

بررسی تجربی کارایی حذف آلاینده‌های شیرابه پسماند با استفاده از فرآیندهای H_2O_2 و UV/O_3

صادق معتقد، امیرحسام حسنی^{*}، سید علیرضا حاجی سید میرزاحسینی، مسعود منوری و نبی‌الله منصوری

گروه مهندسی محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶

چکیده

شیرابه پسماند، حاوی مواد آلی چالش برانگیز بوده و نگرانی‌های زیست محیطی قابل توجهی را به همراه دارد. با توجه به عدم کارایی کامل تصفیه زیستی و فیزیکی و شیمیایی، فرآیندهای اکسایش پیشرفته (AOPs) به عنوان یک روش مناسب و موثر برای تصفیه شیرابه مطرح شده‌اند. در این تحقیق، مطالعه تجربی بر روی شیرابه زباله شهر آغاچاری در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده است. روش‌های مورد استفاده شامل فرآیندهای فرابنفش و ازن با هیدروژن پراکسید بود. در ابتدا شرایط بهینه برای O_3 (ازن) و H_2O_2 (پراکسید هیدروژن) فراهم شد. سپس تاثیر روش‌های اکسایش پیشرفته از جمله (UV/O_3 ، UV/H_2O_2 ، O_3/H_2O_2) در زمان‌های مختلف و اثر pH (قدرت تولید هیدروژن) بر حذف (کل کربن آلی) TOC، (اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی) BOD و (اکسیژن خواهی شیمیایی) COD مورد بررسی قرار گرفت. در فرآیند (پرتو فرابنفش) UV، انرژی فوتون‌ها باعث تحریک مولکول‌های H_2O_2 و تولید رادیکال‌های هیدروکسیل شد. در فرآیند O_3 ، ازن به تنهایی یا با H_2O_2 ، به تجزیه ترکیبات آلی و آلاینده‌ها می‌پردازد. در هر دو مورد، رادیکال‌های هیدروکسیل به شدت واکنش‌پذیر هستند و آلاینده‌ها را اکسید کرده و از بین می‌برند اما ازن به همراه هیدروژن پراکسید واکنش داده و رادیکال‌های بیشتری تولید کرده که باعث حذف سریع‌تر آلاینده‌ها شد. روش‌های اکسایش پیشرفته UV/H_2O_2 و H_2O_2/O_3 در مقایسه با هم تفاوت معنی‌داری را نشان دادند. فرآیند H_2O_2/O_3 حذف TOC (۱/۹۰٪ در ۲۰ min) را در مقایسه با H_2O_2/UV (۳/۸۵٪ در ۸۰ min) نشان داد. علاوه بر این، در فرآیند H_2O_2/O_3 بیشترین درصد حذف TOC (۷۶٪) و BOD (۳/۶۶٪) در مقایسه با UV/H_2O_2 ، (۳۳/۵۶٪ BOD و ۳۵/۴۶٪ TOC) را نشان داد. هر دو فرآیند در pH=۸ نتایج بهینه را ارائه دادند. آزمایش‌های UV/H_2O_2 نشان داد که زمان بهینه پرتو دهی ۸۰ min است. البته اثر pH بر حذف آلاینده‌ها در محدوده (۱۲-۲) مورد بررسی قرار گرفت که فرآیندهای UV/H_2O_2 در pH=۸ و O_3/H_2O_2 در pH=۱۰ حداکثر حذف آلاینده‌گی را داشته‌اند. فرآیند H_2O_2/O_3 بازده حذف بهتری نسبت به فرآیند H_2O_2/UV بر روی حذف BOD، COD و TOC نشان داد. با توجه به حضور هم زمان اکسندهای متعدد و اثر تشدیدکنندگی آن‌ها از طریق تولید رادیکال‌های فعال هیدروکسیل (OH) می‌توان نتیجه گرفت که UV/O_3 کارآمدترین روش تصفیه شیرابه است.

کلمات کلیدی: تجزیه شیمیایی، O_3 ، شیرابه، BOD، COD

*مسئول مکاتبات

ahesam.hassani@gmail.com

آدرس الکترونیکی

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2025.5521.3455)

مقدمه

آلودگی شیرابه به دلیل عدم وجود فناوری‌های مقرون به صرفه تصفیه و استانداردهای دفع، یکی از مشکلات عمده بهداشت محیطی در اکثر کشورهای در حال توسعه است [۱]. آلودگی شیرابه به افزایش تولید زباله جامد شهری در بیشتر کشورها نسبت داده می‌شود که منجر به تولید جهانی ۲/۲ میلیارد تن زباله در سال می‌شود [۲]. برخلاف تأسیسات تخصصی دفع زباله جامد، مانند زباله‌سوز [۳] و کارخانه‌های بازیافت [۴]، محل دفن زباله مهندسی شده به عنوان مناسب‌ترین بازار برای مدیریت پسماند [۵] تلقی می‌شوند. این مشکل به علت توانایی محل‌های دفن زباله در دریافت حجم زیادی از زباله‌ها و به حداقل رساندن آلودگی آب‌های زیرزمینی و سطحی از جمله انتشارات هوا است [۶]. به همین دلیل، اکثر کشورها در سراسر جهان به ویژه چین (۲/۵۴٪) و اتحادیه اروپا (۲۳٪) از محل‌های دفن زباله برای دفع پسماند خود استفاده می‌کنند [۷]. میزان آلودگی شیرابه محل دفن زباله با COD و BOD مشخص می‌شود. آلودگی‌ها اغلب شامل غلظت‌های بالای آلاینده‌های آلی، فلزات سنگین، مواد سمی، آمونیاک، مواد معدنی و علاوه بر ترکیبات مقاوم مانند مواد هیومیک است [۸]. خصوصیات شیرابه زباله بسته به روند تخریب اقلیم، شرایط هیدرولوژیکی و سن دفن زباله متفاوت است. آلودگی اکولوژیکی و مسائل بهداشتی معمولاً به تصفیه ناکافی شیرابه مرتبط است [۹].

کاهش پتانسیل خطر برای محیط‌زیست و سلامت انسان یک نگرانی جدی در مسئله دفن رو باز و دفن بهداشتی است [۱۰] و مدیریت شیرابه به طور مؤثر یک چالش مهم در دفع زباله به ویژه در عملیات دفن زباله محسوب می‌شود. اثر متقابل فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی در دفن زباله، همراه با نفوذ آب و رطوبت اولیه زباله، منجر به تشکیل شیرابه، یک مایع تیره و غلیظ حاوی زباله‌های آلی مضر، می‌شود [۱۱].

روش‌های مرسوم تصفیه شیرابه اغلب دارای محدودیت‌هایی هستند و نمی‌توانند آلودگی شیرابه را به میزان استاندارد کاهش دهند [۱۲]. به همین دلیل، تحقیقات زیادی برای توسعه روش‌های مؤثر برای تصفیه شیرابه پسماند انجام شده است. در حالی که انواع فناوری‌های تصفیه شامل روش‌های زیستی، شیمیایی و فیزیکی، علی‌رغم پیچیدگی ترکیب شیرابه و ضرورت رعایت استانداردهای کیفی جهت تخلیه مستقیم به آب سطحی را میسر می‌سازد [۱۴ و ۱۳].

منابع تولید شیرابه عبارتند از: بارندگی، آب زیرزمینی و آب سطحی، ذخیره مواد مرطوب، تبخیر، آبکافت و تجزیه ترکیبات زیستی آلی درون محل دفن زباله [۱۵]. ترکیب شیرابه از فرآیندهای بیوشیمیایی موجود در محل دفن زباله، با اسیدهای چرب فرار آلی و دیگر مولکول‌های کوچک که در طول زمان تجزیه می‌شوند، تأثیر می‌پذیرد، در حالی که ترکیبات پایدارتری مانند فولیک اسید و مواد هیومیک باقی می‌مانند [۱۶ و ۱۷]. ویژگی‌های شیرابه بسته به منطقه متفاوت است و محل دفن پسماند با مقادیر بالای BOD، COD، شوری، سختی، نیتروژن، آمونیاک و مقادیر نسبتاً پایین فلزات سنگین، مشخص می‌شوند [۱۸].

در سال‌های اخیر استفاده از فرآیندهای اکسایش پیشرفته، رشد چشمگیری داشته است. به طور کلی، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته در برگیرنده کلیه فرآیندهایی است که در آن‌ها رادیکال فعال هیدروکسیل تولید می‌شوند [۱۹]. با توجه به اینکه رادیکال هیدروکسیل از قدرت اکسیداسیون بالایی برخوردار است. این مسئله می‌تواند باعث حذف بسیاری از آلاینده‌ها گردد. در مقالات تحقیقاتی، مکانیسم‌های متفاوتی برای فرآیندهای اکسیداسیون نوری از جمله UV/H_2O_2 ارائه شده است، که با تصفیه موفق شیرابه با استفاده از سامانه ترکیبی متشکل از فرآیندهای زیستی و فیزیکی شیمیایی

در مطالعه پیش رو استفاده از فرآیندهای پرتو فرابنفش و ازن با پراکسید هیدروژن در کاهش میزان آلایندگی شیرابه ناشی از پسماند حوزه آغاجاری مد نظر قرار گرفته است. همچنین در خصوص شیرابه زباله منطقه مذکور، سوابقی از مطالعه وجود ندارد و برای اولین بار مورد تحقیق قرار گرفته است. انتخاب دو روش مذکور جهت انجام مطالعات بنیادی، بررسی و کسب نتایج مفید در زمینه تصفیه شیرابه در این منطقه است. همچنین، این بررسی درک بهتری از فناوری‌های مقرون به صرفه را ارائه می‌دهد که می‌توانند به طور مؤثر برای تصفیه آلودگی شیرابه از محل‌های دفن زباله استفاده شود. دانش منتج از این مقاله می‌تواند اطلاعات لازم، جهت پیشگیری از سرایت آلودگی شیرابه به منابع آب، خاک و هوا را در اختیار خواننده قرار داده و در نتیجه از سلامتی محیط زیست و مردم محافظت کند.

مواد و روش‌ها

نمونه‌های شیرابه از محل دفن زباله آغاجاری جمع‌آوری شد. این نمونه‌ها برای آنالیز و بررسی تصفیه‌پذیری با H_2O_2/UV در بطری‌های پلی اتیلن نگهداری و برچسب گذاری شدند.

نمونه‌های شیرابه پایدار از محل دفن زباله با استفاده از مخازن ۲۰ L جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شدند. پس از انتقال، نمونه‌ها در دمای $4^\circ C$ نگهداری شدند تا واکنش‌های زیستی و شیمیایی به حداقل برسد. سپس آزمایش‌ها بر روی ۲۰ L از این نمونه‌ها انجام شد. قبل از انجام آزمایش، به نمونه‌ها جهت جدا کردن سایر مواد قابل رسوب، پیش انعقاد اضافه شد. فرآیند پیش انعقاد شامل کاهش pH بوده و در یک رآکتور استوانه‌ای ۱/۵ L با تأمین پیوسته گاز ازن انجام شده است.

نمونه‌های جمع‌آوری‌شده برای مدت زمان ۰ تا ۱۰۰ min با فواصل زمانی ۲۰ min، تحت فرآیند تصفیه H_2O_2/UV قرار گرفتند. منبع پرتو فرابنفش

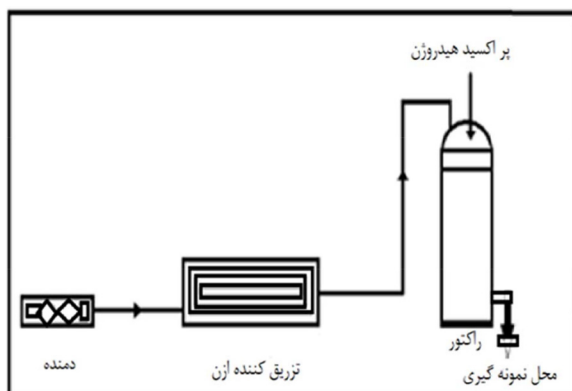
به روش‌های AOPs به دلیل کارایی بالای آن‌ها در تجزیه ترکیبات آلی مقاوم، همراه بوده است [۲۰]. در میان روش‌های پیشرفته تصفیه، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) به منظور تجزیه سریع آلاینده‌های مختلف موجود در شیرابه زباله جامد به عنوان روشی امیدوار کننده مطرح بوده است [۲۱]. با تولید رادیکال‌های هیدروکسیل، ماده آلی پایدار اکسید می‌شود و منجر به تخریب آلاینده‌ها و تولید محصولات جانبی بی‌خطر می‌شود، که به طور قابل توجهی عوامل زیست‌تخریب‌پذیری شیرابه را بهبود می‌بخشد و نشان‌دهنده پیشرفت حیاتی در فناوری تصفیه شیرابه است [۲۲].

مطالعات دیگری نشان داده‌اند که AOPs شامل تصفیه با استفاده از ازن و فرآیند UV/H_2O_2 می‌تواند به طور مؤثر آلودگی‌ها را از شیرابه‌های مختلف حذف نماید [۲۳]. انتخاب مناسب‌ترین فرآیند اکسیداسیون شیمیایی به عواملی مانند pH اولیه، دما و ترکیب خاص شیرابه بستگی دارد [۲۴]. در مجموع، AOPs راه حل موفق برای رفع چالش‌های مرتبط با تصفیه شیرابه پسماند ارائه می‌دهند که منجر به بهبود نتایج زیست‌محیطی و مدیریت پایدار پسماند می‌شود [۲۵].

بررسی‌های جدید بر روی کارایی این فرآیندها در مقیاس‌های آزمایشگاهی و صنعتی تمرکز دارند تا بتوانند بهینه‌ترین شرایط عملکردی را شناسایی کرده و کاربردهای عملی آن‌ها را گسترش دهند [۲۶]. مطالعه حاضر به بررسی تجربی و مقایسه کارایی فرآیندهای UV/O_3 و H_2O_2 در حذف آلاینده‌های موجود در شیرابه پرداخته است. هدف این تحقیق، یافتن شرایط بهینه برای هریک از این فرآیندها و ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف مانند زمان واکنش و pH بر میزان حذف شاخص‌های آلودگی نظیر COD، BOD، و TOC است [۲۷]. نتایج این مطالعه می‌تواند به توسعه روش‌های مؤثرتر برای تصفیه شیرابه و کاهش بار آلودگی آن‌ها کمک شایانی نماید.

(میزان جذب نور زیرسرخ) با طول موج حدود mm ۴/۲۶ توسط CO_2 اندازه‌گیری می‌شود.

بر مبنای این اندازه‌گیری‌ها نهایتاً غلظت کربن آلی تعیین می‌شود. pH محلول‌ها با استفاده از HCl و NaOH تنظیم شد و تمام آزمایش‌ها در دمای اتاق با سرعت جریان پیوسته ۲۸ L/h انجام شد. در مرحله دوم آزمایش‌ها، ازن به عنوان عامل اکسید کننده قوی برای کاهش BOD، COD و TOC در شیرابه استفاده شد. ازن با دبی $0.3 \text{ m}^3/\text{h}$ به داخل شیرابه پمپ شد و با شیرابه در حضور پراکسید هیدروژن (1 ml/L) وارد واکنش گردید تا رادیکال‌های هیدروکسیل، که توانایی حمله و ر شدن به مواد آلی را داشته باشد، تولید شود. به منظور بررسی تأثیر زمان بر کاهش غلظت آلاینده، فواصل زمانی مختلف (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ min) در نظر گرفته شد. نمونه‌ها، هر ۵ min یکبار از رآکتور گرفته شدند. راه‌اندازی تجربی با یک مولد ازن (فناوری ازن) آغاز گردید و ازن با یک جرقه الکتریکی در هوای خشک که از طریق یک لوله پلاستیکی متصل به رآکتور از آن عبور می‌کند ایجاد شد. شکل ۲ سامانه تزریق ازن در مقیاس آزمایشگاهی را نشان می‌دهد که در این تحقیق استفاده شده است. تعیین COD و BOD براساس روش‌های استاندارد انجام شد. معمولاً برای اندازه‌گیری غیرمستقیم تعداد ترکیبات آلی در شیرابه استفاده می‌شود.

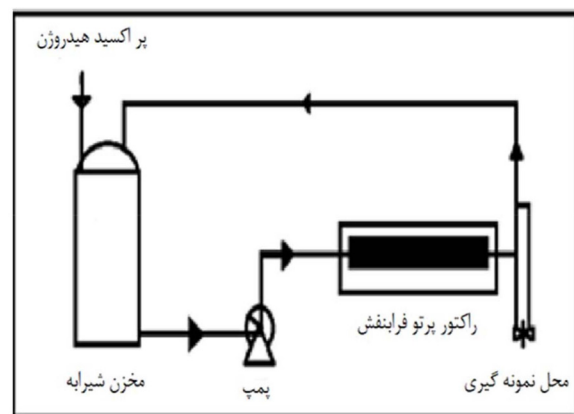


شکل ۲ شماتیک دستگاه تزریق $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$

مورد استفاده در آزمایش‌ها لامپ‌های فرابنفشی است که پرتوها را با طول موج nm ۲۵۴ و شدت و شدت 30 mw/cm^2 ساطع می‌کنند. روش‌های استاندارد برای ارزیابی پارامترهای کیفیت آب مانند COD، TOC، BOD و pH قبل و بعد از تصفیه با H_2O_2 ، UV، مورد استفاده قرار گرفتند. pH بر اساس روش متکف و ادی با استفاده از دستگاه pH متر مدل (Ac-cumet AP61) اندازه‌گیری شد [۲۸].

آزمایشات

در آزمایش‌های $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ از پراکسید هیدروژن (H_2O_2) با غلظت ۳٪ تولیدی سیگما - آلدريج استفاده شد. پرتولامپ فرابنفش با طول موج nm ۲۵۴ و شدت 30 mw/cm^2 برای تصفیه مورد استفاده قرار گرفت. برای آزمایش‌ها از یک سیستم آزمایشگاهی متشکل از یک مخزن تغذیه ۳ L و یک لامپ ۱۵ W فرابنفش استفاده شد. شکل ۱، سامانه تزریق $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ در مقیاس آزمایشگاهی را نشان می‌دهد که در این تحقیق استفاده شده است.



شکل ۱ شماتیک دستگاه تزریق $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$

نمونه‌ها با فواصل زمانی ۲۰ min از رآکتور گرفته شدند که شامل اندازه‌گیری COD با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی نوری با استفاده از دستگاه TOC ANALYZER با مدل HACH DR ۲۸۰۰ برند SHIMDZO بود و اندازه‌گیری CO_2 با دستگاه آشکارساز رسانندگی یا زیرسرخ ناپاشیده (NDIR) انجام شد. با آشکارساز رسانندگی، اختلاف رسانندگی نمونه قبل و بعد از اکسایش مواد آلی

انکوباسیون برای تیتراسیون روز صفر و تیتراسیون ۵ روزه استفاده شد. ۱ ml محلول $MgSO_4$ و ۱ ml آزید یددار قلیایی در بطری انکوباسیون اضافه شد. محلول اضافی زهکشی شد و به خوبی تکان داده شد تا جایی که در ته آن رسوب تشکیل شود. ۱ ml H_2SO_4 اضافه شد و خوب مخلوط شد. ۲۰ ml از این محلول در یک فلاسک تیتراسیون و ۲ تا ۵ قطره محلول نشاسته به عنوان شاخص اضافه شد. سپس محلول به دست آمده با محلول $Na_2S_2O_4$ ۰/۲۵ تیترا شد تا نقطه پایانی بی رنگ به دست آید. **جدول ۱** مشخصات شیرابه مورد بررسی را نشان می دهد.

جدول ۱ مشخصات شیرابه مورد بررسی

پارامتر	مقدار
pH	۸/۲-۸/۶
رنگ (PtCo)	۲/۱۷۳-۲/۵۷۲
BOD (mg/L)	۴۹۸-۵۴۶
COD (mg/L)	۳/۹۵۴-۴/۸۷۰
سختی کل (mg/L)	۶/۲۴۲-۶/۶۲۳

نتایج و بحث

عملکرد فرآیند H_2O_2/UV

اثر زمان مواجهه: سری اولیه آزمایش ها با هدف بررسی تأثیر زمان مواجهه با اشعه فرابنفش بر حذف COD، BOD و TOC از شیرابه در فرآیند اکسیداسیون پیشرفته (H_2O_2/UV) در **شکل ۴** نشان می دهد که درصد حذف TOC با زمان تابش اشعه فرابنفش به تدریج افزایش می یابد و در دقیقه ۶۰ از ۸۰٪ به ۳/۸۵٪ در ۸۰ min می رسد. همچنین درصد حذف COD و BOD به ترتیب ۵۶/۳۳ و ۳۵/۴۶٪ در ۱۰۰ به دست آمد. اثر هم افزایی پرتو فرابنفش و H_2O_2 منجر به ایجاد رادیکال های آزاد هیدروکسیل می شود که فرآیندهای تخریب را تسهیل می کند و تخریب آلاینده ها را به طور قابل توجهی افزایش می دهد [۲۹].

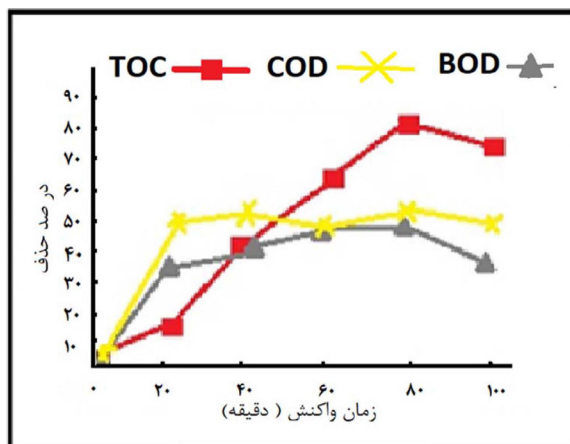
COD تعداد آلاینده های آلی موجود در آب های سطحی را تعیین می کند و COD به ابزار مفیدی برای اندازه گیری کیفیت آب تبدیل می شود. اندازه گیری COD بر اساس روش استاندارد کلوز رفلاکس با استفاده از یک راکتور HACH COD که در روش های استاندارد (انجمن سلامت عمومی آمریکا، ۲۰۰۵) شرح داده شده، انجام گرفته است. در ابتدا، راکتور رفلاکس HACH COD (DRB200) (شکل ۲) تا دما $150^{\circ}C$ گرم شد. سپس ۲ mL از نمونه فیلتر شده به ویال رفلاکس HACH (با معرف ۰/۰۷۵ نرمال محلول دی کرومات پتاسیم حاوی سولفات جیوه) اضافه شد. سپس ظرف درب ظرف مخلوط نمونه و معرف محکم بسته شد و در HACH DRB200 در دمای $150^{\circ}C$ به مدت دو ساعت جریان برگشت داده (رفلاکس) شد. پس از حرارت دادن، نمونه COD قبل از اندازه گیری با استفاده از طیفسنج نوری HACH DR 2800 در دمای اتاق خنک شد.



شکل ۳ طیفسنج نوری HACH COD (DRB200)

برای به دست آوردن BOD بر اساس روش استاندارد B ۵۲۱۰ بطری های شیرابه با ظرفیت ۳۰۰ ml و ۱ از هر نمونه شیرابه در یک بطری جداگانه گرفته شد. به هر نمونه ابتدا آب مقطر هوادهی شده از طریق منبع مکانیکی به مدت ۱۵ min اضافه شد سپس سولفات منیزیم، کلسیم کلرید و محلول بافر فسفات به میزان ۱ ml/L اضافه شدند. از بطری

۶ نشان می‌دهد که افزایش زمان واکنش با ازن در ابتدا باعث کاهش میزان آلودگی و در زمان ۲۰ min به حذف پایدار می‌رسد. متعاقباً حذف COD، BOD و TOC به ترتیب در ۱/۷۲٪، ۳/۶۶٪ و ۷۶٪ تثبیت شد. این تثبیت نشان دهنده اکسیداسیون جزئی ترکیبات آلی می‌باشد، که با مشاهدات قبلی بر کاهش آلودگی آلی ۷۰-۵۰٪ پس از ازن زنی دلالت دارد [۳۴]. علاوه بر این، فرایندهای اکسیداسیون ترکیبی شامل ازن و پراکسید هیدروژن نتایج امیدوار کننده‌ای را نشان داده‌اند که نسبت BOD/COD را از ۰/۱ به ۰/۵ افزایش می‌دهد [۳۵ و ۳۶].



شکل ۴ اثر زمان واکنش بر راندمان حذف COD، BOD و TOC با استفاده از H_2O_2/UV

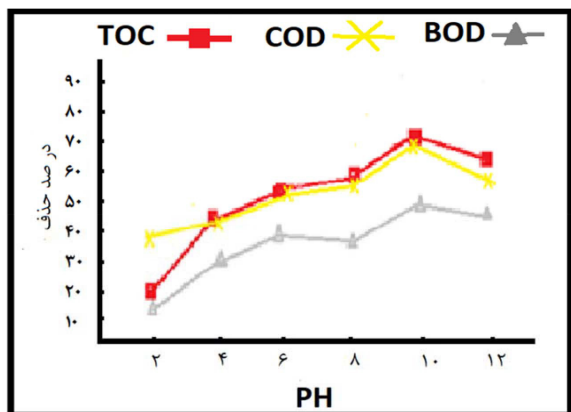
روچا و همکاران میزان حذف COD و TOC قابل‌توجهی را با استفاده از H_2O_2 تحت اشعه فرابنفش نشان دادند و بر نقش غلظت H_2O_2 در افزایش حذف COD تأکید کردند. علاوه بر این، ترکیب H_2O_2 با ازن راندمان حذف COD را از ۲۰٪ به ۴۰٪ افزایش داده، که نشان‌دهنده توانایی بالای اکسیداسیون پیشرفته است [۳۰].

اثر pH

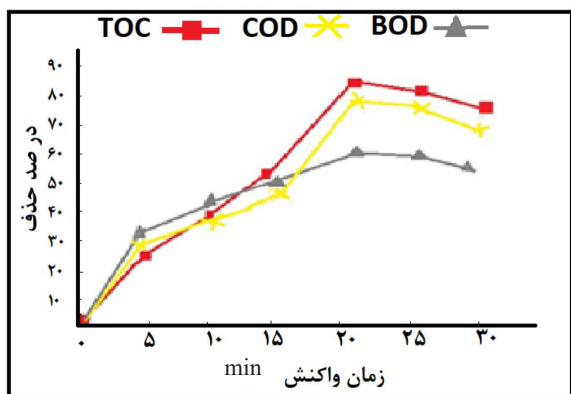
تأثیر pH بر راندمان حذف COD، BOD و TOC در محدوده pH (۲ تا ۱۲) در زمان بهینه پرتو دهی به مدت ۸۰ min بررسی شد. شکل ۵ نشان می‌دهد که افزایش pH از ۲ به ۱۲ منجر به افزایش قابل توجه حذف BOD (از ۲/۱۰٪ به ۴/۴۲٪)، TOC (از ۳/۱۸٪ به ۵/۵۹٪) و COD (از ۳/۳۳٪ به ۵/۵۳٪) شده است. این افزایش بازده حذف COD را می‌توان به دو عامل اصلی نسبت داد: افزایش تولید رادیکال‌های هیدروکسیل (OH^*) در سطوح pH بالاتر و اثر مهار آنیون‌های هیدروپراکسید (HO_2^*) بر رادیکال‌های هیدروکسیل [۳۱ و ۳۲]. این یافته با نتایج کاسارو و همکاران از نرخ تجزیه شیمیایی در شرایط قلیایی همخوانی دارد [۳۳].

عملکرد فرآیند H_2O_2/O_3 در زمان واکنش

اثر تماس شیرابه با ازن در زمان تماس با حذف COD، BOD و TOC مورد مطالعه قرار گرفت. شکل



شکل ۵ اثر pH بر راندمان حذف COD، BOD و TOC با استفاده از فرآیند UV/H_2O_2



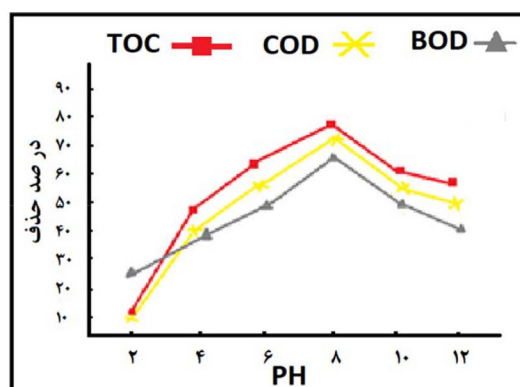
شکل ۶ اثر زمان واکنش بر راندمان حذف COD، BOD و TOC با استفاده از فرآیند O_3/H_2O_2

تأثیر pH

هیدروکسیل و نرخ نورکافت نسبت داد [۳۷].

با این حال، کاهش میزان حذف BOD در مقادیر بالای pH ممکن است ناشی از تغییرات مواد جامد معلق باشد که منجر به کاهش راندمان حذف COD نیز می‌شود [۳۸]. فرآیندهای اکسیداسیون شیمیایی منجر به خرد شدن ترکیبات آلی و تبدیل آنها به ترکیبات کوچک‌تر شد. میزان خطا در تکرار آزمایش‌ها کمتر از ۵٪ بود. همچنین، در جدول ۲، حذف آلاینده‌ها با تغییرات pH در دو روش UV/H_2O_2 و O_3/H_2O_2 نشان داده شده‌اند.

بازده فرآیند H_2O_2/O_3 در زمان بهینه واکنش ۲۰ min در محدوده pH بین ۲ تا ۱۲ ارزیابی شد. شکل ۷ نشان داد که pH=8 منجر به حذف BOD، COD و TOC به ترتیب ۷۳٪/۵۰٪/۳۰٪ و ۶۵٪ شد؛ و در pH بالاتر، یعنی بین ۱۰ تا ۱۲ میزان حذف کاهش یافت که علت آن تبدیل مواد جامد معلق به مواد محلول، توسط ازن بود. به دنبال آن، مواد جامد بزرگ به مولکول‌های کوچک‌تری تبدیل شدند. افزایش راندمان حذف در pH=8 را می‌توان به افزایش تجزیه مولکول‌ها تولیدی رادیکال‌های



شکل ۷ اثر pH بر راندمان حذف TOC، BOD و COD با استفاده از فرآیند O_3/H_2O_2

جدول ۲ حذف آلاینده‌ها با تغییرات pH در دو روش UV/H_2O_2 و O_3/H_2O_2

pH	حذف TOC (%)		حذف COD (%)		حذف BOD (%)	
	O_3/H_2O_2	UV/H_2O_2	O_3/H_2O_2	UV/H_2O_2	O_3/H_2O_2	UV/H_2O_2
۲	۱۲	۲۲	۸	۳۶	۲۵	۱۳
۴	۴۹	۴۵	۴۰	۴۳	۳۸	۳۲
۶	۶۴	۵۴	۵۶	۵۲	۵۰	۴۹
۸	۷۸	۵۹	۷۲	۵۴	۶۵	۳۷
۱۰	۶۲	۷۳	۵۰	۵۶	۴۸	۴۶
۱۲	۵۸	۶۳	۴۹	۶۸	۴۱	۴۵

کمک می‌کنند. در ادامه سازوکار عملکرد این فرآیندها به‌طور خلاصه توضیح داده می‌شود:

فرآیند UV/O_3

• تولید رادیکال‌های هیدروکسیل

در این فرآیند، اشعه فرابنفش با طول موج مناسب به ازن (O_3) تابیده می‌شود.

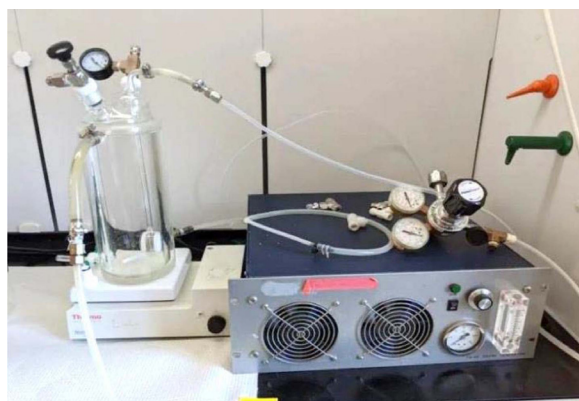
سازوکار عملکرد

حذف آلاینده‌های شیرابه محل دفن زباله با استفاده از فرآیندهای UV/O_3 و H_2O_2 بر اساس اصول اکسایش پیشرفته انجام می‌شود. این فرآیندها از طریق تولید رادیکال‌های هیدروکسیل ($OH^\bullet$) که دارای قدرت اکسایش بسیار بالا هستند، به تجزیه و حذف ترکیبات آلی و آلاینده‌های مقاوم در شیرابه

واکنش داده و آن‌ها را اکسید می‌کنند. غلظت H_2O_2 بهینه برای دستیابی به حداکثر درصد حذف میزان آلودگی می‌باشد.

• اکسیداسیون آلاینده‌ها

مشابه فرآیند UV/O_3 ، رادیکال‌های هیدروکسیل با آلاینده‌ها واکنش می‌دهند و از طریق شکستن پیوندهای شیمیایی مقاوم، ترکیبات پیچیده و آلاینده‌ها را به مواد ساده‌تری تجزیه می‌کنند که به راحتی از آب جدا می‌شوند. **اشکال ۷ و ۸** به ترتیب تصاویر دستگاه‌های پرتو افکنی ازن و فرابنفش در آزمایشگاه می‌باشند.



شکل ۸ دستگاه ازن زنی در آزمایشگاه

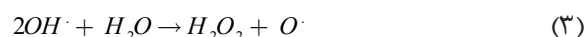
• ترکیب H_2O_2 و UV/O_3 افزایش کارایی

وقتی از فرآیند ترکیبی UV/O_3 و H_2O_2 استفاده می‌شود، تولید رادیکال‌های هیدروکسیل به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد و اکسیداسیون آلاینده‌ها با کارایی بیشتری انجام می‌شود. این روش ترکیبی به‌خصوص در تصفیه شیرابه‌های زباله که حاوی آلاینده‌های پیچیده و مقاوم هستند، بسیار مؤثر است [۴۲]. همچنین، در **شکل ۹** دستگاه آزمایشگاهی پرتو فرابنفش جهت تصفیه نمونه‌های به‌کارگرفته شده، مشاهده می‌شود.

• تشدید تخریب آلاینده‌ها

ترکیب UV ، O_3 و H_2O_2 نه تنها تولید رادیکال‌های هیدروکسیل را افزایش می‌دهد، بلکه به تخریب آلاینده‌هایی کمک می‌کند که به‌تنهایی با هر یک از این فرآیندها به‌طور کامل حذف نمی‌شوند.

این ترکیب باعث تجزیه ازن به رادیکال‌های اکسیژن ($O\cdot$) و سپس تولید رادیکال‌های هیدروکسیل ($OH\cdot$) می‌شود [۳۹]:



• اکسیداسیون آلاینده‌ها

رادیکال‌های هیدروکسیل به‌دست آمده، با آلاینده‌های آلی موجود در شیرابه واکنش می‌دهند و آن‌ها را به ترکیبات ساده‌تری مانند آب و دی‌اکسید کربن (CO_2) تجزیه می‌کنند. این واکنش‌ها عمدتاً با تخریب پیوندهای شیمیایی قوی در مولکول‌های آلاینده صورت می‌گیرد.

فرآیند H_2O_2

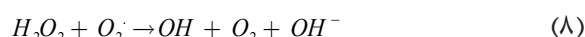
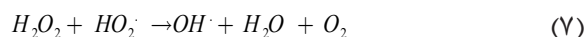
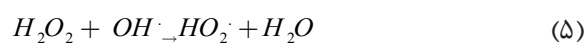
• تولید رادیکال‌های هیدروکسی

در این فرآیند، پراکسید هیدروژن (H_2O_2) به عنوان منبع رادیکال‌های هیدروکسیل استفاده می‌شود. در حضور کاتالیزور یا تحت تابش فرابنفش، H_2O_2 تجزیه شده و رادیکال‌های هیدروکسیل آزاد می‌شوند که در مقالات علمی سازوکارهای متفاوتی برای فرآیند UV/H_2O_2 به شرح ذیل آورده شده است [۴۰ و ۴۱]:

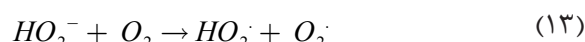
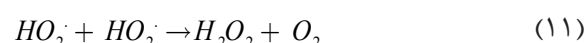
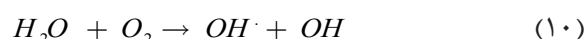
مرحله آغازین:



مرحله انتشار:



مرحله اختتام:



این رادیکال‌ها به دلیل فعالیت بسیار بالای خود، به‌طور مؤثر با آلاینده‌های موجود در شیرابه

نتیجه گیری

مقایسه روش های اکسیداسیون پیشرفته UV/H_2O_2 و H_2O_2/O_3 بیانگر تفاوت معنی داری در عملکرد آنها است. فرآیند H_2O_2/O_3 حذف TOC بیشتری را در مدت زمان کمتری ($1/90\%$ در 20 min) در مقایسه با UV/H_2O_2 ($3/85\%$ در 80 min) نشان داد. علاوه بر این، درصد حذف بیشتر BOD ($3/85\%$) و TOC (70%) را در مقایسه با UV/H_2O_2 با حذف $3/56\%$ BOD و 50% TOC نشان داد. هر دو فرآیند در $pH=8$ نتایج بهینه را ارائه دادند. تحقیقات آتی می تواند در مورد فرآیندهای ترکیبی UV/O_3 ، و بررسی اثر pH و سینتیک واکنش و حذف آلودگی ها باشد. در ادامه، امکان سنجی اقتصادی و ارزیابی اثرات زیست محیطی برای کاربرد عملی فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته در تصفیه شیرابه، در مقیاس بزرگ ضروری است. از این رو، استفاده از روش های $AOPs$ ، به ویژه ترکیب، در تصفیه آلاینده های آلی پایدار شیرابه، بهینه سازی بیشتر و تحقیقات گسترده تری برای افزایش کارایی و پایداری آنها در سناریوهای واقعی ضروری است. ضمناً میزان خطای در آزمایش های تکراری کمتر از 5% بود.



شکل ۹ دستگاه آزمایشگاهی پرتو فرابنفش جهت تصفیه نمونه ها

این فرآیند منجر به کاهش قابل توجه BOD ، COD و TOC در شیرابه می شود [۴۳].

• تشدید تخریب آلاینده ها

ترکیب O_3 ، UV و H_2O_2 نه تنها تولید رادیکال های هیدروکسیل را افزایش می دهد، بلکه به تخریب آلاینده هایی کمک می کند که به تنهایی با هر یک از این فرآیندها به طور کامل حذف نمی شوند. این فرآیند منجر به کاهش قابل توجه BOD ، COD و TOC در شیرابه می شود [۴۳].

به طور کلی، فرآیندهای UV/O_3 و H_2O_2 از طریق تولید و استفاده مؤثر از رادیکال های هیدروکسیل، می توانند ترکیبات آلی و آلاینده های مقاوم موجود در شیرابه محل دفن زباله را تجزیه و حذف کنند [۴۴ و ۴۵].

مراجع

- [1]. Mojiri, A., Aziz, H. A., Zaman, N. Q., Aziz, S. Q. & Zahed, M. A. (2016). (Metals removal from municipal landfill leachate and wastewater using adsorbents combined with biological method. *Desalin. Water Treat.* 57, 2819–2833. doi.org/10.1080/19443994.2014.983180.
- [2]. Mojiri, A., Ziyang, L., Hui, W., Ahmad, Z., Tajuddin, R. M., Abu Amr, S. S., Kindaichi, T., Aziz, H. A. & Farraji, H. (2017). (Concentrated landfill leachate treatment with a combined system including electro-ozonation and composite adsorbent augmented sequencing batch reactor process. *Process Saf. Environ. Manage.* 111, 253–262. doi.org/10.1016/j.psep.2017.07.013.
- [3]. Gotvajn, A. Z. & Pavko, A. (2018). (Perspectives on biological treatment of sanitary landfill leachate. In: *Wastewater Treatment Engineering* (M. Samer, ed.). IntechOpen, UK.
- [4]. Alzamora BR, Barros RTV. (2020) Review of municipal waste management charging methods in different countries. *Waste Manage.* 115:47–55.
- [5]. Baawain, M. S., Al-Mamun, A., Omidvarborna, H., Al-Mujaini, F., & Choudri, B. S. (2019). Residents' concerns and attitudes towards municipal solid waste management: opportunities for improved management. *International Journal of Environment and Waste Management*, 24(1), 93-106. doi.org/10.1504/IJEWM.2019.100663.
- [6]. Cetrulo, T. B., Marques, R. C., Cetrulo, N. M., Pinto, F. S., Moreira, R. M., Mendizábal-Cortés, A. D., & Malheiros, T. F. (2018). Effectiveness of solid waste policies in developing countries: A case study in Brazil. *Journal of cleaner production*, 205, 179-187. doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.094.

- [7]. Chen, D. M. C., Bodirsky, B. L., Krueger, T., Mishra, A., & Popp, A. (2020). The world's growing municipal solid waste: trends and impacts. *Environmental Research Letters*, 15(7), 074021.
- [8]. Yatsunthea T, Chaayat N.(2020). A very small power plant – Municipal waste of the organic Rankine cycle and incinerator from medical and municipal wastes. *Therm Sci Eng Progress* ,18:100555. doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100555.
- [9]. Botello- Alvarez JE, Rivas-García P, Fausto-Castro L, Estrada-Baltazar A, Gomez- Gonzalez R.(2018). Informal collection, recycling and export of valuable waste as transcendent factor in the municipal solid waste management: a Latin-American reality. *J Cleaner Prod* ,182:485–95. doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.065.
- [10]. Ozbay G, Jones M, Gadde M, Isah S, Attarwala T.(2021). Design and operation of effective landfills with minimal effects on the environment and human health. *J Environ Public Health* ,6921607. doi.org/10.1155/2021/6921607.
- [11]. Sauve G, Van Acker K.(2020). The environmental impacts of municipal solid waste landfills in Europe: a life cycle assessment of proper reference cases to support decision making. *J Environ Manage* ,261:110216. doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110216.
- [12]. Owusu-Nimo F, Oduro-Kwarteng S, Essandoh H, Wayo F, Shamudeen M. (2019). Characteristics and management of landfill solid waste in Kumasi, Ghana. *Sci Afr* ,3:e00052. doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00052.
- [13]. Zhou B, Sun C, Yi H.(2017). Solid waste disposal in chinese cities: an evaluation of local performance. *Sustainability* ,9. doi.org/10.3390/su9122234.
- [14]. Zamri, M. F. M. A., Kamaruddin, M. A., Yusoff, M. S. & Aziz, H. A. (2017). Semi-aerobic stabilized landfill leachate treatment by ion exchange resin: isotherm and kinetic study. *Appl. Water Sci*, 7, 581–590. doi.org/10.1007/s13201-015-0266-2.
- [15]. Chávez, R. P., Pizarro, E. C. C. & Galiano, Y. L. (2019). Landfill leachate treatment using activated carbon obtained from coffee waste. *Eng. Sanit. Ambient.* 24, 8330842. doi.org/10.1590/S1413-41522019178655.
- [16]. Eggen, T., Moeder, M. & Arukwe, A.)2019.(Municipal landfill leachates: a significant source for new and emerging pollutants. *Sci. Total Environ.* 408 (21), 5147–5157. doi:10.1016/j.scitotenv.07.049.
- [17]. Xaypanya, P., Takemura, J., Chiemchaisri, C., Seingheng, H. & Tanchuling, M. A. N.)2018(Characterization of landfill leachates and sediments in major cities of Indochina peninsular countries – heavy metal partitioning in municipal solid waste leachate. *Environments* 5, 65. doi.org/10.3390/environments5060065.
- [18]. Hodaifa G.(2018). Treatment of Olive Oil Mill Wastewater by UV-Light and UV/H2O2 System. *Int J Green Technol*,1(1):46–53.
- [19]. Chen Y, Liu C, Nie J, Wu S, Wang D.(2014) .Removal of COD and decolorizing from landfill leachate by Fenton's reagent advanced oxidation. *Clean Technol Environ Policy*,16(1),189-93, doi: 10.1007/s10098-013-0627-1.
- [20]. Amouei A, Pouramir M, Asgharnia H, Mehdinia M, Shirmardi M, Fallah H, et al.. (2021) Evaluation of the efficiency of electrocoagulation process in removing cyanide, nitrate, turbidity, and chemical oxygen demand from landfill leachate. *Environ Health Eng Manag*,8(3),237-44, doi: 10.34172/ehem.2021.27.
- [21]. Ding X, Ai Z, Zhang L.(2021). Design of a visible light driven pPhoto-electrochemical/electro-Fenton coupling oxidation system for wastewater treatment. *J Hazard Mater*,239-240:233-40. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.08.070.
- [22]. Babaei S, Sabour MR, Moftakhari Anasori Movahed S.(2021). Combined landfill leachate treatment methods: an overview. *Environ Sci Pollut Res Int*,28(42):59594-607. doi: 10.1007/s11356-021-16358-0.
- [23]. Zazouli MA, Yousefi Z, Babanezhad E, Ala A. (2024).Evaluation of combined efficiency of conventional coagulationflocculation process with advanced oxidation process (sulfate-hydroxyl radical) in leachate treatment. *Environ Eng Res* ,29(3):230548. doi: 10.4491/eer.2023.548.
- [24]. Han M, Duan X, Cao G, Zhu S, Ho SH.(2020). Graphitic nitridecatalyzed advanced oxidation processes (AOPs) for landfill leachate treatment: a mini review. *Process Saf Environ Prot*,139:230-40. doi: 10.1016/j.psep.2020.04.046.
- [25]. Roudi, A. M., Akhlaghi, E., Chelliapan, S., Kaboli, A., Roudi, A. M., Aslani, H., & Selvam, S. B. (2015). Treatment of landfill leachate via Advanced Oxidation Process (AOPs)-A review. ISSN (Print): 0975-8585. URL: [http://rjpbcs.com/pdf/2015_6\(4\)/\[44\].pdf](http://rjpbcs.com/pdf/2015_6(4)/[44].pdf).
- [26]. Haapea P., Korhonen S., Tuhkanen T.(2021). Treatment of industrial landfill leachates by chemical and biological methods: ozonation, ozonation + hydrogen peroxide, hydrogen peroxide and biological posttreatment for ozonated water, *Ozone Science Engineering*, 24(5), 369-378. doi.org/10.1080/01919510208901627.
- [27]. Chys, M.; Oloibiri, V.A.; Audenaert, W.T.; Demeestere, K.; Van Hulle, S.W.(2015). Ozonation of biologically treated landfill leachate: Efficiency and insights in organic conversions. *Chem. Eng. J*, 277, 104–111. doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.099.
- [28]. METCALF, Leonard; EDDY, Harrison. Wastewater engineering. New York: McGraw-Hill, 2014.

- [29]. Sasirekha, P., Balaji, A. K., Amarnath, H., & Balasubramanian, A. L. (2018). Removal of oil and grease from wastewater by using natural adsorbent. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(10), 7246-8., 13(10), 7246-8.
- [30]. Rocha, E. M., Vilar, V. J., Fonseca, A., Saraiva, I., & Boaventura, R. A. (2011). Landfill leachate treatment by solar-driven AOPs. *Solar Energy*, 85(1), 46-56. doi.org/10.1016/j.solener.2010.11.001.
- [31]. Mierzwa, J. C., Subtil, E. L., & Hespanhol, I. (2012). UV/H₂O₂ process performance improvement by ultrafiltration and physicochemical clarification systems for industrial effluent pretreatment. *Revista Ambiente & Água*, 7, 31-40. doi.org/10.4136/ambi-agua.926.
- [32]. Biñ, A. K., & Sobera-Madej, S. (2012). Comparison of the advanced oxidation processes (UV, UV/H₂O₂ and O₃) for the removal of antibiotic substances during wastewater treatment. *Ozone: Science & Engineering*, 34(2), 136-139. doi.org/10.1080/01919512.2012.650130.
- [33]. Cesaro, A., Naddeo, V., & Belgiorno, V. (2013). Wastewater treatment by combination of advanced oxidation processes and conventional biological systems. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 4(8), 1-8. doi:10.4172/2155-6199.1000208.
- [34]. Gozan, M. (2014). Oil extraction from oil sludge and TPH elimination of solids/water by ozonation. *Energy and Environment Research*, 4(2), 22. ISSN 1927-0569 E-ISSN 1927-0577.
- [35]. Hodaifa, G., Agabo, C., Moya, A. J., Pacheco, R., & Mateo, S. (2015). Treatment of olive oil mill wastewater by UV-light and UV/H₂O₂ system. *International Journal of Green Technology*, 1, 46-53.
- [36]. da Silva, S. S., Chiavone-Filho, O., de Barros Neto, E. L., & Foletto, E. L. (2015). Oil removal from produced water by conjugation of flotation and photo-Fenton processes. *Journal of environmental management*, 147, 257-263. doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.08.021.
- [37]. Shutova, Y., Karna, B. L., Hambly, A. C., Lau, B., Henderson, R. K., & Le-Clech, P. (2016). Enhancing organic matter removal in desalination pretreatment systems by application of dissolved air flotation. *Desalination*, 383, 12-21. doi.org/10.1016/j.desal.2015.12.018.
- [38]. Aziz, H. A., AlGhuri, H. R., Alazaiza, M. Y. D., & Noor, A. F. M. (2021). Sequential treatment for stabilized landfill leachate by ozonation-adsorption and adsorption-ozonation methods. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(4), 861-870. doi:10.1007/s13762-020-02891-x.
- [39]. Ghime, D., Goru, P., Ojha, S., & Ghosh, P. (2019). Oxidative decolorization of a Malachite Green Oxalate dye through the Photochemical Advanced Oxidation Processes. URL: https://journal.gnest.org/sites/default/files/Submissions/gnest_03000/gnest_03000_published.pdf.
- [40]. Kurian, M. (2021). Advanced oxidation processes and nanomaterials-a review. *Cleaner Engineering and Technology*, 2, 100090. doi.org/10.1016/j.clet.2021.100090.
- [41]. Chong, M. N., Cho, Y. J., Poh, P. E., & Jin, B. (2015). Evaluation of Titanium dioxide photocatalytic technology for the treatment of reactive Black 5 dye in synthetic and real greywater effluents. *Journal of Cleaner Production*, 89, 196-202. doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.014.
- [42]. Murgolo, S., Petronella, F., Ciannarella, R., Comparelli, R., Agostiano, A., Curri, M. L., & Mascolo, G. (2015). UV and solar-based photocatalytic degradation of organic pollutants by nano-sized TiO₂ grown on carbon nanotubes. *Catalysis Today*, 240, 114-124. doi.org/10.1016/j.cattod.2014.04.021.
- [43]. Van, H. T., Nguyen, L. H., Hoang, T. K., Tran, T. P., Vo, A. T., Pham, T. T., & Nguyen, X. C. (2019). Using FeO-constituted iron slag wastes as heterogeneous catalyst for Fenton and ozonation processes to degrade Reactive Red 24 from aqueous solution. *Separation and Purification Technology*, 224, 431-442. doi.org/10.1016/j.seppur.2019.05.048.
- [44]. Wang, Y., Wang, Y., Yu, L., Wang, R., & Zhang, X. (2020). Highly effective microwave-induced catalytic degradation of Bisphenol A in aqueous solution using double-perovskite intercalated montmorillonite nanocomposite. Hien, N.T., Nguyen, L.H., Van, H.T., Nguyen, T.D., Nguyen, T.H.V., Chu, T.H.H., Nguyen, T.V., Trinh, V.T., Vu, X.H. and Aziz, K.H.H. (2020). Heterogeneous catalyst ozonation of Direct Black 22 from aqueous solution in the presence of metal slags originating from industrial solid wastes. *Separation and Purification Technology*, 233, 115961. doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115961.



Experimental Investigation of the Removal Efficiency of Two Advanced Oxidation Processes, UV/O₂ and UV/H₂O₂, in Treating Landfill Leachate

Sadegh Motaghd, Amir Hessam Hassani*, Seyed Alireza Hajiseyed Mirzahosseini, Seyed Masoud Monavari, Nabiallah Mansouri

Department of Natural Resources and Environment, SR, C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

ahhassani@srb.iau.ir

DOI: 10.22078/pr.2025.5521.3455

Received: August 25, 2024

Accepted: January 05, 2025

Introduction

Leachate pollution has become a critical environmental and public health issue, particularly in developing countries, owing to the absence of cost-effective treatment technologies and standardized disposal practices. The growing generation of municipal solid waste worldwide, estimated at 2.2 billion tons annually, has led to increased reliance on engineered landfills as the primary method for waste management. While landfills are effective in handling large volumes of waste and minimizing surface and groundwater contamination, they produce leachate—a highly contaminated liquid containing elevated levels of organic pollutants, heavy metals, ammonia, and persistent toxic compounds such as humic substances [1].

The composition and pollution level of landfill leachate, often characterized by high COD and BOD values, vary based on factors such as waste age, climate, and hydrological conditions. Moreover, inadequate leachate treatment poses significant risks to both ecological systems and public health. Conventional treatment methods, including biological, chemical, and physical processes, often fail to reduce leachate contamination to acceptable standards, mainly due to the complex and variable nature of leachate composition [2,3].

Recent years have seen a growing interest in advanced oxidation processes (AOPs) for leachate treatment.

Furthermore, AOPs are characterized by the production of highly reactive hydroxyl radicals, which exhibit strong oxidation potential and can effectively degrade a wide range of persistent organic pollutants. Among these, processes such as UV/H₂O₂ and O₃/H₂O₂ have shown promising results in breaking down recalcitrant compounds and improving overall treatment efficiency. The current study focuses on evaluating the effectiveness of various AOPs in the removal of key contaminants from landfill leachate, aiming to address the limitations of conventional treatment methods and contribute to safer waste management practices.

Materials and Methods

This experimental study was conducted on landfill leachate collected from the city of Aghajari. The research focused on evaluating the efficiency of advanced oxidation processes (AOPs) including UV/O₃, UV/H₂O₂, and O₃/H₂O₂ for leachate treatment in a laboratory-scale pilot setup. Initially, optimal conditions for ozone (O₃) and hydrogen peroxide (H₂O₂) dosing were determined. The effects of different AOPs, reaction times, and pH levels on the removal of total organic carbon (TOC), biochemical oxygen demand (BOD), and chemical oxygen demand (COD) were systematically investigated.

In the UV-based processes, ultraviolet irradiation was used to activate hydrogen peroxide, generating highly reactive hydroxyl radicals capable of degrading

organic pollutants. In the O_3 -based processes, ozone was applied either alone or in combination with H_2O_2 to enhance the oxidation of contaminants. The combination of ozone and hydrogen peroxide was particularly assessed for its ability to produce additional hydroxyl radicals, leading to more rapid and effective pollutant removal. All experiments were performed under controlled laboratory conditions, and the concentrations of TOC, BOD, and COD were measured before and after treatment to evaluate process efficiency. The influence of pH was examined across a wide range (2–12) to identify optimal operational parameters. Table 1: shows the characteristics of the leachate studied.

Table 1 Characteristics of the leachate studied.

Parameter	Amount
pH	8.2–8.6
Colour (PtCo)	2,173–2,572
BOD (mg/L)	498–546
COD (mg/L)	3,954–4,870
Total solids (mg/L)	6,424–6,623

Results and Discussion

Performance of the H_2O_2 /UV Process

The effect of irradiation time on the removal of BOD, COD, and TOC from landfill leachate using the H_2O_2 /UV advanced oxidation process was investigated. The findings demonstrated a progressive increase in TOC removal efficiency with prolonged irradiation time, achieving 85.3% after 80 minutes. However, COD and BOD removal efficiencies remained comparatively lower, reaching only 33.56% and 35.46%, respectively, after 100 minutes. In addition, the synergy between UV light and hydrogen peroxide led to the generation of hydroxyl radicals, significantly enhancing the degradation of organic pollutants. Previous studies have also confirmed the positive impact of increasing H_2O_2 concentration and combining it with ozone to further improve COD removal.

Effect of pH

The influence of pH (ranging from 2 to 12) on the removal efficiency was evaluated at the optimal irradiation time (80 minutes). Increasing pH from 2 to 12 resulted in marked improvements in BOD (from 10.2% to 42.4%), TOC (from 18.3% to 59%), and COD (from 33% to 53%) removal. This enhancement is attributed to increased hydroxyl radical production at higher pH and the effect of hydroperoxide anions.

Performance of the H_2O_2 / O_3 Process

The impact of reaction time on pollutant removal using the H_2O_2 / O_3 process was also examined. Also, the results demonstrated that prolonged contact time with ozone initially decreased contaminant concentrations,

which it stabilized after 20 minutes, achieving removal efficiencies of 72.1% for COD, 66.3% for BOD, and 76% for TOC. Moreover, this stabilization implies that partial oxidation of organic compounds occurred, aligning with prior studies reporting 50–70% organic reduction following ozonation. Furthermore, the combined use of ozone and hydrogen peroxide further improved the biodegradability of the leachate.

Effect of pH

At the optimal reaction time (20 minutes), the H_2O_2 / O_3 process achieved maximum removal efficiencies at pH 8: 50.73% (COD), 30.70% (BOD), and 65% (TOC). Higher pH values (10–12) decrease removal, likely due to the conversion of suspended solids into soluble forms and the breakdown of larger molecules into smaller ones. The enhanced efficiency observed at pH 8 is attributed to increased hydroxyl radical production and higher photolysis rates. The error margin in repeated experiments was less than 5%.

Comparative Results

Comparison of the two processes across different pH levels showed that the H_2O_2 / O_3 process exhibited consistently superior performance over H_2O_2 /UV in the removal of COD, BOD, and TOC. In addition, these findings highlight the superior efficiency of combined advanced oxidation processes, particularly at optimal pH and reaction times, for the effective treatment of landfill leachate. Also, the effect of pH on BOD, TOC, COD removal efficiency using UV/ H_2O_2 is shown in Fig. 1.

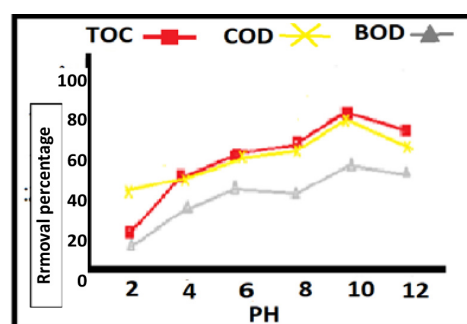


Fig. 1 Effect of pH on BOD, TOC, COD removal efficiency using UV/ H_2O_2 .

Conclusions

A significant difference was observed between the advanced oxidation processes UV/ H_2O_2 and H_2O_2 / O_3 . The H_2O_2 / O_3 process achieved a TOC removal of 90.1% within 20 minutes, compared to 85.3% in 80 minutes for the H_2O_2 /UV process. Furthermore, the H_2O_2 / O_3 process demonstrated superior removal efficiencies for BOD (85.3%) and TOC (70%) compared to the UV/ H_2O_2 process, which achieved only 56.3% and 50% removal, respectively. Moreover, both processes exhibited optimal performance at pH=8. Furthermore, future studies should focus on

hybrid treatment methods such as UV/O₃, along with a detailed investigation of pH effects, reaction kinetics, and contaminant removal mechanisms. Additionally, economic feasibility studies and environmental impact assessments are essential for the practical application of advanced oxidation processes in large-scale leachate treatment. Therefore, while AOPs-particularly combined systems-show great promise for the removal of persistent organic pollutants from leachate, further optimization and comprehensive studies are necessary to enhance their efficiency and sustainability under real-world conditions. Notably, the error margin in repeated experiments was less than 5%.

Nomenclatures

AOPs: Advanced oxidation processes
 BOD: Biochemical oxygen demand
 COD: Chemical Oxygen Demand
 TOC: Total Organic Carbon

References

1. Mojiri, A., Aziz, H. A., Zaman, N. Q., Aziz, S. Q. & Zahed, M. A.)2016a(.Metals removal from municipal landfill leachate and wastewater using adsorbents combined with biological method. Desalin. Water Treat, 57, 2819–2833. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.983180>.
2. Baawain MS, Al-Mamun A, Omidvarborna H, Al-Mujaini F, Choudri BS. Residents'.(2019) concerns and attitudes towards municipal solid waste management: opportunities for improved management. Int J Environ Waste Manage ,24: 93–106.
3. Cetrulo TB, Marques RC, Cetrulo NM, Pinto FS, Moreira RM, Mendiz'abal- Cort'es AD, et al. (2019).Effectiveness of solid waste policies in developing countries: a case study in Brazil. J Cleaner Prod , 205:179–87.