

“Research article”

DOI: 10.82460/jepsud.2025.1222913

Photocatalytic removal of phenazopyridine in a rotating disk photoreactor: Investigation of operational parameters

Maryam Kamali-Alamdari*

Department of Chemistry, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran

*Corresponding author: maryamka68157@gmail.com

(Received: 1 November 2025, Accepted: 11 November 2025)

Abstract

In this study, the efficiency of a rotating disk photoreactor for the removal of phenazopyridine (PhP), a drug-resistant contaminant, using the UV/TiO₂ process was investigated. The effects of operational parameters – including the initial concentration of PhP, solution pH, solution volume, rotating disk speed, flow rate, and irradiation time – on PhP removal efficiency were examined. The results indicate that increasing the rotating disk speed up to 450 rpm enhances the removal efficiency, while further increasing it to 750 rpm produces no significant improvement. Higher flow rates and longer irradiation times also improve PhP removal efficiency, whereas higher initial concentrations of PhP reduce it. Moreover, the removal efficiency was higher at near-neutral pH (approximately 5.9) compared to acidic or alkaline conditions.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Heterogeneous photocatalysis, Rotating disk photoreactor, Phenazopyridine, Operational parameters, UV/TiO₂ process



دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز
فصلنامه آلودگی های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره ۲، شماره ۲، پیاپی ۶
تابستان ۱۴۰۴، صفحات ۹۴-۸۵

«مقاله پژوهشی»

DOI: 10.82460/jepsud.2025.1222913

حذف فوتوکاتالیزوری فنازوپیریدین در فوتوراکتور دیسک چرخان: بررسی پارامترهای عملیاتی

مریم کمالی علمداری*

دانش آموخته کارشناسی ارشد شیمی کاربردی، گروه شیمی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: maryamka68157@gmail.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰)

چکیده

در این کار تحقیقی، کارایی فوتوراکتور دیسک چرخان در حذف فوتوکاتالیزوری فنازوپیریدین (PhP) به عنوان آلاینده دارویی مقاوم با استفاده از فرآیند UV/TiO₂ مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر پارامترهای عملیاتی نظیر غلظت اولیه PhP، pH اولیه محلول، حجم محلول، سرعت چرخش دیسک چرخان، دبی جریان و زمان تابش نور در راندمان حذف PhP مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که افزایش سرعت چرخش دیسک چرخان تا ۴۵۰ rpm سبب افزایش درصد حذف PhP می‌شود و افزایش آن به ۷۵۰ rpm تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش درصد حذف PhP ندارد. افزایش دبی جریان و زمان تابش نور سبب افزایش راندمان حذف PhP می‌شود در صورتی که افزایش غلظت اولیه PhP سبب کاهش راندمان حذف PhP می‌شود. همچنین راندمان حذف PhP در pH های نزدیک به خنثی (۵/۹) از pH های اسیدی و قلیایی بهتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: فوتوکاتالیز ناهمگن، فوتوراکتور دیسک چرخان، فنازوپیریدین، پارامترهای عملیاتی، فرایند UV/TiO₂

مقدمه

به تازگی جهان با چالش‌های عمده‌ای روبه‌رو شده است. به عنوان نمونه، آب شرب به دلیل بلایای طبیعی، افزایش جمعیت و آلودگی آب کم‌تر در دسترس است. استفاده مجدد از فاضلاب روستایی موجود در منطقه یا فاضلاب شهری تحت تصفیه، برای کشاورزی و فعالیت‌های صنعتی می‌تواند بهترین راه حل برای آینده مدیریت پایدار آب در کشورهای کم‌آب باشد. با توجه به اینکه این فاضلاب‌ها یکی از بزرگ‌ترین منابع آب ممکن را تشکیل می‌دهند، استفاده مجدد از آن‌ها، برای جبران منابع آب تمیزتر، یک راهکار مناسب است (۱) و (۲). تصفیه و بازیافت فاضلاب‌ها که معمولاً شامل جامدات معلق، و آلودگی‌های آلی پایدار^۱ (POPs) مانند داروها است، فرایندی پرهزینه است. به طور خاص، POPs غالباً در فاضلاب‌ها، آب‌های سطحی و زیرزمینی و حتی آب شرب شناسایی شده‌اند و مشاهده شده است که تأثیر بالقوه قابل توجهی بر سلامت انسان و محیط زیست دارند. بنابراین توسعه فناوری‌های پیشرفته تصفیه آب، با هزینه کم و راندمان بالا برای تصفیه آب‌های آلوده به POPs مدنظر محققان است (۳).

در حال حاضر، از جمله فناوری‌های تصفیه آب در دسترس این است که، با جذب سطحی یا انعقاد، صرفاً آلودگی‌ها را به فاز دیگر منتقل و حذف می‌کنند، اما این روش‌ها آلاینده را به طور کامل حذف یا نابود نمی‌کنند (۴-۷). سایر روش‌های رایج تصفیه مانند ته‌نشینی، فیلتراسیون، اکسیداسیون شیمیایی و فرایندهای بیولوژیکی نیز با معایبی چون حذف ناقص،

مصرف زیاد مواد شیمیایی، هزینه بالای تصفیه و زمان‌بر بودن مواجه‌اند (۸). بنابراین، فناوری‌های جایگزین مؤثر تصفیه آب، برای بهبود کیفیت پساب تصفیه‌شده ضروری‌اند. در میان روش‌های مختلف ارائه شده برای از بین بردن و تجزیه POPs، فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته^۲ (AOPs)، بسیار مؤثر می‌باشند (۹ و ۱۰). فوتوکاتالیز ناهمگن^۳ یکی از شاخه‌های AOPs است که طی آن، آلاینده‌ها در مقابل تابش نور UV و در حضور فوتوکاتالیزورهایی مانند TiO_2 و سایر فوتوکاتالیست‌ها تخریب می‌شوند (۱۱ و ۱۲). فوتوکاتالیست TiO_2 در میان اکسیدهای فلزی به دلیل بهره‌وری بالا، هزینه کم، پایداری فیزیکی-شیمیایی، دسترسی گسترده، بسیار مورد توجه قرار گرفته و کارایی قابل قبولی را برای حذف انواع آلاینده‌های آلی و معدنی از خود نشان داده است (۱۳). در طول چند سال اخیر ورود داروها به محیط زیست به عنوان یک مشکل زیست‌محیطی جدی، مطرح بوده است. اگرچه مقدار این ترکیبات دارویی در محیط‌های آبی کم است، ورود مستمر آن‌ها به صورت بلندمدت می‌تواند خطر بالقوه‌ای برای موجودات آبی و زمینی به همراه داشته باشد. تحقیقات زیادی نشان داده‌اند که حذف ترکیبات دارویی به طور کامل صورت نمی‌گیرد. واحدهای صنعتی تصفیه فاضلاب به عنوان منابع عمده حضور ترکیبات دارویی در محیط زیست شناخته می‌شوند (۱۴).

فنازوپیریدین^۴ (PhP) یک داروی مسکن و ضد درد است. این دارو برای درمان علائمی نظیر درد و سوزش هنگام ادرار، و زخم و تحریک مخاط مجاری ادراری

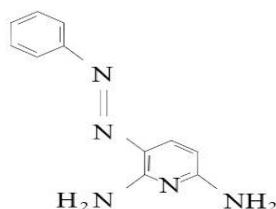
³ Heterogeneous photocatalysis⁴ Phenazopyridine¹ Persistent Organic Pollutants² Advanced Oxidation Processes

پارامترهای مؤثر در حذف PhP (غلظت اولیه PhP، pH محلول، حجم محلول، سرعت چرخش دیسک چرخان، دبی جریان و زمان تابش نور) در این فوتوراکتور می باشد.

بخش تجربی

- مواد مورد استفاده

PhP یک ترکیب آروماتیک هتروسیکلیک است و ساختار آن در شکل (۱) و مشخصات آن در جدول (۱) ارائه شده است. این ترکیب از شرکت داروسازی شهردارو تهیه شده است. پودر تیتانیوم دی اکسید P25 (TiO₂-P25) محصول شرکت دگوسا می باشد. HCl و NaOH از شرکت مرک (Merck) تهیه شده است.



شکل (۱): ساختار مولکولی PhP

جدول (۱): مشخصات PhP

Pyridium	نام تجاری
3-phenyldiazenylpyridine-2,6-diamine	نام علمی (IUPAC)
C ₁₁ H ₁₁ N ₅	فرمول مولکولی
213.244 g mol ⁻¹	وزن مولکولی
430 nm	λ_{max}

- روش تثبیت نانوذرات TiO₂-P25 بر روی صفحه پلی اتیلنی

در این تحقیق نانوذرات TiO₂-P25 بر روی صفحه پلی اتیلنی، به روش اتوکاری^۲ تثبیت شده اند. برای این منظور، ابتدا پودر نانوذرات TiO₂-P25 به طور

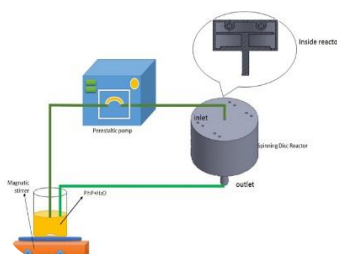
تحتانی مصرف می شود (۱۵). در مطالعاتی که در زمینه حذف PhP توسط فرایند فوتوکاتالیز ناهمگن صورت گرفته است، اغلب از نانوذرات نیمه رسانای اکسیدی به صورت دوغابی^۱ استفاده شده است (۱۶ و ۱۷). به عنوان نمونه اسکندرلو و همکارانش حذف PhP را توسط نانوذرات Ag/SiO₂-TiO₂ تهیه شده به روش تلقیح را در وضعیت دوغابی مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق از روش سطح پاسخ به عنوان یک تکنیک آماری برای مدل سازی و بهینه سازی متغیرهای سنتز استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین کارایی حذف (۹۷/۱۴٪) برای ذرات Ag/SiO₂-TiO₂ در شرایط بهینه تهیه حاصل می شود. شرایط بهینه عبارت است از محتوای SiO₂ برابر با ۳۴/۶۸ درصد وزنی، محتوای Ag برابر با ۲/۳۶ درصد وزنی، pH تلقیح برابر با ۵/۱، و دمای کلسیناسیون برابر با ۴۳۹ درجه سلسیوس (۱۸). تیرگی محلول و عدم رسیدن نور به تمام بخش های نمونه، عدم امکان جداسازی کامل کاتالیزور، اتلاف کاتالیزور، نیاز به یک مرحله جداسازی جامد-مایع و مشکلات ناشی از حالت دوغابی در راکتورهای پیوسته بویژه مشکل ته نشین کاتالیزور از عمده ترین مشکلات استفاده از نانوذرات اکسیدی در وضعیت دوغابی می باشد (۱۹).

در این پژوهش، یک فوتوراکتور با دیسک چرخان طراحی و ساخته شده و برای حذف فوتوکاتالیستی PhP به کار گرفته شده است. در این فوتوراکتور به سادگی امکان افزایش مقیاس وجود دارد؛ به گونه ای که با افزایش قطر دیسک چرخان یا افزودن چند دیسک به سیستم، قابلیت افزایش مقیاس به راحتی فراهم می شود. هدف از انجام این تحقیق، بهینه سازی

² Ironing method

¹ Slurry

شده، تشکیل شده است. نانوذرات $\text{TiO}_2\text{-P25}$ با استفاده از روش اتوکاری بر روی صفحه پلی‌اتیلنی مدور تثبیت شده و داخل فوتوراکتور بر روی دیسک چرخان نصب شده است. دو عدد لامپ UV-C، ۶ وات با طول موج نشری ۲۵۴ نانومتر، در سقف فوتوراکتور نصب شده است. به منظور تزریق محلول از یک پمپ پرستالتیک با دبی قابل تنظیم استفاده می‌شود. جریان محلول حاوی PhP از ورودی فوتوراکتور که در بالای آن تعبیه شده وارد و از مرکز صفحه چرخان وارد دیسک چرخان شده و از خروجی موجود در کف راکتور خارج می‌شود. محلول مورد نظر در فوتوراکتور تحت تابش قرار گرفته و در فواصل زمانی مشخص نمونه‌برداری صورت می‌گیرد. تصاویر واقعی فوتوراکتور و طرح شماتیک آن در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): تصاویر فوتوراکتور RDR

فوتوراکتور توسط صفحه‌دیسک چرخان که در روی آن یک صفحه پلی‌اتیلنی پوشش داده شده با نانوذرات $\text{TiO}_2\text{-P25}$ تعبیه شده، به چرخش درمی‌آید و از طریق لوله واقع در زیر فوتوراکتور به داخل بشر ریخته شده و این جریان ادامه می‌یابد. بعد از سیرکوله شدن سیستم، نمونه‌گیری صورت گرفته و سپس لامپ روشن می‌شود. در فواصل زمانی مشخص

یکنواخت در سطح صفحه پخش، سپس یک صفحه کاغذی روی آن قرار داده شده، اتوکاری (دمای اتوکاری بالای ۷۴ درجه سلسیوس) انجام می‌گیرد. سپس، سطح صفحه پلی‌اتیلنی به منظور جداسازی ذرات متصل‌نشده $\text{TiO}_2\text{-P25}$ با آب شسته و خشک می‌شود. مقادیر $\text{TiO}_2\text{-P25}$ در سطح صفحه پلی‌اتیلنی بوسیله تفاوت در جرم صفحه قبل و بعد از فرآیند تثبیت، ارزیابی می‌شود. به طور متوسط، مقدار نانوذرات $\text{TiO}_2\text{-P25}$ در سطح صفحه ۱/۲۸ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع به دست آمد. بستر پلی‌اتیلنی در نهایت در داخل راکتور دیسک چرخان نصب می‌شود.

- فوتوراکتور دیسک چرخان (RDR)

این فوتوراکتور از یک محفظه از جنس استیل ضد زنگ، با قطر داخلی ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۲ سانتی‌متر که در داخل آن یک صفحه چرخان تعبیه

- نحوه انجام آزمایش در فوتوراکتور RDR

در هر آزمایش حجم مشخصی از محلول PhP با غلظت‌های مشخص از محلول مادر تهیه شده و به یک بشر منتقل می‌گردد. یک نمونه ۵ میلی‌لیتری از محلول تهیه‌شده برداشته شده و به لوله آزمایش منتقل می‌گردد. محلول توسط پمپ پرستالتیک با دبی جریان مشخص به فوتوراکتور تزریق شده و در داخل

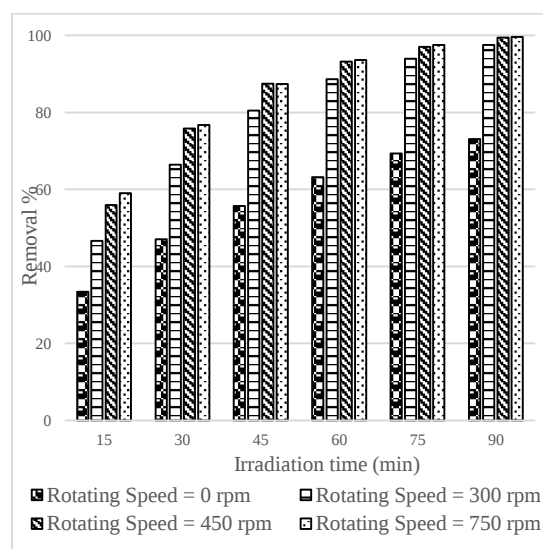
¹ Rotating Disc Reactor (RDR)

نمونه‌برداری انجام شده، سپس توسط اسپکتروفوتومتر جذب نمونه‌ها در طول موج ۴۳۰ نانومتر خوانده می‌شود. جذب قرائت شده توسط منحنی کالیبراسیون رسم شده به غلظت تبدیل شده و در نهایت میزان حذف PHP محاسبه می‌شود.

نتایج و بحث

- بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی در کارایی فوتوراکتور دیسک چرخان
- تأثیر سرعت چرخش دیسک چرخان

به منظور تعیین اثر سرعت چرخش دیسک چرخان در حذف PHP از محلول‌های آبی در فوتوراکتور دیسک چرخان، محلولی به غلظت 20 mg L^{-1} از PHP و حجم ۵۰۰ mL با pH طبیعی مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج تأثیر سرعت چرخش دیسک چرخان در حذف PHP در شکل (۳) نشان داده شده است.



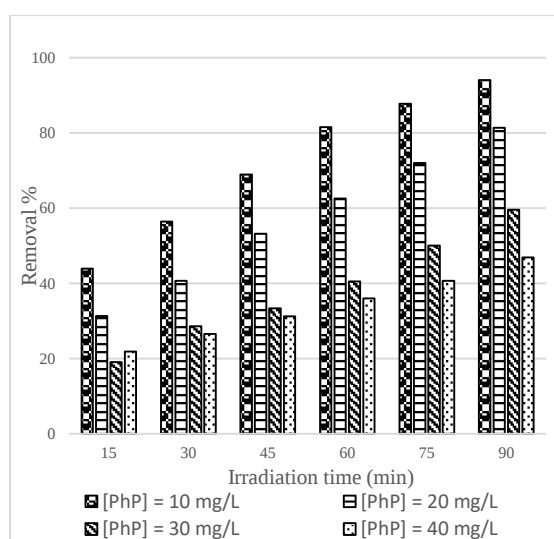
شکل (۳): درصد حذف PHP برحسب زمان تابش در سرعت چرخش‌های متفاوت دیسک چرخان

همان‌طوری که از شکل (۳) مشخص است با افزایش سرعت چرخش تا ۴۵۰ rpm راندمان حذف

افزایش قابل توجهی دارد، ولی در دور چرخش بالاتر راندمان، افزایش خیلی کم‌تری داشته و تقریباً ثابت است. این مسئله به زمان ماند محلول، در سطح دیسک چرخان مربوط می‌شود. به عبارت دیگر، در دورهای کم، زمان ماند محلول در سطح دیسک چرخان برای رسیدن به درصد تبدیل بالا تأمین می‌شود. در صورتی‌که در دورهای بالاتر، محلول فرصت زیادی برای انجام واکنش در سطح دیسک چرخان را ندارد (۲۰ و ۲۱).

- تأثیر غلظت اولیه PHP

از نظر کاربردی، بررسی رابطه میان درصد حذف و غلظت اولیه آلاینده حائز اهمیت است و یکی از پارامترهای عملیاتی اصلی محسوب می‌شود. بنابراین، تأثیر غلظت اولیه PHP در راندمان حذف آن در غلظت‌های 10 mg L^{-1} ، 20 mg L^{-1} ، 30 mg L^{-1} و 40 mg L^{-1} مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور، محلولی با غلظت‌های فوق از PHP و حجم ۵۰۰ mL با pH طبیعی تهیه شده است. نتایج آزمایشات حذف PHP در شکل (۴) نشان داده شده است.



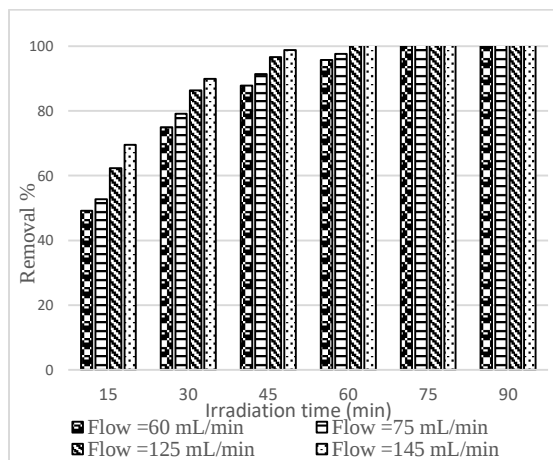
شکل (۴): درصد حذف PHP برحسب زمان تابش در

غلظت‌های اولیه مختلف از PHP

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش حجم محلول، درصد حذف کاهش می‌یابد. کاهش راندمان حذف با افزایش حجم محلول می‌تواند به حجم قابل چرخش بالای محلول در مدت زمان تابش معین نسبت داده شود. حجم بیشتر محلول به زمان بیشتری برای تصفیه نیاز دارد. به عبارت دیگر، برای تصفیه حجم‌های بیشتر از محلول، فوتوراکتورهایی با حجم‌های بالا مورد نیاز خواهد بود (۲۲ و ۲۳).

- تأثیر سرعت جریان حجمی

در این مرحله به منظور بررسی تأثیر سرعت جریان حجمی در راندمان حذف PhP محلولی با غلظت اولیه 10 mg L^{-1} از PhP و حجم 500 mL با pH طبیعی تهیه شد. نتایج تأثیر سرعت جریان حجمی در حذف PhP در شکل (۶) نشان داده شده است.



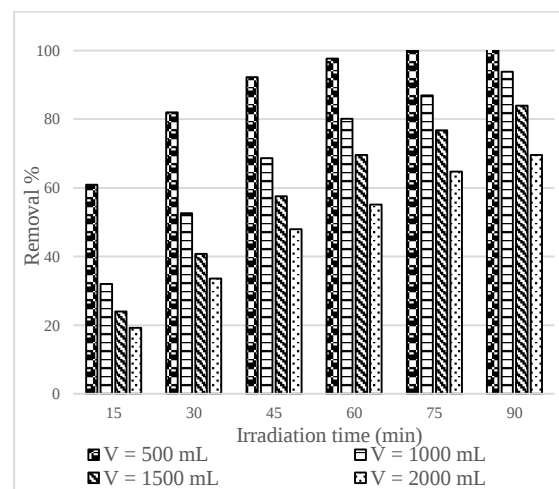
شکل (۶): درصد حذف PhP برحسب زمان تابش در سرعت جریان‌های مختلف

سرعت جریان مایع، بر زمان ماند محلول در فوتوراکتور و در نتیجه سرعت انتقال جرم، تأثیر می‌گذارد و بنابراین می‌تواند در راندمان حذف PhP در فوتوراکتور مؤثر باشد. زمانی که سرعت جریان، در سیستم افزایش می‌یابد، دو تأثیر متضاد در سیستم رخ

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش غلظت اولیه PhP، درصد حذف آن کاهش می‌یابد. با افزایش غلظت اولیه PhP، جذب PhP و محصولات حدواسط روی سایت‌های فعال در بستر کاتالیزور افزایش می‌یابد و ممکن است فوتوکاتالیزور اشباع شود. به دلیل اشباع شدن سطح فوتوکاتالیزور، جفت الکترون-حفره تولیدی و در نتیجه رادیکال‌های هیدروکسیل کاهش می‌یابند و درصد تخریب فوتوکاتالیستی هم کاهش می‌یابد. رنگ‌زدایی سریع محلول نشان می‌دهد که پیوند دوگانه نیتروژن-نیتروژن ($-N=N-$) PhP به عنوان فعال‌ترین سایت برای حمله گونه‌های اکسیدکننده، نظیر رادیکال هیدروکسیل می‌باشد (۲۲ و ۲۳).

- تأثیر حجم محلول

به منظور تعیین تأثیر حجم محلول در راندمان حذف PhP، محلول‌هایی با غلظت 10 mg L^{-1} از PhP و حجم‌های 500 mL ، 1000 mL ، 1500 mL و 2000 mL میلی‌لیتر تهیه شده است. نتایج تأثیر حجم محلول در حذف PhP در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵): درصد حذف PhP برحسب زمان تابش در حجم‌های مختلف

سطحی TiO_2 و حالت یونیزاسیون PhP تعیین می‌شود. pH بار نقطه صفر (pH_{zpc})، بار سطحی TiO_2 را در pH های اولیه مختلف نشان می‌دهد. در pH های کم‌تر از pH_{zpc} ، بار مثبت روی سطح جاذب افزایش می‌یابد، در حالی که در pH های بیش‌تر از pH_{zpc} ، بار منفی در سطح آن افزایش می‌یابد. برای $\text{TiO}_2\text{-P25}$ در حدود ۶/۲۵ است. تعامل بین مولکول‌های PhP غنی از الکترون و سایت‌های TiO_2 در pH های کم‌تر از ۶/۲۵ بهتر خواهد بود، در نتیجه تخریب اکسیداسیونی مولکول‌های PhP توسط حفره های با بار مثبت بهتر اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است که در شرایط اسیدی‌تر امکان جدا شدن کاتالیست تثبیت شده از سطح بستر افزایش می‌یابد که می‌تواند سبب کاهش فعالیت بستر فوتوکالیستی گردد (۲۲ و ۲۳).

نتیجه‌گیری

نتایج حذف PhP از محیط‌های آبی به عنوان یک ترکیب آلاینده محیط زیست با استفاده از یک فوتوراکتور RDR، به خوبی بیانگر کارایی بالای سیستم مذکور در حذف این آلاینده دارویی می‌باشد. نتایج تحقیق بیانگر موارد زیر می‌باشد:

- افزایش سرعت چرخش دیسک چرخان تا ۴۵۰ rpm باعث افزایش راندمان حذف PhP می‌شود ولی در دور چرخش‌های بالاتر راندمان تقریباً ثابت است.

- با افزایش غلظت اولیه PhP راندمان حذف کاهش می‌یابد.

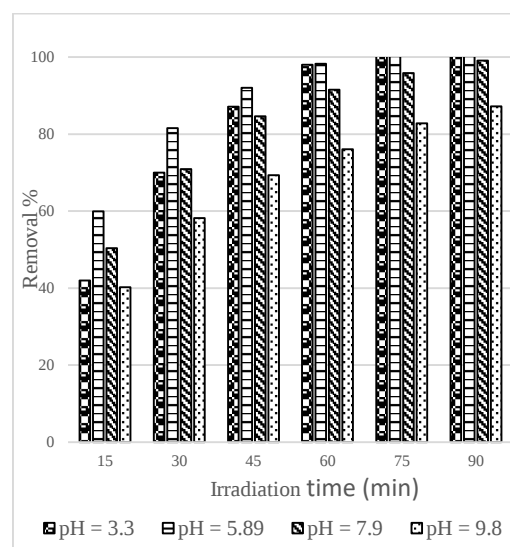
- افزایش حجم محلول باعث کاهش درصد حذف PhP می‌گردد.

- با افزایش سرعت جریان مایع تا یک مقدار مشخص، راندمان حذف PhP افزایش می‌یابد.

می‌دهد که شامل کاهش زمان ماند محلول در فوتوراکتور و افزایش سرعت انتقال جرم می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت جریان مایع، راندمان حذف PhP نیز افزایش می‌یابد. به دلیل افزایش حجم سیال عبوری از فوتوراکتور، راندمان حذف افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، افزایش سرعت جریان حجمی منجر به کاهش محدودیت انتقال جرم می‌شود و تنها سرعت واکنش، سرعت کلی واکنش را کنترل می‌کند (۲۲ و ۲۳).

- تأثیر pH محلول

به منظور بررسی تأثیر مقدار pH در راندمان حذف PhP، محلول‌هایی با غلظت 10 mg L^{-1} از PhP و حجم ۵۰۰ mL با pH های ۳/۳، ۵/۹، ۷/۹ و ۹/۸ تهیه گردید. نتایج تأثیر مقدار pH در حذف PhP در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل (۷): درصد حذف PhP برحسب زمان تابش در pH های مختلف

همان‌گونه که از شکل (۷) مشخص است، درصد حذف در pH برابر با ۵/۹ بیشتر از pH های اسیدی و قلیایی است. تعامل PhP با سطح TiO_2 به وسیله بار

theoretic investigations. Environmental Research, 247, 118113.

[8] Elias, C., Ranque, S., Malleret, L., 2025, State of the art on fungal biodegradation of persistent organic pollutants in soils and innovative strategies for isolating relevant candidate strains. Environmental Technology & Innovation, 39, 104247.

[9] Eskandarloo, H., 2024, A review of new methods of removing environmental pollutants: Photolysis and UV/H₂O₂ processes. Environmental Pollutions and Sustainable Urban Development, 1(1), 1. (in Persian)

[10] Zafari, S.H., 2024, Removal of p-nitrophenol from aqueous environments by UV/S₂O₈²⁻ process in a continuous photoreactor: Optimization by Taguchi method. Environmental Pollutions and Sustainable Urban Development, 1(1), 33. (in Persian)

[11] Airemlou, L., 2024, Synthesis of ZnO/SnO₂ nanocomposite loaded with silver via liquid impregnation method and investigation of its photocatalytic activity in removing an environmental pollutant under visible light irradiation. Environmental Pollutions and Sustainable Urban Development, 1(2), 85. (in Persian)

[12] Mohammadpour Koselar, Z., Ghazi Tabatabaei, Z., 2024, Design of multifunctional photocatalysts with g-C₃N₄ and its applications in sustainable technologies. Environmental Pollutions and Sustainable Urban Development, 1(3), 29. (in Persian)

[13] Swaminaathan, P., Saravanan, A., Yaashikaa, P.R., Vickram, A.S., 2024, Recent advances in photocatalytic degradation of persistent organic pollutants: Mechanisms, challenges, and modification strategies. Sustainable Chemistry for the Environment, 8, 100171.

[14] Cahill, J.D., Furlong, E.T., Burkhardt, M.R., Kolpin, D., Anderson, L.G., 2004, Determination of pharmaceutical compounds in surface- and ground-water samples by solid-phase extraction and high-performance liquid chromatography-electrospray ionization mass spectrometry. Journal of Chromatography A, 1041, 171.

[15] Fathinia, M., Khataee, A.R., 2013 Residence time distribution analysis and optimization of photocatalysis of

- درصد حذف PhP در pHهای نزدیک به خنثی

(۵/۹) بیش‌تر از pHهای اسیدی و قلیایی است.

تعارض منافع

نویسنده هیچ‌گونه تعارض منافع برای اعلام ندارد.

منابع

[1] Dong, H., Zeng, G., Tang, L., Fan, C., Zhang, C., He, X., He, Y., 2015, An overview on limitations of TiO₂-based particles for photocatalytic degradation of organic pollutants and the corresponding countermeasures. Water Research, 79, 128.

[2] Asiri, A.M., Al-Amoudi, M.S., Bazaid, S.A., Adam, A.A., Alamry, K.A., Anandan, S., 2014, Enhanced visible light photodegradation of water pollutants over N-, S-doped titanium dioxide and n-titanium dioxide in the presence of inorganic anions. Journal of Saudi Chemical Society, 18, 155.

[3] Naghdi, S., Moheb Shahrestani, M., Zendeabad, M., Djahaniani, H., Kazemian, H., Eder, D., 2023, Recent advances in application of metal-organic frameworks (MOFs) as adsorbent and catalyst in removal of persistent organic pollutants (POPs). Journal of Hazardous Materials, 442, 130127.

[4] Gharbani, P., 2024, Investigating the efficiency of graphene oxide in the adsorption of 2-chlorophenol from aqueous solutions as an environmental pollutant. Environmental Pollutions and Sustainable Urban Development, 1(3), 63. (in Persian)

[5] Sadeghi Farshi, F., 2024, Investigation of the efficiency of nickel oxide nanoparticles in removing C.I. Acid Red 97 as an environmental pollutant from aqueous environments. Environmental Pollutions and Sustainable Urban Development, 1(4), 71. (in Persian)

[6] Ghazi Tabatabaei, Z., 2024, Synthesis of zero valent iron loaded on carbon nanotubes and its effectiveness in removing a dye pollutant. Environmental Pollutions and Sustainable Urban Development, 1(2), 97. (in Persian)

[7] Hao, L., Yan, J., Li, M., Shao, W., Zeng, M., 2024, Coagulation-centered three-step approach for removing by-product organic pollutants from tetrabromobisphenol A industrial wastewater: Experimental and

- [23] Shargh, M., Behnajady, M.A., 2016, A high-efficient batch-recirculated photoreactor packed with immobilized TiO_2 -P25 nanoparticles onto glass beads for photocatalytic degradation of phenazopyridine as a pharmaceutical contaminant: Artificial neural network modeling. *Water Science & Technology*, 73, 2804.
- phenazopyridine using immobilized TiO_2 nanoparticles in a rectangular photoreactor. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19, 1525.
- [16] Hajesmaili, A., Bahrami, Z., 2016, Mesoporous titanium dioxide nanoparticles: Synthesis, characterization and application as photocatalyst for removing of phenazopyridine, *Journal of Applied Chemistry*, 11(41), 91.
- [17] Eskandarloo, H., Badiei, A., Behnajady, M.A., Mohammadi Ziarani, G., 2016, Ultrasonic-assisted degradation of phenazopyridine with a combination of Sm-doped ZnO nanoparticles and inorganic oxidants, *Ultrasonics Sonochemistry*, 28, 169.
- [18] Eskandarloo, H., Badiei, A., Behnajady, M.A., Afshar, M., 2015, Enhanced photocatalytic removal of phenazopyridine by using silver-impregnated SiO_2 - TiO_2 nanoparticles: optimization of synthesis variables, *Research on Chemical Intermediates*, 41, 9929.
- [19] Rahimpour-Javid, A., 2024, Removal of diclofenac from aqueous media by UV/ TiO_2 process in a fixed-bed batch photoreactor: Optimization by response surface methodology. *Environmental Pollutions and Sustainable Urban Development*, 1(4), 59. (in Persian)
- [20] Behnajady, M.A., Dadkhah, H., Eskandarloo H., 2018, Horizontally rotating disc recirculated-photoreactor with immobilized TiO_2 -P25 nanoparticles onto HDPE plate for photocatalytic removal of *p*-nitrophenol. *Environmental Technology*, 39, 1061.
- [21] Dadkhah, H., Behnajady, M.A., 2017, Photooxidative removal of *p*-nitrophenol by UV/ H_2O_2 process in a spinning disk photoreactor: Influence of operating parameters. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 31, 361.
- [22] Shargh, M., Behnajady, M.A., 2016, Optimization of photocatalytic activity of immobilized TiO_2 -P25 nanoparticles in the removal of phenazopyridine using response surface methodology. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 89, 1544.