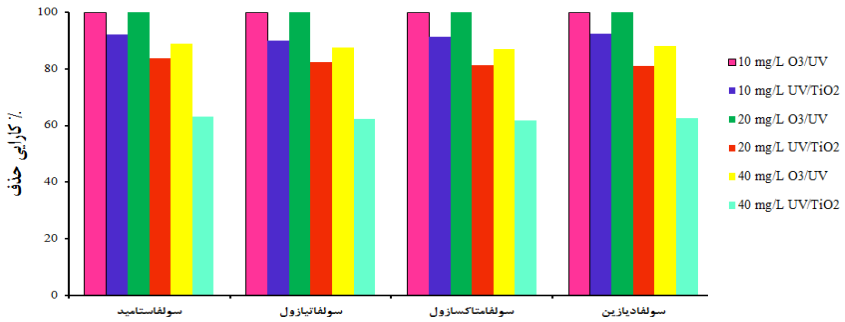
مطالعات سینتیکی و مصرف انرژی در فرایندهای تجزیه فوتوکاتالیستی و فتولیز ازناسیون

نتایج حاصل از بررسی مدل‌های سینتیک درجه صفر، اول و دوم در زمان واکنش‌های مختلف قابل تعیین است. برای به‌دست آوردن پارامترهای سینتیک تجزیه آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید معادلات و پارامترهای مذکور در جدول شماره 2 آورده شده است. پارامترهای سینتیک واکنش‌های درجه صفر، اول و دوم برای تجزیه آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید در جدول شماره 3 و 4 به ترتیب نشان داده شده است. تجزیه آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید از مدل سینتیک درجه اول تبعیت می‌کند.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-21]
[DOR: 20.1001.1.17359260.1400.31.198.13.5]

مقایسه سرعت واکنش حذف سولفانامیدها در فرایندهای فوتوکاتالیستی و فتولیز ازناسیون

مقادیر نرخ واکنش معادله سینتیک درجه اول تحت شرایط بهینه در نمودار شماره 10 نشان داده شده است. نرخ واکنش فتولیز ازناسیون 2/5 برابر برای سولفاستامید، 2/49 برابر برای سولفاتیازول، 2/68 برابر برای سولفامتاکسازول و 2/8 برابر برای سولفادیازین بیشتر از نرخ واکنش فرایند فتوکاتالیستی در شرایط بهینه است.



نمودار شماره 9: اثر غلظت اولیه آنتی بیوتیک بر تجزیه آنتی بیوتیک های سولفانامید

جدول شماره 2: مدل ها، پارامترها ، معادلات سینتیک و مصرف انرژی

مدل های کنتیک		میزان انرژی مصرفی	پارامترها
Zero-order	$C_0 - C_t = k_0 t$	$E_{Eo} = \frac{38.4 \times P}{V \times k_{obs}}$	C_0 (mg/L), C_t (mg/L), k_0(mol L^{-1} min^{-1}), k_{obs} (1/min), k_2(L mol^{-1} min^{-1}), $(C)_0$ (mg/L), k_c(mg L^{-1} min^{-1}), K_C (L mg^{-1}), P (kW),V (L), E_{Eo} (kWh /m^3)
First-order	$\ln \frac{C_0}{C_t} = k_{obs} t$	$E_{Eo} = \frac{P \times t \times 1000}{V \times 60 \times \log (C_0/C_t)}$	
Second-order	$\frac{1}{C_t} - \frac{1}{C_0} = k_2 t$		
Langmuir–Hinshelwood	$\frac{1}{k_{obs}} = \frac{1}{k_c K_C} + \frac{[C]_0}{k_c}$	$-\frac{d[C]}{dt} = \frac{k_c K_C [C]}{1+K_C[C]_0} = k_{obs}[C]$	

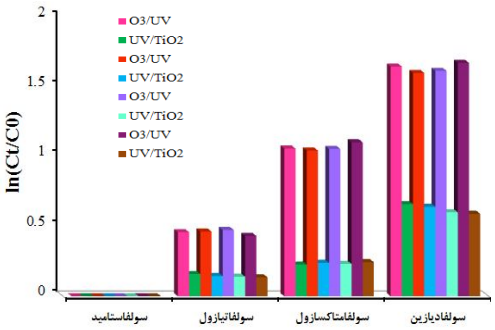
جدول شماره 3: پارامترهای سینتیکی در تجزیه فوتوکاتالیستی آنتی بیوتیک ها

	سولفاستامید							
	درجه صفر		درجه اول			درجه دوم		
$(C)_0$ (mg L^{-1})	k_0 (mol L^{-1} min^{-1})	R^2	k_{obs} (1/min)	$1/k_{obs}$ (min)	R^2	E_{Eo} (kWh/ m^3)	k_2 (L mol^{-1} min^{-1})	R^2
10	0/0741	0/2372	0/0415	24	0/988	115/6	0/0180	0/8681
20	0/1239	0/149	0/0294	34	0/69/95	163/2	0/0043	0/8868
40	0/0846	0/0185	0/0153	65/3	0/9262	313/7	0/0008	0/8294
	سولفاتیازول							
	درجه صفر		درجه اول			درجه دوم		
$(C)_0$ (mg L^{-1})	k_0 (mol L^{-1} min^{-1})	R^2	k_{obs} (1/min)	$1/k_{obs}$ (min)	R^2	E_{Eo} (kWh/ m^3)	k_2 (L mol^{-1} min^{-1})	R^2
10	0/0711	0/2227	0/0384	26	0/9927	125	0/014	0/9142
20	0/1222	0/1464	0/028	34/7	0/9646	166/6	0/004	0/9154
40	0/0795	0/0165	0/015	66/6	0/9306	320	0/0008	0/8253
	سولفامتاکسازول							
	درجه صفر		درجه اول			درجه دوم		
$(C)_0$ (mg L^{-1})	k_0 (mol L^{-1} min^{-1})	R^2	k_{obs} (1/min)	$1/k_{obs}$ (min)	R^2	E_{Eo} (kWh/ m^3)	k_2 (L mol^{-1} min^{-1})	R^2
10	0/0722	0/2255	0/0394	25/3	0/9854	121/8	0/0161	0/863
20	0/1192	0/1414	0/02	35/7	0/972	171/4	0/0038	0/9244
40	0/0723	0/0137	0/0146	68/4	0/9262	328/7	0/0008	0/8159
	سولفادیازین							
	درجه صفر		درجه اول			درجه دوم		
$(C)_0$ (mg L^{-1})	k_0 (mol L^{-1} min^{-1})	R^2	k_{obs} (1/min)	$1/k_{obs}$ (min)	R^2	E_{Eo} (kWh/ m^3)	k_2 (L mol^{-1} min^{-1})	R^2
10	0/072	0/2252	0/0404	24/7	0/9698	118/8	0/017	0/8046
20	0/11	0/387	0/027	36/2	0/9719	173/9	0/0037	0/9248
40	0/072	0/0138	0/0148	67/5	0/9108	324/3	0/0008	0/8104

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-21]
[DOR: 20.1001.1.17359260.1400.31.198.13.5]

جدول شماره 4: پارامترهای سینتیکی در تجزیه فوتولیز ازناسیون آنتی بیوتیک ها

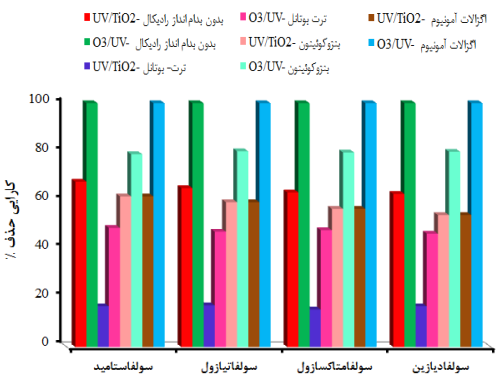
سولفاستامید								
	درجه صفر		درجه اول			درجه دوم		
$(C)_0$ (mg L^{-1})	k_0 (mol L^{-1} min^{-1})	R^2	k_{obs} (1/min)	$1/k_{obs}$ (min)	R^2	E_{E_0} (kWh/ m^3)	k_2 (L mol^{-1} min^{-1})	R^2
10	0/058	0/0202	0/1107	9/03	0/9966	43/3	0/0337	0/9854
20	0/299	0/088	0/075	13/3	0/9715	63/9	0/0037	0/9724
40	0/896	0/1711	0/055	17/9	0/9662	86/1	0/0037	0/9459
سولفاتیازول								
	درجه صفر		درجه اول			درجه دوم		
$(C)_0$ (mg L^{-1})	k_0 (mol L^{-1} min^{-1})	R^2	k_{obs} (1/min)	$1/k_{obs}$ (min)	R^2	E_{E_0} (kWh/ m^3)	k_2 (L mol^{-1} min^{-1})	R^2
10	0/0568	0/0257	0/107	9/29	0/9979	44/6	0/0322	0/9894
20	0/378	0/171	0/065	15/1	0/9861	172/9	0/0871	0/9463
40	0/906	0/01694	0/05	18/1	0/9601	87/2	0/0036	0/9464
سولفامتاکسازول								
	درجه صفر		درجه اول			درجه دوم		
$(C)_0$ (mg L^{-1})	k_0 (mol L^{-1} min^{-1})	R^2	k_{obs} (1/min)	$1/k_{obs}$ (min)	R^2	E_{E_0} (kWh/ m^3)	k_2 (L mol^{-1} min^{-1})	R^2
10	0/064	0/0253	0/108	9/21	0/9982	44/2	0/032	0/9889
20	0/35	0/1523	0/06	14/5	0/9884	70	0/009	0/9553
40	0/89	0/1669	0/05	17/8	0/9466	58/8	0/003	0/9433
سولفادیازین								
	درجه صفر		درجه اول			درجه دوم		
$(C)_0$ (mg L^{-1})	k_0 (mol L^{-1} min^{-1})	R^2	k_{obs} (1/min)	$1/k_{obs}$ (min)	R^2	E_{E_0} (kWh/ m^3)	k_2 (L mol^{-1} min^{-1})	R^2
10	0/04	0/0135	0/11	8/7	0/36/99	42/2	0/03	0/9878
20	0/36	0/1513	0/06	14/7	0/9859	70/7	0/009	0/9574
40	0/922	0/1821	0/05	18/3	0/9579	79/9	/003	0/9379



نمودار شماره 10: مقایسه سرعت واکنش تجزیه آنتی بیوتیک سولفانامید

مکانیسم فرایندهای فتولیز ازناسیون و فوتوکاتالیستی با اثر بدام انداز رادیکال

برای تعیین نمودن کارایی گونه‌های واکنش‌پذیر در تجزیه آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید، آزمایش اسکونجرهای مختلف مانند اگزالات آمونیوم، بنزوکوئینون و ترت-بوتانل تحت شرایط بهینه انجام شد. نمودار شماره 11 نشان می‌دهد زمانی که اسکونجرها برای بدام انداختن گونه های واکنش پذیر مورد استفاده قرار نگرفته است کارایی حذف حداکثر بوده است. با اضافه نمودن اسکونجرها میزان حذف آنتی‌بیوتیک‌ها کاهش یافت. نتایج نشان می‌دهد رادیکال هیدروکسیل گونه واکنش‌پذیر اصلی در هر دو فرایند است.



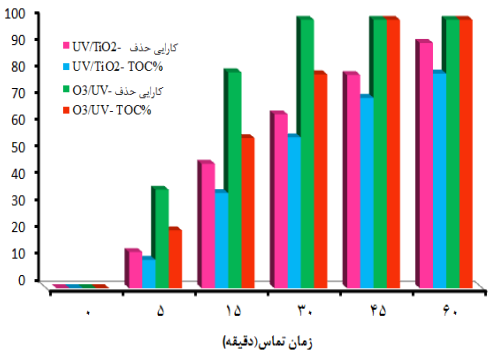
نمودار شماره 11: اثر بدام اندازهای رادیکال مختلف بر تجزیه آنتی‌بیوتیک سولفانامید

تعیین محصولات واسطه تولیدی حاصل از تجزیه آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید و میزان معدنی‌سازی

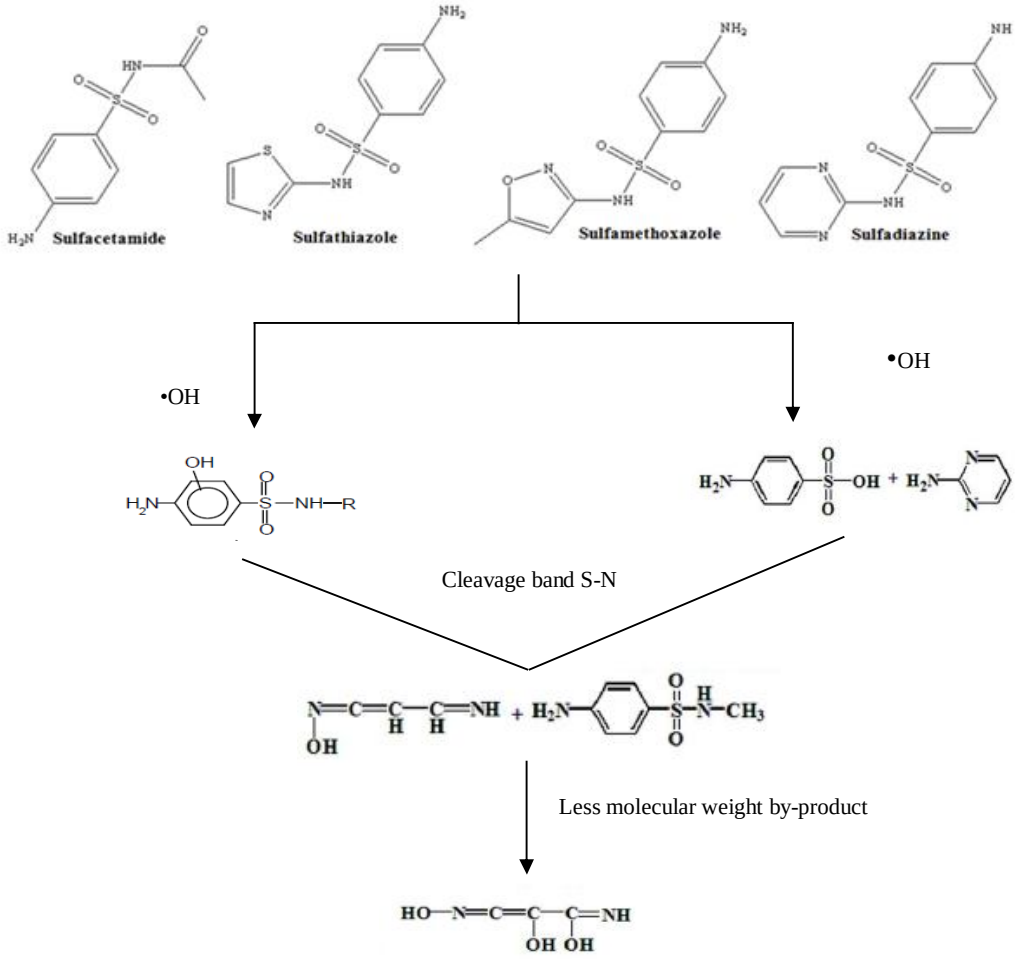
در این مطالعه محصولات واسطه تولیدی از تجزیه آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید توسط فرایندهای فوتوکاتالیستی و فوتولیز ازناسیون توسط GC-MS تحت

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-21]
[DOR: 20.1001.1.17359260.1400.31.198.13.5]

شرایط بهینه بررسی شد. مسیر تجزیه احتمالی آنتی‌بیوتیک‌ها در طی فرایندهای مذکور در نمودار شماره 12 به‌صورت زیر است: تغییر شکل سولفانامیدها با حمله رادیکال هیدروکسیل به حلقه آروماتیک و تشکیل هیدروکسی سولفانامید در اثر هیدروکسیلاسیون حلقه آروماتیک سبب شکاف باند S-N می‌شود. باز شدن حلقه پیریمیدین در اثر فتولیز ازناسیون سولفادیازین سبب تولید محصولات واسطه‌ای مانند 4 آمینو - N- متیل بنزوسولفانامید و 3 آمینو - پروپن اگزیم شد. در سولفاتیازول با حمله رادیکال هیدروکسیل به حلقه هتروواتم گروه متوکسی مولکول RNH2 تخریب و تولید محصول واسطه با وزن مولکولی پایین‌تر می‌شود. نتایج آنالیز TOC در تصویر شماره 3 نشان داد کارایی معدنی‌سازی آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید برابر با 80 و 79/68 درصد است.



نمودار شماره 12: میزان معدنی سازی آنتی بیوتیک های سولفانامید



تصویر شماره 3: تعیین محصولات واسطه حاصل از تجزیه آنتی بیوتیک های سولفانامید

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.17359260.1400.31.198.13.5]

بحث

اثر pH

بالاترین میزان حذف آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید توسط فرآیندهای فوتوکاتالیستی و فتولیز ازناسیون در pH=5 است. با توجه به این‌که نقطه زتا پتانسیل کاتالیست دی‌اکسید تیتانیوم برابر با 4 به دست آمد. بنابراین زمانی که pH محلول بیش‌تر از نقطه زتا پتانسیل کاتالیست باشد سطح TiO_2 دارای بار منفی و قادر به جذب آلاینده با بار مثبت است(16).

در این مطالعه pH محلول بیش‌تر از pka_1 (گروه آمین) است در نتیجه گروه آمین پروتون خود را از دست داده به شکل غیر پروتونه و بار منفی می‌گیرد و میزان جذب سولفانامیدها بر روی کاتالیست کاهش می‌یابد(17). نتایج مطالعه با نتایج Beltran و همکارانش در سال 2009 مطابقت دارد(18).

اثر دوزاژ کاتالیست Tio_2

بالاترین راندمان فوتوکاتالیستی آنتی بیوتیک های سولفانامید در دوزاژ 1 گرم بر لیتر بوده است. بالا بودن غلظت نانوکاتالیست دی‌اکسید تیتانیوم بیش از حد بهینه باعث اثر سایه‌گذاری و مانع جذب نور UV و انتشار آن به درون محلول می‌شود(19). همچنین در غلظت بالای نانوکاتالیست اشباع شدن لایه‌های داخلی TiO_2 از آلاینده و بازترکیبی جفت الکترون/$hole^+$ افزایش پیدا می‌کند و کاهش کارایی کوانتوم‌سازی نور می‌شود(20). نتایج مطالعه با نتایج Behera و همکارانش مطابقت دارد(21).

اثر غلظت گاز ازن

با افزایش غلظت گاز ازن ورودی، غلظت ازن محلول در آب و کارایی حذف فوتولیز ازناسیون آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید افزایش می‌یابد(22). بنابراین فتولیز ازن در آب باعث تولید H_2O_2 به عنوان محصول واسطه تولیدی از انجام واکنش و سبب افزایش تشکیل گونه‌های واکنش‌پذیرتر مانند OH• خواهد شد(23). نتایج این مطالعه با نتایج Muller و همکارانش مطابقت دارد(24).

اثر غلظت آنتی بیوتیک های سولفانامید

با افزایش غلظت آنتی‌بیوتیک‌ها طبق قانون بیر لامبرت جذب نور UV در مسیر کوتاهتری انجام می‌شود و میزان دسترسی آلاینده‌ها به گونه‌های اکسیداتیو تولیدی کم‌تر و تجزیه آلاینده کاهش می‌یابد(25). نتایج این مطالعه با نتایج Dantas و همکارانش مطابقت دارد(26).

سرعت واکنش فرایندهای فوتوکاتالیستی و فتولیز ازناسیون در حذف سولفانامیدها

سرعت واکنش فوتولیز ازناسیون نسبت به فرایند فوتوکاتالیستی 2/6 برابر بالاتر است. تشکیل پراکسیدهیدروژن در طی فرآیند فتولیز ازناسیون و تجزیه آن توسط نور UV سبب افزایش بالاتر اکسیداسیون در فتولیز ازناسیون نسبت به فرایند فوتوکاتالیستی می‌شود(27). کارایی حذف آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید در زمان تعادل 30 دقیقه توسط فرایند فوتوکاتالیستی و فتولیز ازناسیون به ترتیب برابر 67/8، 65/2، 63/4 و 62/8 و 100 درصد بوده است. بنابراین بالاترین راندمان حذف مربوط به فرایند فتولیز ازناسیون است(28). نتایج این تحقیق با نتایج Benotti و همکارانش در حذف ترکیبات دارویی مطابقت دارد(29).

اثر بدام انداز رادیکال

کارایی حذف آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید در حضور رادیکال خوارها نسبت به‌عدم حضور رادیکال خوارها کاهش می‌یابد. رادیکال هیدروکسیل با داشتن پتانسیل اکسیداسیون و احیاء 2/8 ولت دارای قدرت اکسیداسیون بالاتری نسبت به رادیکال سوپراکساید و حفره می‌باشد(30).

تعیین محصولات جانبی و حذف TOC در شرایط بهینه

با تولید گونه‌های اکسیداتیو، آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید به محصولات واسطه‌ای با وزن مولی پایین‌تر مانند اسید سولفانیلیک، اسید بوتیریک، اسید استیک و اسید والریک تجزیه شدند. همچنین راندمان حذف آنتی‌بیوتیک‌ها در شرایط بهینه برابر با 42/ 91 و 100 درصد بوده است. در صورتی که میزان کارایی

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-21]
[DOR: 20.1001.1.17359260.1400.31.198.13.5]

معدنی‌سازی آنتی‌بیوتیک‌ها برابر با 80 و 79/68 درصد حاصل شد. میزان TOC نشان می‌دهد هنوز این محصولات واسطه نیاز به تجزیه بیش‌تری دارند. در پایان می‌توان نتیجه گرفت فرایندهای فوتوکاتالیستی و فتولیز ازناسیون می‌تواند روش مناسبی جهت حذف آنتی‌بیوتیک‌های سولفانامید از محیط آبی باشد.

سپاسگزاری

این پژوهش در قالب طرح تحقیقاتی مصوب دانشگاه علوم پزشکی ایران با کد اخلاق IR.IUMS.REC 1395.9221150201 تحت حمایت مالی معاونت تحقیقات و فناوری آن دانشگاه به انجام رسیده است.

References

1. Rivera-Utrilla J, Polo MS, Ferro-Garcia MA, Joya GP, Perez RO. Pharmaceuticals as emerging contaminants and their removal from water. A review. Chemosphere 2013; 93(7): 1268-1287.
2. Gomes J, Costa R, Quinta-Ferreira RM, Martins RC. Application of ozonation for pharmaceuticals and personal care products removal from water. Sci Total Environ 2017; 586: 265-283.
3. Rey A, Carbajo J, AdánC, Faraldos M, Bahamond A, Casas JA, et al. Improved mineralization by combined advanced oxidation processes. Chem Eng J 2011; 174(1): 134-142.
4. Serpone N, Artemev YM, Ryabchuk VK, Emeline AV, Horikoshid S. Light-driven advanced oxidation processes in the disposal of emerging pharmaceutical contaminants in aqueous media: A brief review. Curr Opin Green Sustain Chem 2017; 6: 18-33.
5. Ternes TA, Stüber J, Herrmann N, McDowell D, Ried A, Kampmann M, et al. Ozonation: a tool for removal of pharmaceuticals, contrast media and musk fragrances from wastewater? Water Research 2003; 37(8): 1976-1982.
6. Asadi Z, Ahmadi S, Investigation of the Efficiency of Coagulation Process for Ciprofloxacin Antibiotic Removal from Aqueous Solution. J Health Res Commun 2019; 5(1): 38-48.
7. Kalhor EM, Al-Musawit T, Ghahraman E, Kazemian H, Zarrabi M. Enhancement of the adsorption capacity of the light-weight expanded clay aggregate surface for the metronidazole antibiotic by coating with MgO nanoparticles: Studies on the kinetic, isotherm, and effects of environmental parameters. Chemosphere 2017; 175: 8-20.
8. Javan F, Zazouli MA, Babanezhad E, Gholami-Borujeni F. Removal efficiency of Enzyme Horseradish Peroxidase in Removal of Tetracycline and Ciprofloxacin from Synthetic Wastewater. J Mazandaran Univ Med Sci 2020; 30(189): 95-106 (Persian).
9. Esrafili A, Khosravi S, Gholami M, Farzadkia M, Abdorahimi G. Photocatalytic Removal of Metronidazole Using Magnetic TiO2 Nanocatalyst(Fe3O4@SiO2@TiO2): Synthesis, Characterization, and Operational Parameters. J Mazandaran Univ Med Sci 2018; 28(159): 97-115 (Persian).
10. Azadbakht F, Esrafili A, Yeganeh Badi M, Sajedifar J, Amiri M, Gholami M. Efficiency of Persulfate-based Advanced Oxidation Process ($UV/Na_2S_2O_8$) in Removal of Metronidazole from Aqueous Solutions. J Mazandaran Univ Med Sci 2017; 27(154): 119-129 (Persian).

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.17359260.1400.31.198.13.5]

11. Abellán MN, Gebhardt W, Schröder HF. Detection and identification of degradation products of sulfamethoxazole by means of LC/MS and −MSn after ozone treatment. Water Sci Technol 2008; 58(9): 1803-1812.
12. Lucas MS, Tavares PB, Peres JA, Faria LJ, Rocha M, Pereira C, et al. Photocatalytic degradation of Reactive Black 5 with TiO2-coated magnetic nanoparticles. Catal Today 2013; 209: 116-121.
13. Ismail L, Rifai A, Ferronato C, Fine L, Jaber F, Chovelona JM. Towards a better understanding of the reactive species involved in the photocatalytic degradation of sulfaclozine. Appl Catal B 2016; 185: 88-99.
14. Godini K, Tahergorabi M, Naimi-Joubani M, Shirzad-Siboni M, Yang JK. Application of ZnO nanorods doped with Cu for enhanced sonocatalytic removal of Cr (VI) from aqueous solutions. Environ Sci Pollut Res Int 2020; 27(3): 2691-2706.
15. Challis JK, Carlson JC, Friesen KJ, Hanson ML, Wong CS. Aquatic photochemistry of the sulfonamide antibiotic sulfapyridine. J Photochem Photobiol A 2013; 262: 14-21.
16. Dehghan S, Tahergorabi M, Norzaee S, Boorboor Azimi E, Hasham Firooz M, Dadban Shahamat Y. Preparation and photocatalytic performance of reduced graphene oxide/ZnO nanocatalyst for degradation of metalaxyl from aqueous solution: effect of operational parameters, mineralisation and toxicity bioassay. Int J Environ An Ch 2020: 1-23.
17. Remko M. Molecular structure, pKa, lipophilicity, solubility and absorption of biologically active aromatic and heterocyclic sulfonamides. J Mol Struc 2010; 944(1-3): 34-42.
18. Beltrán FJ, Aguinaco A, García-Araya JF. Mechanism and kinetics of sulfamethoxazole photocatalytic ozonation in water. Water Res 2009; 43(5): 1359-1369.
19. Wang F, Chen P, Feng Y, Xie Z, Liu Y, Su Y, et al. Facile synthesis of N-doped carbon dots/g-C_3N_4 photocatalyst with enhanced visible-light photocatalytic activity for the degradation of indomethacin. Appl Catal B 2017; 207: 103-113.
20. Liu W, Li Y, Liu F, Jiang W, Zhang D, Liang J. Visible-light-driven photocatalytic degradation of diclofenac by carbon quantum dots modified porous g-C_3N_4: Mechanisms, degradation pathway and DFT calculation. Water Res 2019; 150: 431-441.
21. Behera SK, Kim HW, Oh JE, Park HS. Occurrence and removal of antibiotics, hormones and several other pharmaceuticals in wastewater treatment plants of the largest industrial city of Korea. Sci Total Environ 2011; 409(20): 4351-4360.
22. Wang F, Wang Y, Feng Y, Zeng Y, Xie Z, Su Y, et al. Novel ternary photocatalyst of single atom-dispersed silver and carbon quantum dots co-loaded with ultrathin g-C_3N_4 for broad spectrum photocatalytic degradation of naproxen. Appl Catal B 2018; 221: 510-520.
23. Amraei B, Rezaei Kalantary R, Jonidi Jafari A, Gholami M. Efficiency of $CuFe_2O_4$ Bimetallic in Removing Amoxicillin from Aqueous Solutions. J Mazandaran Univ Med Sci 2017; 27(147): 259-275.
24. Balmer ME, Buser HR, Müller MD, Poiger Th. Occurrence of Some Organic UV Filters in Wastewater, in Surface Waters, and in Fish from Swiss Lakes. Environ Sci Technol 2005; 39(4): 953-962.
25. Zhu Z, Fan W, Liu Z, Dog H, Huo P, Yan Y, et al. Fabrication of the metal-free biochar-based graphitic carbon nitride for improved

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-21]
[DOR: 20.1001.1.17359260.1400.31.198.13.5]

2-Mercaptobenzothiazole degradation activity. J Photoch Photobio A 2018; 358: 284-293.

26. De Luca A, Danats RF, Simoes ASM, Toscano IAS, Lofrano A. Atrazine Removal in Municipal Secondary Effluents by Fenton and Photo-Fenton Treatments. Chem Eng Technol 2013; 36(12): 2155-2162.
27. Katal R, Abadi Farahani MHD, Jiangyong H. Degradation of acetaminophen in a photocatalytic (batch and continuous system) and photoelectrocatalytic process by application of faceted-TiO_2. Sep Purif Technol 2020; 230: 115859.
28. Ling Y, Liao G, Xu P, Li L. Fast mineralization of acetaminophen by highly dispersed Ag-g-C_3N_4 hybrid assisted photocatalytic ozonation. Sep Purif Technol 2019; 216: 1-8.
29. Benotti MJ, Trenholm RA, Vanderford BJ, Holady JC, Stanford BD, Snyder SA. Pharmaceuticals and Endocrine Disrupting Compounds in U.S. Drinking Water. Environ Sci Technol 2009; 43(3): 597-603.
30. Sano T, Koike K, Hori T, Hirakawa T, Ohko K, Takeuchi K. Removal of methyl mercaptan with highly-mobile silver on graphitic carbon-nitride (g-C_3N_4) photocatalyst. Appl Catal B 2016; 198: 133-141.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.17359260.1400.31.198.13.5]