



دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز  
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره اول، شماره ۱، پیاپی ۱

بهار ۱۴۰۳، صفحات ۲۰-۱

## "مقاله مروری"

# مروری بر روش‌های نوین حذف آلودگی‌های محیط زیست: فرآیندهای فوتولیز و $UV/H_2O_2$

## حذف آلودگی‌ها توسط فرآیندهای فوتولیز و $UV/H_2O_2$

حامد اسکندرلو\*

استادیار گروه شیمی، دانشگاه لاورن، لوس آنجلس، کالیفرنیا، ایالات متحده آمریکا

\*نویسنده مسئول مکاتبات: heskandarloo@laverne.edu

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۷/۱۷)

## چکیده

آلاینده‌های آلی نظیر ترکیبات رنگزا، ترکیبات دارویی، آفت‌کش‌ها و غیره به طور فزاینده‌ای در منابع آب یافت می‌شوند و بنابراین باید با فناوری‌های نوین تصفیه آب کنترل شوند. فن‌آوری‌های اکسیداسیون پیشرفته اغلب به عنوان یک روش موثر برای حذف آلاینده‌های آلی استفاده می‌شوند. فرآیند  $UV/H_2O_2$  نتایج قابل قبولی را در حذف طیف وسیعی از آلاینده‌های مذکور نشان داده است. در این مقاله، مروری بر کارایی فرآیندهای فوتولیز و  $UV/H_2O_2$  در حذف آلاینده‌های آلی صورت گرفته و نتایج مهم حاصله گزارش گردیده است.

واژه‌های کلیدی: فرآیند فوتولیز،  $UV/H_2O_2$ ، آلاینده‌های رنگزا، آلاینده‌های دارویی

## مقدمه

افزایش جمعیت جهان و کاهش منابع آب آشامیدنی، نگرانی‌هایی را درباره تامین آب آشامیدنی مورد نیاز کشورهای مختلف در سراسر جهان به وجود آورده است و کمبود آب که در نتیجه افزایش آلودگی‌های زیست محیطی شدت پیدا می‌کند، سبب شده است تامین آب بهداشتی مورد نیاز مردم به یکی از مشکلات اساسی جهان امروز تبدیل شود. امراض ناشی از آلودگی منابع آب، روزانه سبب کشته شدن هزاران و شاید ده‌ها هزار نفر از مردم جهان می‌شود، این در حالی است که امکان بازیافت آب، دسترسی به یک منبع مناسب برای مصارف گوناگون را فراهم خواهد آورد (۱). از طرف دیگر، مصرف خانگی و فعالیت صنعتی به ویژه در کشورهای توسعه یافته، مقدار قابل توجهی از پس‌مانده‌های فاضلاب، تولید می‌کنند. این فاضلاب‌ها مستقیماً به کانال‌های طبیعی وارد می‌شوند و آثار مخربی را در محیط زیست به وجود می‌آورند. در دهه اخیر، روان آب‌های شهری به دلیل پیشرفت‌های چشمگیر در روند شهرنشینی و صنعتی شدن شهرها، حاوی انواع آلاینده‌ها می‌باشند (۲). فرآیندهای شیمیایی و فیزیکی متنوعی نظیر رسوب‌دهی شیمیایی و جداسازی آلاینده‌ها، انعقاد، الکتروانعقاد، حذف با جذب سطحی بر روی کربن فعال و غیره برای از بین بردن آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. مشکل اساسی این روش‌ها این است که قادر به تخریب آلاینده‌ها نبوده و صرفاً آن‌ها را از یک فاز به فاز دیگری منتقل می‌کنند، در نتیجه فاز جدیدی از آلاینده‌ها تولید می‌شود و مشکل اصلی حل نشده باقی می‌ماند (۳). از نقطه نظر شیمیایی و

اقتصادی یک فرآیند ایده‌آل باید قادر به تخریب انواع مختلف آلاینده‌های آلی به مواد غیرسمی و یا به عبارت دیگر اکسیداسیون کامل آن‌ها باشد (۴).

در طی سال‌های اخیر دسته‌ای از روش‌ها موسوم به فرآیندهای اکسایش پیشرفته که جزو روش‌های تصفیه شیمیایی محسوب می‌گردند مورد توجه قرار گرفته‌اند. فرآیندهای اکسایش پیشرفته به عنوان یک روش مؤثر در تخریب آلاینده‌ها هستند. اساس این فرآیندها تشکیل اجزاء فوق‌العاده فعالی نظیر رادیکال‌های هیدروکسیل است. به نحوی که قادر به اکسایش طیف وسیعی از آلاینده‌ها می‌باشند (۳). فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته به سه دسته فرآیندهای اکسیداسیونی همگن، اکسیداسیونی ناهمگن و فرآیندهای ترکیبی اکسیداسیون پیشرفته تقسیم‌بندی می‌شوند.

در فرآیندهای اکسیداسیونی همگن از ترکیب اشعه ماوراء بنفش با یک اکسیدکننده نظیر H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> و یا O<sub>3</sub> استفاده می‌شود و در فرآیندهای اکسیداسیونی ناهمگن از ترکیب اشعه ماوراء بنفش و یک فوتوکاتالیزور نیمه رسانا نظیر TiO<sub>2</sub> استفاده می‌شود. در فرآیندهای ترکیبی اکسیداسیون پیشرفته نیز از ترکیب دستجات مختلف این فرآیندها به منظور حذف مؤثرتر آلاینده‌ها بهره برده می‌شود (۵).

بطور کلی فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته بر واکنش‌های تخریبی اکسیداسیونی متکی هستند، که در طی این فرآیندها رادیکال‌های آلی در اثر فوتولیز آلاینده آلی و یا از طریق واکنش با رادیکال هیدروکسیل تولید می‌گردند. در مرحله بعد حدواسط‌های رادیکالی حاصله توسط اکسیژن محلول

UV-C و Vacuum-UV تقسیم‌بندی شود. کاربرد پرتو ماوراء بنفش نزدیک به حدود یک قرن است که مورد توجه قرار گرفته است. چرا که در طبیعت تحت تابش نور خورشید گندزدایی به طور طبیعی انجام می‌شود. پرتو ماوراء بنفش از دسته پرتوهای پرنرژی بوده و بیش‌تر خواص و کاربردهای آن به خاطر همین انرژی زیاد آن می‌باشد.

اکثر لامپ‌های UV که در تصفیه پساب مورد استفاده قرار می‌گیرند دارای طول موج ۲۵۴ نانومتر می‌باشند. پرتو ماوراء بنفش به طور طبیعی در نور خورشید نیز وجود دارد. در واقع در طبیعت انجام عمل ضدعفونی و کنترل رشد میکروارگانیسم‌ها به همین طریق انجام می‌شود. دلیل موثر بودن نور آفتاب در پاکیزگی بهتر لباس‌های شسته شده و همچنین زرد شدن و تغییر رنگ کاغذ و برخی از پارچه‌هایی که مدام در نور آفتاب قرار دارند وجود همین پرتو در نور خورشید می‌باشد.

تولید مصنوعی این پرتو با تخلیه الکتریکی در بخار جیوه در لامپ‌های مربوطه انجام می‌شود. مشخصه فیزیکی تخلیه الکتریکی در بخار جیوه، تولید چند طیف مشخص و ناپیوسته است که دو طیف ۱۸۵ و ۲۵۴ نانومتر آن در ناحیه پرتو ماوراء بنفش و بقیه در ناحیه مرئی قرار می‌گیرند. طول موج ۲۵۴ نانومتر بیش‌ترین شدت را نسبت به دیگر طول موج‌ها داشته و دارای خاصیت میکروبوکشی است. بنابراین در اکثر فرآیندهای اکسایش پیشرفته از اشعه ماوراء بنفش که از لامپ‌های UV-C ساطع می‌شود به عنوان منبع نور استفاده می‌شود. لامپ‌های مولد پرتو ماوراء بنفش سه دسته‌اند:

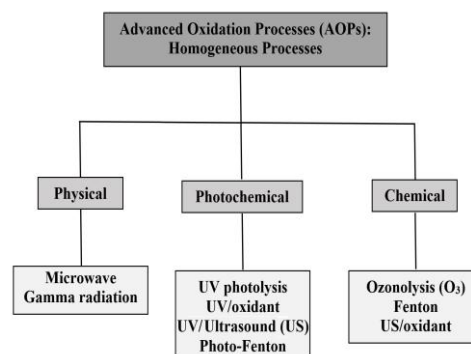
۱. لامپ‌های کم فشار

به دام افتاده و از طریق رادیکال‌های پراکسی و پراکسیدها منجر به پیشرفت و در نهایت کامل شدن فرآیند معدنی‌سازی می‌شوند (۶).

در مقاله مروری حاضر، مطالعه جامعی بر روی مهم‌ترین تحقیقات انجام شده در زمینه حذف آلودگی‌های محیطی توسط فرآیندهای فوتولیز و UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> صورت گرفته است.

### فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته همگن

فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته همگن را می‌توان به سه دسته شیمیایی، فیزیکی و فوتوشیمیایی تقسیم‌بندی نمود. در شکل (۱) به مهم‌ترین موارد هر شاخه اشاره شده است. در ادامه نیز به اصول و نتایج تحقیقات صورت گرفته بر روی فرآیندهای فوتولیز و UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> که از مهم‌ترین شاخه‌های فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته همگن فوتوشیمیایی می‌باشند، پرداخته خواهد شد (۷).



شکل (۱): انواع فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته همگن

### - فوتولیز با تابش اشعه ماوراء بنفش

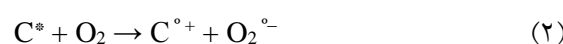
اشعه ماوراء بنفش<sup>۱</sup> (UV) به محدوده‌ای از امواج الکترومغناطیس اطلاق می‌شود که در ناحیه نامرئی طیف نوری، در محدوده طول موج ۴۰۰-۱۰۰ نانومتر قرار دارد و می‌تواند به ۴ ناحیه UV-A، UV-UV

<sup>۱</sup> Ultraviolet

۲. لامپ‌های با فشار متوسط

۳. لامپ‌های پر فشار

در اکثر سیستم‌های تصفیه آب با استفاده از پرتوهای ماوراء بنفش، برای تولید اشعه ماوراء بنفش UV-C از لامپ‌های کم فشار محتوی بخار جیوه استفاده می‌شود. در حدود ۹۰ درصد از طیف UV ساطع شده از این لامپ‌ها در محدوده میکروبوکشی یعنی طول موج ۲۵۴ نانومتر است. اشعه UV لامپ‌های بخار جیوه بوسیله عبور یک قوس الکتریکی از میان یک گاز بی‌اثر تولید می‌شود. لامپ‌ها از شیشه کوآرتز ساخته می‌شوند و معمولاً بوسیله یک پوشش کوآرتز اضافی از آب اطراف ایزوله می‌شوند. بازدهی لامپ‌های با فشار متوسط نسبت به انرژی مصرفی آن‌ها کم می‌باشد. در عوض توانایی نفوذ پرتو ساطع شده از آن‌ها به خاطر شدت بالای آن بیش‌تر از لامپ‌های کم فشار است (۷). به منظور حذف آلاینده‌های آلی بوسیله فوتولیز با تابش اشعه ماوراء بنفش، معمولاً از لامپ‌های UV-C استفاده می‌شود. در این فرآیند واکنش فوتواکسیداسیونی با تحریک الکترونی سوبسترای آلی (معادله (۱)) آغاز می‌شود و در ادامه انتقال الکترون از حالت تحریک شده یعنی C\* به حالت پایه اکسیژن مولکولی مطابق با معادله (۲) رخ داده و آنیون رادیکال سوپراکسید تشکیل می‌شود که گونه بسیار فعالی می‌باشد:



سرعت این فرآیند بستگی به سطح مقطع جذب نور<sup>۱</sup>، بهره کوانتایی<sup>۲</sup> فرآیند، سرعت فوتون در طول موج تحریک کننده و غلظت اکسیژن مولکولی محلول دارد (۷).

روش فوتولیز با تابش اشعه ماوراء بنفش برای حذف آروماتیک‌های نیترو و کلره، مواد رنگ‌زا، قارچ کش‌ها و سایر آلودگی‌های موجود در آب بکار برده شده است. اگر چه قوس‌های کم فشار جیوه برای مقاصد ضد عفونی کردن آب کاملاً موثر می‌باشند، با این وجود نتایج حاصله ثابت کرده است که این روش به تنهایی قادر به حذف موثر مواد آلی از آب نمی‌باشد (۸-۱۰).

- فوتولیز با تابش اشعه ماوراء بنفش در حضور یک اکسیدکننده (UV/Oxidant)

به منظور افزایش کارایی فرآیند فوتولیز با تابش اشعه ماوراء بنفش در حذف آلاینده‌های محیط زیست، از اشعه ماوراء بنفش به همراه ترکیبات اکسیدکننده قوی نظیر هیدروژن پراکسید (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)، پتاسیم پرسولفات (K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) و .... استفاده می‌شود. فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> معروف‌ترین فرآیند از فرآیندهای UV/Oxidant می‌باشد. فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> به دلیل ارزان بودن و تولید مقادیر قابل توجهی از رادیکال‌های هیدروکسیل مورد توجه جدی محققین قرار گرفته و در طول دهه گذشته به عنوان یک روش تصفیه موثر، توسعه زیادی یافته است. این روش در حذف آلاینده‌های آلی مقاوم در برابر تجزیه بیولوژیکی بسیار موثر است. جذب فوتون توسط

<sup>1</sup> absorption cross section

<sup>2</sup> quantum yield

مکانیسم به سه گروه مختلف طبقه‌بندی نمود که در ادامه به آن اشاره شده است (۷).

رادیکال‌های هیدروکسیل عمدتاً ترکیبات آلی را از طریق گرفتن هیدروژن به رادیکال‌های آلی تبدیل می‌نمایند.



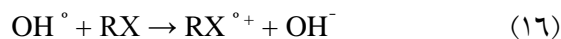
رادیکال‌های آلی در اثر واکنش با اکسیژن، رادیکال‌های پراکسیل را ایجاد می‌کنند. حد واسط‌های رادیکالی حاصله، یک سری واکنش تخریبی زنجیری را آغاز می‌نمایند، به طوری که در نهایت منجر به تبدیل آلاینده آلی به  $\text{CO}_2$  و سایر مواد بی‌ضرر می‌شوند.



افزایش الکتروفیلی رادیکال هیدروکسیل به سیستم  $\pi$  ترکیبات آلی، مکانیسمی دیگر برای تخریب اکسیداسیونی می‌باشد.



همچنین رادیکال‌های هیدروکسیل می‌توانند در انتقال الکترون از سوبسترای آلی شرکت کرده و آنیون‌های هیدروکسیل را تشکیل دهند.



اغلب مشاهده شده است که افزایش غلظت هیدروژن پراکساید سبب افزایش درصد حذف آلاینده‌ها می‌شود، اما بعد از غلظت خاصی که به غلظت بحرانی معروف است، غلظت‌های بالاتر هیدروژن پراکساید سرعت حذف آلاینده را افزایش نداده و حتی در برخی موارد سبب کاهش سرعت حذف می‌شوند (۱۳). اثر منفی حضور بیش از حد هیدروژن پراکساید، ناشی از نقش بازدارندگی آن در تشکیل رادیکال‌های هیدروکسیل است. از این رو

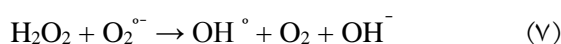
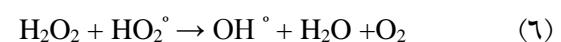
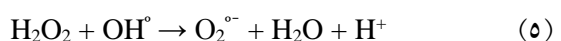
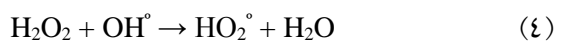
مولکول  $\text{H}_2\text{O}_2$  آن را به دو رادیکال هیدروکسیل تفکیک می‌کند. این رادیکال‌ها از طریق گرفتن هیدروژن و یا افزایش به پیوند دوگانه قادرند به مولکول‌های آلی حمله نموده و تحت شرایط عملیاتی مناسب، می‌توانند محصولات نهایی معدنی‌سازی نظیر آب،  $\text{CO}_2$  و اسیدهای معدنی را تولید نمایند (۱۱).

در مقالات علمی، مکانیسم‌های مختلفی برای فرآیند  $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$  پیشنهاد شده است. مکانیسمی که در بیشتر منابع نیز گزارش شده است شامل تولید رادیکال‌های فعال هیدروکسیل در اثر تابش نور  $\text{UV}$  به محلول  $\text{H}_2\text{O}_2$  می‌باشد. مکانیسم پیشنهادی برای فرآیند  $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$  را در سه مرحله واکنش‌های زیر می‌توان خلاصه کرد (۱۲):

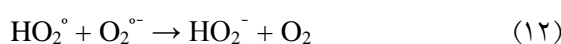
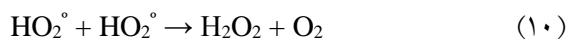
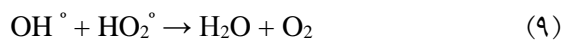
مرحله آغازین:



مرحله انتشار:



مرحله نهایی:



واکنش‌های رادیکال‌های هیدروکسیل ایجاد شده در حضور یک سوبسترای آلی را می‌توان از نظر

۲۴۰ نانومتر دارند بهره برد چرا که در این ناحیه ضریب جذب H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> زیاد است (۱۶-۱۴).

- مروری بر مهم‌ترین تحقیقات صورت گرفته در فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف انواع مختلفی از آلاینده‌های محیطی نظیر آلاینده‌های رنگزا، آلاینده‌های دارویی، مشتقات مختلف بنزن، فنل و آفت‌کش‌ها (علف‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها و ...) مورد بررسی قرار گرفته و نتایج قابل توجهی گزارش شده است.

در خصوص حذف آلاینده‌های رنگزا توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> تحقیقات متعددی صورت گرفته است. بهنژادی و همکارانش در سال ۲۰۰۴ (۱۲) کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف اسید اورانژ<sup>۲</sup> (AO7) از محلول‌های آبی را مورد بررسی قرار دادند. AO7 یک رنگ مونوازو آنیونی است که در صنایع نساجی به وفور استفاده شده و پساب خروجی از این صنایع به طور قابل توجهی حاوی این ترکیب و ترکیبات مشابه آن می‌باشد.

آزمایش‌ها در یک فوتوراکتور ناپیوسته مجهز به یک لامپ UV-C، با توان ۳۰ وات انجام شد. منبع نور در قسمت فوقانی و در بالای مخزنی به حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر تعبیه شده و تابش از سطح مورد استفاده قرار گرفت. کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در تخریب AO7 با فرآیند فوتولیز (استفاده تنها از تابش UV) و فرآیند استفاده تنها از هیدروژن پراکسید جهت اکسایش (بدون حضور تابش UV) مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که در حالت

مقدار هیدروژن پراکسید باید به میزانی تنظیم شود که تقریباً تمام آن مورد مصرف قرار گیرد. غلظت مطلوب هیدروژن پراکسید در فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> به پارامترهای متعددی نظیر غلظت آلاینده، نوع آلاینده، و pH وابسته بوده و باید برای هر پساب ویژه، بهینه‌سازی‌های لازم صورت گیرد.

فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> چندین مزیت عمده دارد که عبارتند از (۱۳):

۱. تولید دو رادیکال هیدروکسیل از فوتولیز یک مولکول H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.
۲. در دسترس بودن اکسیدکننده و پایداری حرارتی آن.
۳. هزینه سرمایه‌گذاری کم.
۴. فرآیندی مقرون به صرفه، ایمن با روش عملیاتی ساده.
۵. عدم تشکیل لجن.
۶. زمان مورد نیاز کم و
۷. کاهش قابل ملاحظه<sup>۱</sup> COD

با وجود مزایای فوق، محدودیت‌هایی نیز در استفاده از فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> وجود دارد. اولاً از آنجائیکه برای فوتولیز H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> و تبدیل آن به رادیکال‌های هیدروکسیل نیاز به طول موج کم‌تر از ۲۸۰ نانومتر وجود دارد و از آنجائیکه چنین طول موج‌هایی در نور خورشیدی که به سطح زمین می‌رسد ناچیز است، کاربرد روش مذکور تحت تابش نور خورشید (Solar/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) برای حذف آلودگی‌های محیطی کارایی مناسبی نخواهد داشت. همچنین به دلیل ناحیه جذب نسبتاً کوچک H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>، بویژه در مواردی که ترکیبات آلی در ناحیه جذبی H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> قادر به جذب اشعه UV باشند یک مشکل عمده ایجاد می‌کند. با این وجود در چنین مواقعی می‌توان از قوس‌های Xe-Hg که نشر مناسبی در ناحیه ۲۱۰ الی

<sup>2</sup> Acid Orange 7

<sup>1</sup> Chemical Oxygen Demand

غلظت اولیه آلاینده مورد مطالعه (AO7) بود. مشاهده شد که در غلظت ثابتی از هیدروژن پراکسید، با افزایش غلظت آلاینده کاهشی در میزان حذف ایجاد می‌شود. این اثر نیز این گونه توجیه گردید که ضریب جذب مولی AO7 در طول موج کم‌تر از ۲۶۰ نانومتر بسیار بالا می‌باشد، به طوری که افزایش در غلظت AO7 موجب یک اثر فیلتر داخلی می‌شود. در نتیجه محلول AO7 به نور UV نفوذ ناپذیرتر شده و راندمان حذف آلاینده کاهش می‌یابد.

پارامتر دیگر مورد بررسی تاثیر pH اولیه محلول در کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف AO7 بود. نتایج این تحقیق به وضوح نشان داد که شرایط قلیایی و خنثی به مراتب از شرایط اسیدی برای حذف آلاینده مورد نظر توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> مفیدتر هستند.

در این تحقیق همچنین تاثیر حضور اتانول در کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> مورد بررسی قرار گرفت. ترکیباتی مانند اتانول به طور عمومی به عنوان جاروب کننده و غیر فعال کننده رادیکال‌های هیدروکسیل استفاده می‌شوند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش غلظت اتانول در محلول آزمایشی میزان حذف آلاینده به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. این نتایج به وضوح نقش موثر و کلیدی رادیکال‌های هیدروکسیل را در کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> به اثبات رساند.

جهت مقایسه تاثیر توان منابع نوری در کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> دو لامپ UV-C با توان‌های متفاوت (۳۰ و ۸ وات)، به عنوان منبع نوری استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان حذف AO7 در حضور منبع تابش ۳۰ وات بسیار بیشتر از منبع تابش ۸

استفاده تنها از تابش UV و حالت استفاده تنها از H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> کاهش قابل توجهی در غلظت آلاینده رنگزا مشاهده نمی‌شود. ولی کاربرد همزمان تابش UV و H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> باعث کاهش چشمگیر در غلظت آلاینده رنگزا می‌شود. که این کاهش می‌تواند به تولید رادیکال‌های هیدروکسیل مربوط باشد، که یک عامل اکسنده قوی می‌باشند. در این تحقیق در ادامه تاثیر پارامترهای عملیاتی موثر در کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> از قبیل غلظت اولیه هیدروژن پراکسید و آلاینده مورد مطالعه (AO7)، pH محلول و توان منبع تابش در حذف آلاینده AO7 مورد بررسی قرار گرفت.

در بررسی تاثیر غلظت اولیه H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> مشخص شد که افزایش غلظت H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> با افزایش میزان حذف آلاینده AO7 همراه خواهد بود. ولی با افزایش غلظت H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> بالاتر از یک غلظت مشخص (غلظت بحرانی) افزایش قابل توجهی در میزان حذف مشاهده نمی‌شود. روند مشاهده شده به این صورت توجیه گردید که: با افزایش غلظت H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> رادیکال‌های هیدروکسیل بیشتری جهت حمله به حلقه‌های آروماتیکی در دسترس خواهد بود (مطابق با معادله ۳). در غلظت‌های بالاتر از غلظت بحرانی رادیکال‌های هیدروکسیل به طور موثر با مولکول‌های H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> مازاد واکنش داده و تولید رادیکال‌های هیدروپراکسیل را می‌کنند (مطابق با معادله ۴). رادیکال‌های هیدروپراکسیل نسبت به رادیکال‌های هیدروکسیل کم‌تر فعال بوده در نتیجه افزایش قابل توجهی در میزان حذف مشاهده نمی‌شود.

پارامتر دیگری که تاثیر آن در کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت

رادوکان<sup>۳</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۲ (۱۸) کارآیی فرآیندهای UV تنها، UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> و NaHCO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> را در حذف رنگ‌های Fast Green FCF (FG) و Ponceau 4R (P4R) مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف هر دو آلاینده رنگزای فوق از محلول‌های آبی از فرایند UV تنها و NaHCO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> موثرتر است. در این تحقیق با استفاده از آنالیزهای HPLC-MS و شناسایی حدواسط‌های تشکیل شده مکانیسمی برای تخریب هر دو رنگ پیشنهاد گردید.

در جدول (۱) نتایج اصلی مهم‌ترین تحقیقات صورت گرفته شده در زمینه حذف آلاینده‌های رنگزا توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در سال‌های اخیر ارائه شده است. نتایج جدول (۱) به خوبی نشان می‌دهد فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> قادر به رنگزدایی کامل انواع مختلف آلاینده‌های رنگزا بوده و با افزایش زمان تابش نور میزان معدنی‌سازی نیز به طور چشمگیری قابل افزایش است. شرایط بهینه گزارش شده در این جدول برای حذف آلاینده‌های رنگزا به خوبی نشان می‌دهد که برای رسیدن به حذف مناسب، نسبت غلظت H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> به غلظت آلاینده رنگزا باید تقریباً در محدوده ۵۰ برابر باشد. منبع نور مناسب برای این فرآیند نیز منبع نور لامپ جیوه کم فشار با طول موج حداکثری ۲۵۴ نانومتر می‌باشد.

وات می‌باشد. نتایج این تحقیق نیز بیانگر نقش موثر توان منبع نور در کارآیی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> بوده و نشان داد که بهتر است از منابع نوری با توان بیش‌تر برای حذف موثر آلاینده‌های محیطی بهره برده شود.

مدیرشها و بهنژادی در سال ۲۰۰۶ (۱۱) کارآیی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف مالاشیت سبز<sup>۱</sup> (MG) از محلول‌های آبی را مورد بررسی قرار دادند. MG یک رنگ بازی کاتیونی است که در صنایع مختلف به وفور استفاده می‌شود. نتایج این تحقیق نشان داد که فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> می‌تواند به طور موثری برای حذف MG از محیط‌های آبی مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق غلظت مطلوب هیدروژن پراکسید برای ۱۰ mg L<sup>-1</sup> از MG برابر با ۳۰۰ mg L<sup>-1</sup> گزارش گردید. مدل سینتیکی ارائه شده در این تحقیق و مکانیسم پیشنهادی برای تخریب آلاینده مورد مطالعه از نوآوری‌های جالب این تحقیق بود.

مدیرشها و همکارانش در سال ۲۰۱۲ (۱۷) کارآیی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف اسید رد<sup>۲</sup> (AR88) از محلول‌های آبی را مورد بررسی قرار داده و محاسبات انرژی الکتریکی مورد نیاز برای فرایند را انجام داده و گزارش نمودند. آن‌ها گزارش نمودند که انرژی الکتریکی مورد نیاز برای فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> با افزایش غلظت اولیه AR88 و pH افزایش می‌یابد در صورتیکه با افزایش غلظت اولیه H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> و شدت تابش نور فرابنفش تا یک مقدار مشخص، میزان انرژی الکتریکی مورد نیاز فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> کاهش می‌یابد.

<sup>۱</sup> Malachite Green

<sup>۲</sup> Acid Red 88

<sup>۳</sup> Raducan



جدول (۱): نتایج اصلی مهم‌ترین تحقیقات صورت گرفته شده در زمینه حذف آلاینده‌های رنگزا توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

منبع	کارایی حذف	متغیرهای فرآیند	نام آلاینده رنگزا
(۱۹)	Decolorization = 100%	[Dye] = 100 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 35%] = 4 mL/6 L, Lamp power = 1600 W, Irradiation time = 6 min	C.I. Reactive Red 120
(۲۰)	Decolorization = 100%	[Dye] = 500 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 90 mM, Lamp power = 150 W (Wavelength = 200-280 nm), Irradiation time = 175 min	C.I. Reactive Black 5
(۲۱)	Decolorization = 100% Mineralization = 100%	[Dye] = 100 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 1000 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 120 W (Wavelength = 253.7 nm), Decolorization irradiation time = 20 min, Mineralization irradiation time = 120 min	Remazol Black B (C.I. Reactive Black 5)
(۲۲)	Decolorization = 100% TOC reduction = 82%	[Dye] = 40 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 565.8 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 125 W (Medium pressure Hg lamp), Decolorization irradiation time = 35 min, Mineralization irradiation time = 60 min	C.I. Direct Black 22
(۲۳)	Decolorization = 100% TOC reduction = 58.48%	[Dye] = 100 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 24.5 mM, Lamp power = 15 W, Irradiation time = 60 min	C.I. Reactive Yellow 84
(۲۴)	Decolorization = 90% TOC reduction = 74%	[Dye] = 20 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 116.32 mM, Lamp power = 560 W (16 low pressure Hg lamp, Wavelength = 253.7 nm, 35 W/lamp), pH = 8.9, Irradiation time = 30 min	C.I. Direct Blue 199
(۲۵)	TOC reduction = 80.2%	[Dye] = 20 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 10 mM, Lamp power = 125 W (Wavelength = 254 nm), pH = 5.5, Irradiation time = 60 min	C.I. Reactive Blue 137
(۲۶)	Decolorization = 99%	[Dye] = 9 × 10 <sup>-5</sup> M, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 10 <sup>-3</sup> M, Output UV radiation power = 23.37 W (Polychromatic UV lamp), Acidic pH, Irradiation time = 10 min	Indigo carmine dye (C.I. Acid Blue 74)
(۲۷)	Decolorization = 74.48%	[Dye] = 80 μM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 3.3 mM, UV lamp wavelength = 254 nm, pH = 10, Irradiation time = 30 min	C.I. Natural Red 4
(۲۸)	Decolorization = 100% TOC reduction = 95%	[Dye] = 17.5 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 525 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 15 W (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 253.7 nm), Decolorization irradiation time = 25 min, Mineralization irradiation time = 120 min	C.I. Acid Orange 7
(۲۹)	Decolorization = 73%	[Dye] = 10 μM; [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 1.67 mM, pH = 7, Lamp power = 6 W (Wavelength = 254 nm), Irradiation time = 30 min	Rhodamine B (C.I. Basic Violet 10)
(۳۰)	COD reduction = 65%	[Dye] = 5 × 10 <sup>-2</sup> mM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 2.5 × 10 <sup>-3</sup> M, pH = 3, Irradiation time = 180 min, Lamp power = 20 W (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 254 nm)	Eriochrome Red 3B (C.I. Mono sulphonic Mordant Red 73)
(۳۱)	Decolorization = 100%	[Dye] = 20 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 1000 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 30 W (UV-C), Distance from UV lamp = 16 cm, Irradiation time = 14 min	C.I. Basic Red 46
(۳۲)	Decolorization = 95.03%	[Dye] = 10 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 1200 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 30 W (UV-C), Distance from UV lamp = 6 cm, Irradiation time = 20 min	C.I. Basic Blue 3
(۳۲)	Decolorization = 98.16%	[Dye] = 10 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 1200 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 30 W (UV-C), Distance from UV lamp = 6 cm, Irradiation time = 20 min	C.I. Acid Green 25
(۳۳)	Decolorization = 100%	[Dye] = 7.8 × 10 <sup>-5</sup> M, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 0.046 M, Light intensity = 1586 μW cm <sup>-2</sup> (Wavelength = 254 nm), Distance from UV lamp = 2 cm, Irradiation time = 3 min	Methyl Orange (C.I. Acid Orange 52)
(۳۴)	Decolorization = 93.51%	[Dye] = 20 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 2000 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 30 W (UV-C), Distance from UV lamp = 8 cm, Irradiation time = 10 min	C.I. Acid Blue 92

ادامه جدول (۱)

منبع	کارایی حذف	متغیرهای فرآیند	نام آلاینده رنگزا
(۳۴)	Decolorization = 99.50%	[Dye] = 20 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 2000 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 30 W (UV-C), Distance from UV lamp = 8 cm, Irradiation time = 10 min	C.I. Acid Black 1
(۳۵)	Decolorization = 92.72%	[Dye] = 250 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 0.25 M, Lamp power = 8 W (UV-C), pH = 4.95, Temperature = 50 °C	Alizarin Yellow R (C.I. Mordant Orange 1)
(۳۶)	Decolorization = 98.8%	[Dye] = 2.5 μM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 50 μM, Lamp power = 300 W (Medium pressure Hg lamp, Wavelength = 365 nm), pH = 7, Irradiation time = 15 min	Rhodamine B (C.I. Basic Violet 10)

حداکثر حذف PhP (بیش از ۹۸٪) را به صورت، غلظت اولیه PhP کم‌تر از ۲۳ mg L<sup>-1</sup>، غلظت اولیه H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> بیش‌تر از ۴۷۰ mg L<sup>-1</sup>، حجم محلول کمتر از ۶ mL، pH نزدیک به ۲ و زمان تابش بیش از ۶ دقیقه نشان داد.

زین<sup>۶</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۰ (۳۸) کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف سولفادی‌متوکسین را از محلول‌های آبی مورد بررسی قرار دادند. آنتی‌بیوتیک‌های سولفونامید موجود در آب به دلیل پایداری و ظرفیت آن‌ها در ایجاد مقاومت میکروبی باعث نگرانی عمومی شده است. بنابراین در این تحقیق کارایی فوتولیز توسط نور ماوراء بنفش و فوتولیز همراه با هیدروژن پراکسید در حذف سولفادی‌متوکسین مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که ترکیب تابش نور ماوراء بنفش با هیدروژن پراکسید در حذف سولفادی‌متوکسین مؤثرتر از تابش به تنهایی یا سیستم UV/persulfate بود. در این تحقیق همچنین اثرات غلظت هیدروژن پراکسید، زمان واکنش و ترکیب ماتریس آب در کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> مورد ارزیابی قرار گرفت. راندمان حذف سولفادی‌متوکسین در غلظت‌های

در خصوص حذف ترکیبات دارویی توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> نیز تحقیقات متعددی در سال‌های گذشته صورت گرفته است. سعید و همکارانش در سال ۲۰۱۸ (۳۷) کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف فنازوپیریدین (PhP) را از محلول‌های آبی در یک فوتوراکتور با جریان چرخشی ناپیوسته<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار دادند. PhP به عنوان یک آلاینده محیط زیست از ترکیبات دارویی بوده و یک مسکن است که در اورولوژی استفاده می‌شود. وجود گروه آزو در ساختار آن، این ترکیب را در برابر تجزیه زیستی<sup>۲</sup> مقاوم می‌کند. در این تحقیق از روش رویه پاسخ<sup>۳</sup> (RSM) برای بهینه‌سازی حذف PhP استفاده گردیده و یک مدل ریاضی درجه دوم<sup>۴</sup> مابین پارامترهای عملیاتی و درصد حذف آلاینده مورد نظر گزارش گردید. تحلیل واریانس<sup>۵</sup> (ANOVA) مدل درجه دوم نشان داد که مدل ارایه شده بسیار معنادار است. مقادیر پیش‌بینی شده راندمان حذف PhP توسط مدل درجه دوم به طور قابل توجهی مطابق با مقادیر تجربی بوده و مدل ارایه شده شرایط بهینه برای

<sup>1</sup> batch re-circulated photoreactor<sup>2</sup> biodegradation<sup>3</sup> Response Surface Methodology<sup>4</sup> quadratic model<sup>5</sup> Analysis of Variance<sup>6</sup> Xin

بالای هیدروژن پراکسید کاهشی را نشان می‌دهد. در جدول (۲) نتایج اصلی مهم‌ترین تحقیقات همچنین افزایش pH محیط به شرایط قلیایی نیز سبب صورت گرفته شده در زمینه حذف ترکیبات دارویی کاهش راندمان حذف آلاینده مذکور می‌شود. از محیط‌های آبی توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در سال‌های اخیر ارایه شده است.

جدول (۲): نتایج اصلی مهم‌ترین تحقیقات صورت گرفته شده در زمینه حذف ترکیبات دارویی توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

منبع	کارایی حذف	متغیرهای فرآیند	نام ترکیبات دارویی
(۳۹)	Removal = 94%	[CFA] = $1 \times 10^{-3}$ M, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 1 M, pH = 5, Lamp power = 17 W (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 254 nm), Irradiation time = 60 min	Clofibric acid (CFA)
(۴۰)	TOC reduction = 35%	[CBZ] = $2 \times 10^{-2}$ mM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 5 mM, pH = 5, Lamp power = 17 W (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 254 nm), Irradiation time = 4 min	Carbamazepine (CBZ)
(۴۱)	Removal = 98%	[CTB] = 10 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 1000 μM, pH = 7, Lamp power = 700 W (Medium pressure Hg lamp, Wavelength = 238-334 nm), Irradiation time = 120 min	Cytarabine (CTB)
(۴۲)	TOC reduction = 50%	[AMX] = 100 μM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 10 mM, pH = 7, Photon fluence rate = 0.38 W L <sup>-1</sup> (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 254 nm), Irradiation time = 80 min	Amoxicillin (AMX)
(۴۳)	TOC reduction = 40.65 ± 5.1%	[CBZ] = 4.2 μM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 10 mM, pH = 2-8, Lamp power = 30 W (Medium pressure Hg lamp - UV dose = 172 mJ cm <sup>-2</sup> ), Irradiation time = 15 min	Carbamazepine (CBZ)
(۴۴)	TOC reduction = 72.06%	[CBZ] = 21.16 μM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 1 mM, pH = 5.74, Lamp power = 75 W (Low pressure Hg lamp - Light intensity = 153 μW cm <sup>-2</sup> , Wavelength = 253.7 nm), Irradiation time = 240 min	Carbamazepine (CBZ)
(۴۵)	Removal = 98%	[CAP] = 20 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 3 mmol, Lamp power = 30 W (UVC, Wavelength = 254 and 290-390 nm), Irradiation time = 90 min	Chloramphenicol (CAP)
(۴۶)	TOC reduction = 50%	[CAP] = 20 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 35 mM, pH = 5.5, Lamp power = 6 W (Wavelength = 254 nm, Light intensity = 600 μW cm <sup>-2</sup> ), Irradiation time = 50 min	Chloramphenicol (CAP)
(۴۷)	Removal = 100%	[SMX] = 10 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 100 mg L <sup>-1</sup> , pH = 4.8, Lamp power = 200 W (Polychromatic medium-pressure Hg lamp, Wavelength = 255-579 nm), Irradiation time = 10 min	Sulfamethoxazole (SMX)
(۴۸)	Removal = 100%	[NFX] = 15 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 2.1 mM, pH = 7, Lamp power = 6 W (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 254 nm), Irradiation time = 100 min	Norfloxacin (NFX)
(۴۹)	Removal = 90% TOC reduction = 43%	[AMX] = 25 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 558 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 21 W (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 254 nm, UV fluence rate = $4.86 \times 10^{-6}$ Einstein m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ), Irradiation time = 67 min	Amoxicillin (AMX)
(۵۰)	Removal = 100%	[SPY] = 20 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 700 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 15 W (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 253.4 nm), Irradiation time = 180 min	Sulfapyridine (SPY)

ادامه جدول (۲)

منبع	کارایی حذف	متغیرهای فرآیند	نام ترکیبات دارویی
(۵۱)	Removal = 66%	[CIP] = 30 μM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 300 μM, Irradiation intensity = 0.023 mW cm <sup>-2</sup> (UV-LED, Wavelength = 280 nm), Irradiation time = 60 min	Ciprofloxacin (CIP)
(۵۲)	Removal = 72%	[NFX] = 150 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 200 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 250 W (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 365 nm), Irradiation time = 210 min	Norfloxacin (NFX)
(۵۳)	Removal = 85%	[GFX] = 200 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 200 mg L <sup>-1</sup> , pH = 7, Lamp power = 250 W (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 365 nm), Irradiation time = 180 min	Gemifloxacin (GFX)
(۵۴)	TOC reduction = 40%	[TAP] = 50 μM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 5 mM, pH = 7 with 1 mM phosphate buffer, Lamp power = 20 W (Wavelength = 254 nm), Irradiation time = 120 min	Thiamphenicol (TAP)
(۵۵)	Removal = 100%	[CIP] = 0.03 mM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 100 mM, Lamp power = 6 W (UV-C, Wavelength = 280 nm), Irradiation time = 40 min	Ciprofloxacin (CIP)
(۵۶)	Removal = 100%	[SMT] = 5 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 10 mM, Lamp power = 8 W (2 low pressure Hg lamps, Wavelength = 254 nm), Irradiation time = 10 min	Sulfamethazine (SMT)
(۵۷)	Removal = 90%	[ACE] = 90 μM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 11.8 mM, pH = 5, Lamp power = 55 W (Wavelength = 253.7 nm), Irradiation time = 30 min	Acetamiprid (ACE)
(۵۸)	Removal = 76%	[AZM] = 2 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 10 mg L <sup>-1</sup> , pH = 3, Lamp power = 8 W (Low pressure Hg lamps, Wavelength = 254 nm, Light intensity = 1.02 mW cm <sup>-2</sup> ), Irradiation time = 60 min	Azithromycin (AZM)
(۵۹)	Removal = 100% TOC reduction = 58%	[CFT] = 10 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 10 mg L <sup>-1</sup> , pH = 5, Lamp power = 9 W (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 254 nm, Light intensity = 2.2 mW cm <sup>-2</sup> ), Irradiation time = 120 min	Ceftriaxone (CFT)
(۶۰)	Removal = 100%	[CPX] = 2 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 6.9 mg L <sup>-1</sup> , pH = 3, Xenon lamp (Light spectrum similar to the sun, Light intensity = 500 W m <sup>-2</sup> ), Irradiation time = 50 min	Cephalexin (CPX)
(۶۱)	Removal = 96%	[LEV] = 5 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 150 μM, pH = 3, Lamp power = 25 W (UV Hg lamp, Wavelength = 254 nm), Irradiation time = 30 min	Levofloxacin (LEV)
(۶۱)	Removal = 94%	[OFLO] = 5 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 150 μM, pH = 3, Lamp power = 25 W (UV Hg lamp, Wavelength = 254 nm), Irradiation time = 30 min	Ofloxacin (OFLO)
(۶۲)	Removal = 99.94%	[NIF] = 5 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 0.52 mM, pH = 7, Lamp power = 25 W (Wavelength = 254 nm), Irradiation time = 5 min	Nifedipine (NIF)

دارویی توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> بسیار قابل توجه نمی‌باشد. به نظر می‌رسد برای داشتن معدنی‌سازی مناسب نیاز به تحقیقات بیشتر و بررسی توانایی سایر اکسیدکننده‌ها می‌باشد. در مقایسه با آلاینده‌های

نتایج جدول (۲) مشخصاً کارایی قابل ملاحظه فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف انواع مختلف آلاینده‌های دارویی را نشان می‌دهد. با این حال میزان حذف TOC و در واقع میزان معدنی‌سازی آلاینده‌های

از محلول‌های آبی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که pH مطلوب برای حذف BP-3 در فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> برابر با ۶ می‌باشد و افزایش غلظت هیدروژن پراکسید به طور خطی سبب افزایش سرعت حذف BP-3 می‌شود.

در خصوص حذف آلاینده‌های مربوط به آفت‌کش‌ها (علف‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها و ...) توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> نیز تحقیقات جالبی در سال‌های گذشته صورت گرفته است. لویز-آلوارز<sup>۴</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۶ (۶۵) تخریب و حذف دو آفت‌کش کربوفوران (CBF) و یوپرودین (IPR) را توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق تاثیر دو پارامتر عملیاتی، غلظت H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> و pH اولیه، و همچنین برهمکنش آن‌ها، در راندمان حذف مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گرفت. هر دو آفت‌کش به طور کامل توسط سیستم UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> تحت شرایط بهینه حذف شدند. با این حال، تفاوت‌های قابل‌توجهی مشاهده گردید: تخریب CBF تحت تاثیر هر دو پارامتر و برهمکنش آنها قرار گرفت، در حالی که تخریب IPR تحت تاثیر pH اولیه قرار نگرفت. جالب توجه است، تجزیه و تحلیل مسیرهای تخریب، تاثیر عمده فرآیند فوتولیز و اکسیداسیون ناشی از هیدروژن پراکسید را در تخریب CBF نشان داد، در حالی که ترکیب این دو هم‌افزایی قابل‌توجهی در تخریب IPR نشان دادند. حذف مخلوطی از هر دو آفت‌کش نیز توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> مورد بررسی قرار گرفت که در آن حذف کمتری برای IPR مشاهده شد در حالی که میزان حذف CBF تحت تاثیر قرار نگرفت. ۹۰ درصد از

رنگزا، نسبت غلظت H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> به غلظت آلاینده دارویی در شرایط بهینه در اکثر تحقیقات به مراتب کم‌تر گزارش گردیده است. این مساله می‌تواند ناشی از محیط شفاف آلاینده‌های دارویی در مقایسه با آلاینده‌های رنگزا باشد. مقادیر pH مطلوب گزارش شده برای اکثر آلاینده‌های دارویی در محدوده pH خنثی و یا اسیدی می‌باشد و منبع نور استفاده شده در اکثر تحقیقات لامپ‌های جیوه کم فشار با طول موج حداکثری ۲۵۴ نانومتر می‌باشد.

در خصوص حذف آلاینده‌های فنلی توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> نیز تحقیقات قابل توجهی در سال‌های گذشته صورت گرفته است. دانشور و همکارانش در سال ۲۰۰۷ (۶۳) کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف ۴-نیتروفنل (4-NP) را از محلول‌های آبی مورد بررسی قرار دادند. مشتقات نیتروفنل‌ها جزو آلاینده‌های مقاوم محسوب می‌شوند که در پساب‌های صنایع مختلف وجود دارند. نتایج این تحقیق نشان داد که فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> می‌تواند به طور کامل 4-NP را از محیط‌های آبی حذف نماید. در این تحقیق غلظت مطلوب هیدروژن پراکسید برای ۲۰ mg L<sup>-1</sup> از 4-NP برابر با ۷۰۰ mg L<sup>-1</sup> گزارش گردید. در این تحقیق حدواسط‌های فرآیند تخریب 4-NP هیدروکینون<sup>۱</sup> و ۴-نیتروکاتکول<sup>۲</sup> شناسایی گردید و بر این اساس یک مکانیسم پیشنهادی برای تخریب 4-NP ارائه گردید.

لی<sup>۳</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۱ (۶۴) کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف بنزوفنون-۳ (BP-3) را

<sup>۱</sup> hydroquinone

<sup>۲</sup> 4-nitrocatechol

<sup>۳</sup> Lee

<sup>۴</sup> Lopez-Alvarez

برای تخریب 2,4-D در غلظت‌های بالاتر 2,4-D کاهش قابل توجهی را از خود نشان داد. ثابت سرعت شبه مرتبه اول ظاهری با افزایش pH از ۴ به ۸ با ضریب ۱/۷ کاهش یافته و اثر مشابهی برای غلظت نیترات تا ۱ میلی‌مولار مشاهده گردید. در مجموع، این نتایج نشان دهنده اهمیت کیفیت آب/فاضلاب در معیارهای تصفیه است. به طور کلی، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که فرآیند  $UV/H_2O_2$  تبدیل سریع و کارآمد 2,4-D به محصولات زیست تخریب پذیر را با موفقیت انجام می‌دهد به طوریکه محصولات حاصله می‌توانند از طریق سیستم‌های بیولوژیکی معمولی به راحتی از محیط حذف شوند.

آنجلی<sup>۲</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۱ (۶۷) کارایی فرآیندهای فوتولیز UV و  $UV/H_2O_2$  در حذف کلرپیریفوس (CP) از محلول‌های آبی را مورد بررسی قرار دادند. CP یک آفت‌کش رایج بوده و بطور قابل توجهی مصرف می‌شود. تخریب نوری با ۲۰۰ میکروگرم در لیتر CP تجاری به مدت ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۳۶۰ و ۴۸۰ دقیقه انجام شد. میزان تخریب پس از ۳۰ دقیقه واکنش برای فرآیند  $UV/H_2O_2$  و فوتولیز UVC به ترتیب ۹۸ و ۹۹ درصد گزارش گردید. علاوه بر این، در طول تصفیه، محصول جانبی اصلی CP، کلرپیریفوس اوکسون (CPO)، در میان سایر محصولات جانبی ناشناخته شناسایی شد. بررسی‌های اکوتوکسیکولوژیکی با *A. aegypti* هیچ گونه اثر سمی در نمونه‌های تحت تصفیه با فرآیند  $UV/H_2O_2$  در ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۴۸۰ دقیقه تخریب نشان نداد. علیرغم تشکیل CPO پس

اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) حذف شد و ۷۵ درصد معدنی‌سازی پس از تصفیه مخلوط حاصل شد. تقریباً ۹۲ درصد از سمیت نیز توسط این فرآیند حذف شد و نشان داد این روش می‌تواند فرآیندی امیدوارکننده برای تصفیه مخلوط‌های سمی این آفت‌کش‌ها باشد.

آداک<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۹ (۶۶) کارایی فرآیند  $UV/H_2O_2$  در حذف ۴و۲-دی‌کلروفنوکسی استیک اسید را از محلول‌های آبی مورد بررسی قرار دادند. یکی از پرمصرف‌ترین علف‌کش‌ها در جهان، ۲،۴-دی‌کلروفنوکسی استیک اسید (2,4-D) است. به طور خاص، 2,4-D برای تنظیم رشد گیاهان و کنترل علف‌های هرز استفاده می‌شود. علاوه بر این، 2,4-D نسبتاً سمی و بالقوه سرطان‌زا می‌باشد. قرار گرفتن در معرض دوزهای خوراکی منجر به اثرات نامطلوب روی چشم‌ها، تیروئید، کلیه‌ها و تخمدان‌ها شده است. چندین گزارش در منابع نشان می‌دهد که 2,4-D بر روی آبزیان تأثیر منفی می‌گذارد، اکوسیستم را مختل می‌کند و به دلیل زیست تخریب‌پذیری کم در محیط باقی می‌ماند. بنابراین در این تحقیق کارایی فوتولیز توسط نور ماوراء بنفش و فوتولیز همراه با هیدروژن پراکسید در حذف 2,4-D مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که فرآیند  $UV/H_2O_2$  بیش از ۹۷ درصد از 2,4-D را با تابشی با انرژی  $678 \text{ cm}^{-2}$  و  $2/5 \text{ mol H}_2\text{O}_2$  به ازاء هر مول 2,4-D را حذف می‌کند. نتایج این تحقیق نشان داد که غلظت اولیه 2,4-D، pH و غلظت نیترات بر میزان حذف 2,4-D تأثیر می‌گذارد. ثابت سرعت ظاهری

<sup>2</sup> Angeli<sup>1</sup> Adak

برای PRO در طی هر دو فرآیند پیشنهاد شد. واکنش‌های اصلی در هر دو فرآیند، شامل شکافت حلقه و هیدروکسیلاسیون توسط رادیکال‌های هیدروکسیل بود. آزمایش سمیت سنجی با *Vibrio fischeri* نشان داد که سمیت محلول واکنش ابتدا افزایش یافته، سپس به تدریج در طول فوتولیز UV کاهش می‌یابد، فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در ابتدا سمیت را در ۱۰ دقیقه به دلیل تولید TP افزایش داده، اما قادر است سمیت را به طور کامل با پیشرفت واکنش حذف نماید. نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه نشان داد که فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> یک روش مؤثر برای از بین بردن PRO، TP‌های آن و سمیت ناشی از آن در آب می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته یک تصفیه قدرتمند برای حذف آلاینده‌های مقاوم و سمی موجود در فاضلاب است. با ترکیب پراکسید هیدروژن و اشعه فرابنفش و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی می‌توان به حذف قابل توجهی از آلاینده‌های آلی دست پیدا نمود. نتایج تحقیقات به خوبی نشان می‌دهد فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> قادر به رنگزدایی کامل انواع مختلف آلاینده‌های رنگزا بوده و با افزایش زمان تابش نور میزان معدنی‌سازی نیز به طور چشمگیری قابل افزایش است. نتایج تحقیقات حذف انواع مختلف آلاینده‌های دارویی، مشخصاً کارآیی قابل ملاحظه فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> را نشان می‌دهد. با این حال میزان معدنی‌سازی آلاینده‌های دارویی توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> بسیار بالا نمی‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد برای داشتن معدنی‌سازی مناسب در

از فوتولیز با UVC از ۶۰ دقیقه به بعد، هیچ سمیتی تأیید نشد، که نشان می‌دهد محصولات جانبی تولید شده بر روی این ارگانسیم سمی نیستند.

هونگ<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۲ (۱۰) کارآیی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف پروپیکونازول (PRO) از محلول‌های آبی را مورد بررسی قرار دادند. PRO یک قارچ‌کش تری‌آزول است که اغلب در آب شناسایی می‌شود. در این تحقیق، سینتیک و مکانیسم تخریب PRO در طول فرآیندهای فوتولیز UV و UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که PRO مطابق با سینتیک شبه مرتبه اول در هر دو فرآیند حذف می‌شود. حذف PRO با افزایش غلظت H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> افزایش یافته و بیشترین حذف در شرایط خنثی و حذف کمتر PRO در pH اسیدی و قلیایی مشاهده گردید. وجود ترکیباتی در آب مانند کلراید، نیترات، هیومیک اسید به عنوان جاروب کننده<sup>۲</sup> رادیکال عمل می‌کنند، اما یون بیکربنات می‌تواند هم به عنوان تسریع کننده<sup>۳</sup> تولید رادیکال و هم به عنوان جاروب کننده در فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> عمل می‌کند. در این تحقیق همچنین محصولات تبدیل PRO (TPs<sup>۴</sup>) در طول هر دو فرآیند شناسایی شدند. علاوه بر TP‌های شناسایی شده، محصولات جانبی یونی، مانند کلراید، نیترات، فرمات و استات نیز شناسایی شدند، که نشان می‌دهند معدنی‌سازی قابل توجهی در فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> به دست آمده است. بر اساس TP‌های شناسایی شده و محصولات جانبی یونی، مکانیسم‌های تخریبی نیز

<sup>1</sup> Hong

<sup>2</sup> scavenger

<sup>3</sup> promoter

<sup>4</sup> transformation products

photolysis processes, *Chemosphere*, 302, 134876.

[11] Modirshahla, N., Behnajady, M.A., 2006, Photooxidative degradation of Malachite Green (MG) by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Influence of operational parameters and kinetic modeling, *Dyes and Pigments*, 70, 54.

[12] Behnajady, M.A., Modirshahla, N., Shokri, M., 2004, Photodestruction of Acid Orange 7 (AO7) in aqueous solutions by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Influence of operational parameters, *Chemosphere*, 55, 129.

[13] Daneshvar, N., Rabbani, M., Modirshahla, N., Behnajady, M.A., 2004, Critical effect of hydrogen peroxide concentration in photochemical oxidative degradation of C.I. Acid Red 27 (AR27), *Chemosphere*, 56, 895

[14] Saeid, S., Behnajady, M.A., 2015, Photooxidative removal of phenazopyridine by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process in a batch re-circulated annular photoreactor: Influence of operational parameters, *Oriental Journal of Chemistry*, 31, 1211.

[15] Daneshvar, N., Salari, D., Behnajady, M.A., 2002, Decomposition of anionic sodium dodecylbenzene sulfonate by UV/TiO<sub>2</sub> and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes: A comparison of reaction rates, *Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering*, 21, 55.

[16] Basturk, E., Karatas, M., 2015, Decolorization of anthraquinone dye Reactive Blue 181 solution by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 299, 67.

[17] Modirshahla, N., Behnajady, M.A., Rahbarfam, R., Hassani, A., 2012, Effects of operational parameters on decolorization of C.I. Acid Red 88 by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process: Evaluation of electrical energy consumption, *Clean - Soil, Air, Water*, 40, 298.

[18] Raducan, A., Bogdan, D., Galaon, T., Oancea, P., 2022, Oxidative removal of Fast Green FCF and Ponceaux 4R dyes by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/NaHCO<sub>3</sub>, UV and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV processes: A comparative study, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 431, 114040.

[19] Majcen-Le Marechal, A., Slokar, Y.M., Taufer, T., 1997, Decoloration of

حذف آلاینده‌های دارویی نیاز به تحقیقات بیش‌تر و بررسی توانایی سایر اکسیدکننده‌ها می‌باشد.

## تعارض منافع

نویسنده هیچ‌گونه تعارض منافی برای اعلام ندارد.

## منابع

[1] Crittenden, J.C., Trussell, R.R., Hand, D.W., Howe, K.J., Tchobanoglous, G., *MWH's Water treatment: Principles and design*. John Wiley & Sons, 2012.

[2] Drewes, J.E., Khan, S.J., *Water quality & treatment: A handbook on drinking water*. New York: McGraw-Hill, 2011.

[3] Daneshvar, N., Salari, D., Khataee, A.R., 2004, Photocatalytic degradation of azo dye acid red 14 in water on ZnO as an alternative catalyst to TiO<sub>2</sub>, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 162, 317.

[4] Behnajady, M.A., Modirshahla, N., Daneshvar, N., Rabbani, M., 2007, Photocatalytic degradation of C.I. Acid Red 27 by immobilized ZnO on glass plates in continuous-mode, *Journal of Hazardous Materials*, 140, 257.

[5] Hoffmann, M.R., Martin, S.T., Choi, W., Bahnemann, D.W., 1995, Environmental applications of semiconductor photocatalysis, *Chemical Reviews*, 95, 69.

[6] Eskandarloo, H., Badiei, A., Behnajady, M.A., 2015, Optimization of UV/inorganic oxidants system efficiency for photooxidative removal of an azo textile dye, *Desalination and Water Treatment* 55, 226.

[7] Legrini, O., Oliveros, E., Braun, A.M., 1993, Photochemical processes for water treatment, *Chemical Reviews*, 93, 671.

[8] Al mamoni, F., Sans, C., Esplugas, S., 2004, A comparative study of the advanced oxidation of 2,4 - dichlorophenol, *Journal of Hazardous Materials*, 107, 123.

[9] Behnajady, M.A., Modirshahla, N., Fathi, H., 2006, Kinetics of decolorization of an azo dye in UV alone and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes, *Journal of Hazardous Materials*, 136, 816.

[10] Hong, A., Lee, J., Cha, Y., Zoh, K.-D., 2022, Propiconazole degradation and its toxicity removal during UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV



- water using  $H_2O_2/UV$  and photo-Fenton treatment, *Journal of Hazardous Materials*, 174, 352.
- [31] Khataee, A.R., Habibi, B., 2010, Photochemical oxidative decolorization of C. I. basic red 46 by  $UV/H_2O_2$  process: Optimization using response surface methodology and kinetic modeling, *Desalination and Water Treatment*, 16, 243.
- [32] Kasiri, M.B., Khataee, A.R., 2011, Photooxidative decolorization of two organic dyes with different chemical structures by  $UV/H_2O_2$  process: Experimental design, *Desalination*, 270, 151.
- [33] Haji, S., Benstaali, B., Al-Bastaki, N., 2011, Degradation of methyl orange by  $UV/H_2O_2$  advanced oxidation process, *Chemical Engineering Journal*, 168, 134.
- [34] Kasiri, M.B., Khataee, A.R., 2012, Removal of organic dyes by  $UV/H_2O_2$  process: modelling and optimization, *Environmental Technology*, 33, 1417.
- [35] Narayanasamy, L., Murugesan, T., 2014, Degradation of Alizarin Yellow R using  $UV/H_2O_2$  advanced oxidation process, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33, 482.
- [36] Ding, X., Gutierrez, L., Croue, J.-P., Li, M., Wang, L., Wang, Y., 2020, Hydroxyl and sulfate radical-based oxidation of RhB dye in  $UV/H_2O_2$  and  $UV/persulfate$  systems: Kinetics, mechanisms, and comparison, *Chemosphere*, 253, 126655.
- [37] Saeid, S., Behnajady, M.A., Tolvanen, P., Salmi, T., 2018, Optimization of photooxidative removal of phenazopyridine from water, *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 92, 876.
- [38] Xin, X., Sun, S., Zhou, A., Wang, M., Song, Y., Zhao, Q., Jia, R., 2020, Sulfadimethoxine photodegradation in  $UV-C/H_2O_2$  system: Reaction kinetics, degradation pathways, and toxicity, *Journal of Water Process Engineering*, 36, 101293.
- [39] Andreozzi, R., Caprio, V., Marotta, R., Radovnikovic, A., 2003, Ozonation and  $H_2O_2/UV$  treatment of clofibric acid in water: a kinetic investigation, *Journal of Hazardous Materials*, 103, 233.
- [40] Vogna, D., Marotta, R., Andreozzi, R., Napolitano, A., D'ischia, M., 2004, Kinetic and chemical assessment of the  $UV/H_2O_2$  chlorotriazine reactive azo dyes with  $H_2O_2/UV$ , *Dyes and Pigments*, 33, 281.
- [20] El-Dein, A.M., Libra, J.A., Wiesmann, U., 2001, Kinetics of decolorization and mineralization of the azo dye reactive black 5 by hydrogen peroxide and UV light, *Water Science and Technology*, 44, 295.
- [21] Georgiou, D., Melidis, P., Aivasidis, A., Gimouhopoulos, K., 2002, Degradation of azo-reactive dyes by ultraviolet radiation in the presence of hydrogen peroxide, *Dyes and Pigments*, 52, 69.
- [22] Cisneros, R.L., Espinoza, A.G., Litter, M.I., 2002, Photodegradation of an azo dye of the textile industry, *Chemosphere*, 48, 393.
- [23] Neamtu, M., Siminiceanu, I., Yediler, A., Kettrup, A., 2002, Kinetics of decolorization and mineralization of reactive azo dyes in aqueous solution by the  $UV/H_2O_2$  oxidation, *Dyes and Pigments*, 53, 93.
- [24] Shu, H.-Y., Chang, M.-C., 2005, Decolorization and mineralization of a phthalocyanine dye C.I. Direct Blue 199 using  $UV/H_2O_2$  process, *Journal of Hazardous Materials*, 125, 96.
- [25] Kusic, H., Koprivanac, N., Loncaric-Bozic, A., Papic, S., Peternel, I., Vujevic, D., 2006, Reactive dye degradation by AOPs; Development of a kinetic model for  $UV/H_2O_2$  process, *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 20, 293.
- [26] Rodríguez, E., Peche, R., Merino, J.M., Camarero, L.M., 2007, Decoloring of aqueous solutions of indigocarmine dye in an acid medium by  $H_2O_2/UV$  advanced oxidation, *Environmental Engineering Science*, 24, 363.
- [27] Abdullah, F.H., Rauf, M.A., Ashraf, S.S., 2007, Kinetics and optimization of photolytic decoloration of carmine by  $UV/H_2O_2$ , *Dyes and Pigments*, 75, 194.
- [28] Aleboyeh, A., Olya, M.E., Aleboyeh, H., 2008, Electrical energy determination for an azo dye decolorization and mineralization by  $UV/H_2O_2$  advanced oxidation process, *Chemical Engineering Journal*, 137, 518.
- [29] Alhamedi, F.H., Rauf, M.A., Ashraf, S.S., 2009, Degradation studies of Rhodamine B in the presence of  $UV/H_2O_2$ , *Desalination*, 239, 159.
- [30] Elmorsi, T.M., Riyad, Y.M., Mohamed, Z.H., Abd El Bary, H.M.H., 2010, Decolorization of Mordant red 73 azo dye in

- amoxicillin, *Desalination and Water Treatment*, 57, 13586.
- [50] García-Galán, M.J., Anfruns, A., Gonzalez-Olmos, R., Rodriguez-Mozaz, S., Comas, J., 2016, Advanced oxidation of the antibiotic sulfapyridine by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Characterization of its transformation products and ecotoxicological implications, *Chemosphere*, 147, 451.
- [51] Ou, H.-S., Ye, J.-S., Ma, S., Wei, C.-H., Gao, N.-Y., He, J.-Z., 2016, Degradation of ciprofloxacin by UV and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> via multiple-wavelength ultraviolet light-emitting diodes: Effectiveness, intermediates and antibacterial activity, *Chemical Engineering Journal*, 289, 391.
- [52] Shankaraiah, G., Poodari, S., Bhagawan, D., Himabindu, V., Vidyavathi, S., 2016, Degradation of antibiotic norfloxacin in aqueous solution using advanced oxidation processes (AOPs) – A comparative study, *Desalination and Water Treatment*, 57, 27804.
- [53] Shankaraiah, G., Saritha, P., Bhagawan, D., Himabindu, V., Vidyavathi, S., 2017, Photochemical oxidation of antibiotic gemifloxacin in aqueous solutions – A comparative study, *South African Journal of Chemical Engineering*, 24, 8.
- [54] Wang, F., Wang, W., Yuan, S., Wang, W., Hu, Z.-H., 2017, Comparison of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/PS processes for the degradation of thiamphenicol in aqueous solution, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 348, 79.
- [55] Wang, F., Wang, W., Yuan, S., Wang, W., Hu, Z.-H., 2018, Removal of ciprofloxacin using modified advanced oxidation processes: Kinetics, pathways and process optimization, *Journal of Cleaner Production*, 171, 1203.
- [56] Lin, C.-C., Wu, M.-S., 2018, Feasibility of using UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process to degrade sulfamethazine in aqueous solutions in a large photoreactor, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 367, 446.
- [57] Chen, L., Cai, T., Cheng, C., Xiong, Z., Ding, D., 2018, Degradation of acetamiprid in UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/persulfate systems: A comparative study, *Chemical Engineering Journal*, 351, 1137.
- treatment of antiepileptic drug carbamazepine, *Chemosphere*, 54, 497.
- [41] Ocampo-Pérez, R., Sánchez-Polo, M., Rivera-Utrilla, J., Leyva-Ramos, R., 2010, Degradation of antineoplastic cytarabine in aqueous phase by advanced oxidation processes based on ultraviolet radiation, *Chemical Engineering Journal*, 165, 581.
- [42] Jung, Y.J., Kim, W.G., Yoon, Y., Kang, J.-W., Hong, Y.M., Kim, H.W., 2012, Removal of amoxicillin by UV and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes, *Science of the Total Environment*, 420, 160.
- [43] Dai, C.-M., Zhou, X.-F., Zhang, Y.-L., Duan, Y.-P., Qiang, Z.-M., Zhang, T.C., 2012, Comparative study of the degradation of carbamazepine in water by advanced oxidation processes, *Environmental Technology*, 33, 1101.
- [44] Deng, J., Shao, Y., Gao, N., Xia, S., Tan, C., Zhou, S., Hu, X., 2013, Degradation of the antiepileptic drug carbamazepine upon different UV-based advanced oxidation processes in water, *Chemical Engineering Journal*, 222, 150.
- [45] Rocha, O.R.S., Pinheiro, R.B., Duarte, M.M.B., Dantas, R.F., Ferreira, A.P., Benachour, M., Da Silva, V.L., 2013, Degradation of the antibiotic chloramphenicol using photolysis and advanced oxidation process with UVC and solar radiation, *Desalination and Water Treatment*, 51, 7269.
- [46] Zorro, A., Fidaleo, M., Fidaleo, M., Lavecchia, R., 2014, Degradation and antibiotic activity reduction of chloramphenicol in aqueous solution by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process, *Journal of Environmental Management*, 133, 302.
- [47] Borowska, E., Felis, E., Miksch, K., 2015, Degradation of sulfamethoxazole using UV and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes, *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 18, 69.
- [48] De Souza Santos, L.V., Meireles, A.M., Lange, L.C., 2015, Degradation of antibiotics norfloxacin by Fenton, UV and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, *Journal of Environmental Management*, 154, 8.
- [49] Dogan, S., Kidak, R., 2016, A plug flow reactor model for UV-based oxidation of

- [66] Adak, A., Das, I., Mondal, B., Koner, S., Datta, P., Blaney, L., 2019, Degradation of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid by UV 253.7 and UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Reaction kinetics and effects of interfering substances, *Emerging Contaminants*, 5, 53.
- [67] Angeli, S., Adams, E., Masceno, G.P., Lima, R.M., Utzig, L.M., Rodrigues-Silva, F., Prola, L.D.T., Freitas, A.M., Liz, M.V., 2021, Toxicity assays of commercial Chlorpyrifos under UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UVC photolysis treatments, *Water, Air, & Soil Pollution*, 232, 353.
- [58] Shokri, R., Jalilzadeh Yengejeh, R., Babaei, A.A., Derikvand, E., Almasi, A., 2020, UV activation of hydrogen peroxide for removal of azithromycin antibiotic from aqueous solution: determination of optimum conditions by response surface methodology, *Toxin Reviews*, 39, 284.
- [59] Khorsandi, H., Teymori, M., Aghapour, A.A., Jafari, S.J., Taghipour, S., Bargeshadi, R., 2019, Photodegradation of ceftriaxone in aqueous solution by using UVC and UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidation processes, *Applied Water Science*, 9, 81.
- [60] Sierra, R.S.C., Zúñiga-Benítez, H., Peñuela, G.A., 2020, Experimental data on antibiotic cephalixin removal using hydrogen peroxide and simulated sunlight radiation at lab scale: Effects of pH and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, *Data in Brief*, 30, 105437.
- [61] Liu, X., Liu, Y., Lu, S., Wang, Z., Wang, Y., Zhang, G., Guo, X., Guo, W., Zhang, T., Xi, B., 2020, Degradation difference of ofloxacin and levofloxacin by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/PS (persulfate): Efficiency, factors and mechanism, *Chemical Engineering Journal*, 385, 123987.
- [62] Dong, W., Yang, C., Zhang, L., Su, Q., Zou, X., Xu, W., Gao, X., Xie, K., Wang, W., 2021, Highly efficient UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> technology for the removal of nifedipine antibiotics: Kinetics, co-existing anions and degradation pathways, *Chemical Engineering Journal*, 16, e0258483.
- [63] Daneshvar, N., Zorriyeh Asghar, Y., Behnajady, M.A., 2007, Photooxidative degradation of 4-nitrophenol (4-NP) in UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process: Influence of operational parameters and reaction mechanism, *Journal of Hazardous Materials*, 139, 275.
- [64] Lee, Y.-M., Lee, G., Zoh, K.-D., 2021, Benzophenone-3 degradation via UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/persulfate reactions, *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123591.
- [65] Lopez-Alvarez, B., Villegas-Guzman, P., Peñuela, G.A., Torres-Palma, R.A., 2016, Degradation of a toxic mixture of the pesticides carbofuran and iprodione by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Evaluation of parameters and implications of the degradation pathways on the synergistic effects, *Water, Air, & Soil Pollution*, 227, 215.

“Review article”

## **A review of new methods of removing environmental pollutants: Photolysis and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes**

**Removal of pollutants by photolysis and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes**

**Hamed Eskandarloo\***

Department of Chemistry, University of La Verne, Los Angeles, California, USA

\*Corresponding author: heskandarloo@laverne.edu

(Received: 13 August 2023, Accepted: 9 October 2023)

### **Abstract**

Organic contaminants, such as dye pollutants, pharmaceutical compounds, pesticides, etc. are increasingly found in water sources, and therefore need to be controlled by modern water treatment technologies. Advanced oxidation processes are often used as an effective method to remove organic contaminants. UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process has shown acceptable results for removing a wide range of mentioned pollutants. In this paper, the efficiency of photolysis and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes in removing organic contaminants were reviewed, and then, the significant results obtained were reported.

**Conflict of interest:** None declared.

**Keywords:** Photolysis, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Dye pollutants, Pharmaceutical pollutants