19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025
نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴
مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran
۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

ارزیابی آزمایشگاهی اثر هم‌افزایی در تصفیه پساب شرکت تراکتورسازی ایران با استفاده از فرآیند ترکیبی UV-H_2O_2/Ae-Bio

نادر بهلولی، یحیی جمال صادقی*، وحید محمدزاده
ایران تبریز شرکت تراکتورسازی ایران، آزمایشگاه شیمی و مواد(Ysadegi@gmail.com)

چکیده

در این پژوهش، به منظور تصفیه‌ی پساب واقعی شرکت تراکتورسازی ایران، سه فرآیند UV/H_2O_2، زیستی هوازی (Ae-Bio) و فرآیند ترکیبی UV/H_2O_2–Ae-Bio مورد بررسی قرار گرفت. پساب این صنعت حاوی مقادیر بالایی از ترکیبات آلی پایدار، روغن‌ها و فلزات سنگین بوده و روش‌های سنتی تصفیه، نظیر ته‌نشینی، جذب سطحی یا لخته‌سازی، توان حذف کامل آن‌ها را ندارند. در فرآیند UV/H_2O_2، با بهینه‌سازی pH، غلظت H_2O_2 و زمان واکنش، درصد حذف TOC برابر با ۵۸/۷۶٪ به‌دست آمد که نشان دهنده‌ی توان بالای این روش در تجزیه اولیه ترکیبات آلی پیچیده و افزایش زیست‌تخریب‌پذیری پساب است. فرآیند Ae-Bio نیز با استفاده از میکروارگانیسم‌های زنده توانست تصفیه‌ی پساب پیش‌تصفیه‌شده را انجام دهد، به‌طوری‌که در فرآیند ترکیبی، درصد حذف TOC به ۸۲/۹۹٪ رسید. این افزایش نشان می‌دهد که هم‌افزایی بین مرحله‌ی شیمیایی و زیستی، نقش مؤثری در کاهش آلاینده‌ها و بهبود کارایی سیستم دارد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده‌ی همزمان از روش‌های اکسایش پیشرفته و تصفیه زیستی، علاوه بر افزایش راندمان حذف، موجب کاهش اثرات سمی پساب و ارائه راهکاری پایدار برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی می‌شود.

کلید واژه: تصفیه فاضلاب صنعتی، فرآیند زیستی هوازی، اکسایش پیشرفته UV/H_2O_2، اثر هم‌افزایی

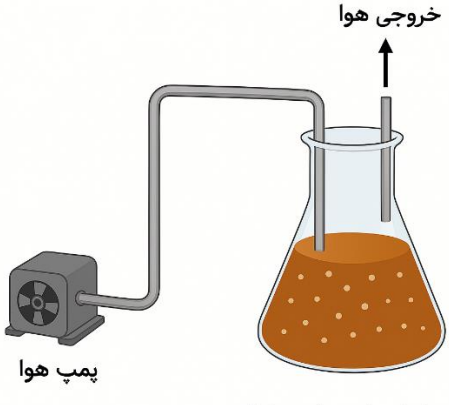
مقدمه

رشد سریع صنایع فلزی، خودروسازی و ماشین‌سازی در سال‌های اخیر، موجب افزایش تولید پساب‌هایی با ترکیب پیچیده و غلظت بالای آلاینده‌ها شده است. این پساب‌ها معمولاً حاوی مقادیر قابل توجهی از ترکیبات آلی آروماتیک، رنگزاها، روغن‌ها، مواد شوینده صنعتی و همچنین فلزات سنگین مانند سرب، مس، کروم، کادمیم و روی هستند. ورود چنین آلاینده‌هایی به محیط‌زیست می‌تواند منجر به آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی، تخریب زیستگاه‌های آبی، اختلال در چرخه‌های زیستی و تهدید سلامت انسان شود. ماهیت پایدار و غیرقابل‌تجزیه بسیاری از این ترکیبات موجب می‌شود که روش‌های مرسوم تصفیه فاضلاب، نظیر ته‌نشینی شیمیایی، جذب سطحی یا لخته‌سازی، قادر به حذف کامل آن‌ها نباشند و تنها بخشی از آلودگی را کاهش دهند. در نتیجه، توسعه و به‌کارگیری فناوری‌های نوین و کارآمد برای تصفیه این نوع پساب‌ها، به‌ویژه در صنایع سنگین و ماشین‌سازی به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است (Kato & Kansha, 2024). در میان روش‌های مختلف تصفیه، فرآیندهای زیستی به دلیل صرفه اقتصادی، سهولت بهره‌برداری و سازگاری با محیط‌زیست، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. فرآیند زیستی هوازی (Ae-Bio)یکی از روش‌های مؤثر در حذف ترکیبات آلی قابل‌تجزیه است که در آن، میکروارگانیسم‌ها از اکسیژن برای اکسیداسیون مواد آلی استفاده می‌کنند. با این حال، عملکرد این فرآیند در مواجهه با ترکیبات سمی یا دیرتجزیه شونده، مانند ترکیبات آروماتیک چند حلقه‌ای و برخی فلزات سنگین، محدود می‌شود؛ زیرا این ترکیبات می‌توانند موجب مهار فعالیت متابولیکی میکروارگانیسم‌ها شوند (Chandran et al., 2025). برای رفع این محدودیت، استفاده از فناوری‌های مکمل نظیر فرآیندهای اکسایش پیشرفته مورد توجه محققان قرار گرفته است (Singh et al., 2025). فرآیندهای اکسایش پیشرفته

شامل مجموعه‌ای از روش‌ها هستند که بر پایه تولید رادیکال‌های هیدروکسیل (•OH) با قدرت اکسیدکنندگی بالا عمل می‌کنند. این رادیکال‌ها قادرند پیوندهای شیمیایی قوی موجود در ترکیبات آلی را شکسته و آن‌ها را به ترکیبات ساده‌تر و زیست‌تخریب‌پذیرتر تبدیل کنند. یکی از پرکاربردترین این روش‌ها، فرآیند UV/H_2O_2 است که در آن تابش فرابنفش موجب تجزیه‌ی پراکسید هیدروژن و تولید رادیکال‌های آزاد می‌شود (Zhang et al., 2024). این فرآیند می‌تواند به عنوان مرحله‌ی پیش‌تصفیه برای افزایش زیست‌تخریب‌پذیری فاضلاب، یا به عنوان مرحله‌ی تکمیلی برای حذف نهایی آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گیرد. ترکیب فرآیندهای زیستی و اکسایش پیشرفته، با هدف بهره‌گیری از اثر هم‌افزایی به عنوان یک رویکرد نوین در تصفیه فاضلاب‌های صنعتی پیشنهاد شده است (Yu et al., 2025). در این روش، بخش شیمیایی موجب اکسیداسیون اولیه و کاهش پیچیدگی ترکیبات آلی می‌شود و در ادامه، فرآیند زیستی مسئول حذف نهایی آلاینده‌ها و تثبیت مواد تجزیه‌شده است. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که سیستم‌های ترکیبی، علاوه بر افزایش کارایی حذف مواد آلی و فلزات سنگین، می‌توانند مصرف مواد شیمیایی و تولید لجن را نیز کاهش دهند. با این حال، کارایی این ترکیب به نوع فاضلاب، غلظت آلاینده‌ها، نسبت مواد اکسنده و شرایط عملیاتی وابسته است (Abdelhaleem et al., 2024). در پژوهش حاضر، با هدف بررسی اثر هم‌افزایی حذف آلاینده‌ها، از ترکیب سیستم UV/H_2O_2 و فرآیند زیستی هوازی برای تصفیه پساب واقعی شرکت تراکتورسازی ایران استفاده شده است. این پساب به‌دلیل ماهیت پیچیده‌ی ترکیبات آلی و حضور فلزات سنگین، نمونه‌ای مناسب برای ارزیابی کارایی سیستم‌های ترکیبی محسوب می‌شود. در این مطالعه، عملکرد هر یک از فرآیندها به‌صورت جداگانه و ترکیبی بررسی و تغییرات شاخص کیفی فاضلاب از جمله TOC ارزیابی گردید. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند به بهبود طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های تصفیه ترکیبی در صنایع مشابه کمک کرده و راهکاری پایدار برای کاهش آلودگی ناشی از پساب‌های صنعتی ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از پساب واقعی شرکت تراکتورسازی ایران استفاده شد. این پساب حاوی ترکیبات آلی شامل آب‌صابون، انواع روغن‌های روان‌کننده و روغن‌های مصرف شده در فرآیند ساخت تراکتور و ادوات کشاورزی حاصل از مراحل مختلف تولید می‌باشد. برای انجام فرآیند تصفیه، از سیستمی مطابق با شکل (۱) به منظور ایجاد تماس مؤثر بین پساب و میکروارگانیسم‌های فعال استفاده شد.



شکل۱- شماتیک سیستم مورد استفاده برای برقراری تماس بین فاضلاب و باکتری‌ها

میکروارگانیسم‌های استفاده شده در این پژوهش از نوع کشت مخلوط بوده و از حوضچه لجن فعال شرکت پگاه تبریز استخراج گردید. در پژوهش حاضر از ۳ فرایند $UV\text{-}H_2O_2$ ، Ae-Bio و روش ترکیبی $UV\text{-}H_2O_2$/Ae-Bio برای تصفیه پساب خام استفاده شد.

فرآیند $UV\text{-}H_2O_2$

در بخش نخست این پژوهش، از فرآیند UV/H_2O_2 برای انجام تصفیه پساب واقعی خام استفاده شد. در آغاز ۵۰۰ میلی‌لیتر محلول حاوی پساب خام تهیه شد. این فرایند درpH، غلظت و زمان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در کل زمان آزمایش دمای محلول نیز در دمای محیط نگه داشته شد. از آب اکسیژنه (٪۳۵ H_2O_2) ساخت شرکت دکتر مجللی به نمونه پساب افزوده و محلول در معرض تابش اشعه فرابنفش (UV) از نوع تابش UVC (Philips, TUV 15W/G15T8) قرار گرفت. پس از اتمام فرآیند، مقادیر TOC و غلظت آلاینده‌های موجود در پساب واقعی شرکت تراکتورسازی در نمونه‌های تصفیه شده اندازه‌گیری شد.

فرآیند Ae-Bio

در بخش دوم این پژوهش، از فرآیند Ae-Bio برای تصفیه پساب واقعی شرکت تراکتورسازی ایران استفاده شد. به‌منظور سازگارسازی میکروارگانیسم‌ها با فاضلاب واقعی، طی ۵۷ روز غلظت‌های مختلفی از پساب به همراه سوبسترای کمکی و بافر فسفاتی به لجن فعال افزوده شد تا pH در مقدار ۷ حفظ شود. پس از مراحل تدریجی تماس با فاضلاب و اندازه‌گیری TOC، توده میکروبی سازگار شد. در ادامه، فرآیند Ae-Bio برای تصفیه اصلی طی ۹۶ ساعت با هوادهی متناوب در دمای محیط و شرایط تاریک انجام گرفت. نتایج نشان داد که مقدار TOC آلاینده در پساب خام واقعی برابر با ۲۵۱۹ mg/Lit بوده است. آزمایش نهایی به مدت ۴ روز بر روی دو گروه باکتری زنده و مرده انجام شد.

فرآیند $UV\text{-}H_2O_2$/ Ae-Bio

در این فرآیند، پساب خام واقعی که پیش‌تر به روش $UV–H_2O_2$ تصفیه شده بود، به عنوان ورودی فرآیند Ae-Bio مورد استفاده قرار گرفت. پیش از آغاز تصفیه زیستی، pH پساب پیش‌تصفیه شده با استفاده از محلول 0.1 مولار NaOH (تهیه‌شده از شرکت مجللی) بر روی مقدار ۷ تنظیم شد تا از بروز اثرات منفی بر فعالیت میکروارگانیسم‌ها جلوگیری شود. میکروارگانیسم‌های به‌کار رفته در این مرحله نیز، همانند مرحله پیشین، با پساب پیش‌تصفیه شده سازگار شدند. آزمایش مطابق روش قبل، به‌مدت ۴ روز و با استفاده از دو گروه باکتری در تماس مستقیم با پساب پیش‌تصفیه شده انجام گرفت.

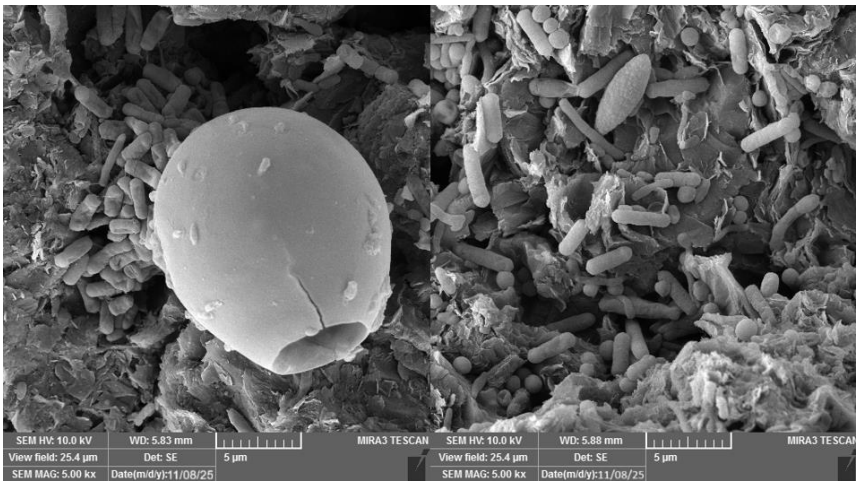
تصویربرداری SEM

به‌منظور تصویر برداری از میکروارگانیسم‌ها، از دستگاه SEM موجود در دانشگاه تبریز استفاده شد. در این فرآیند، قطعه‌ای از گرافیت با ابعاد ۱×۰/۵ سانتی‌متر مربع در محیط باکتری قرار گرفت تا بیوفیلم بر روی آن تشکیل شود. پس از رشد کامل، نمونه به مدت ۱۲ ساعت در محلول ۲۵ درصد گلوتارآلدهید جهت تثبیت سلولی قرار داده و سپس با اتانول ۹۶ درصد شست‌وشو داده شد و در پایان، به‌مدت ۲۴ ساعت در دستگاه فریزدرایر خشک گردید تا ساختار طبیعی سلول‌های باکتریایی حفظ شود.

نتایج و بحث

تصاویر SEM میکروارگانیسم‌ها

تصاویر SEM از سطح گرافیت پوشیده شده با بیوفیلم باکتریایی در شکل (۲) نمایش داده شده است.

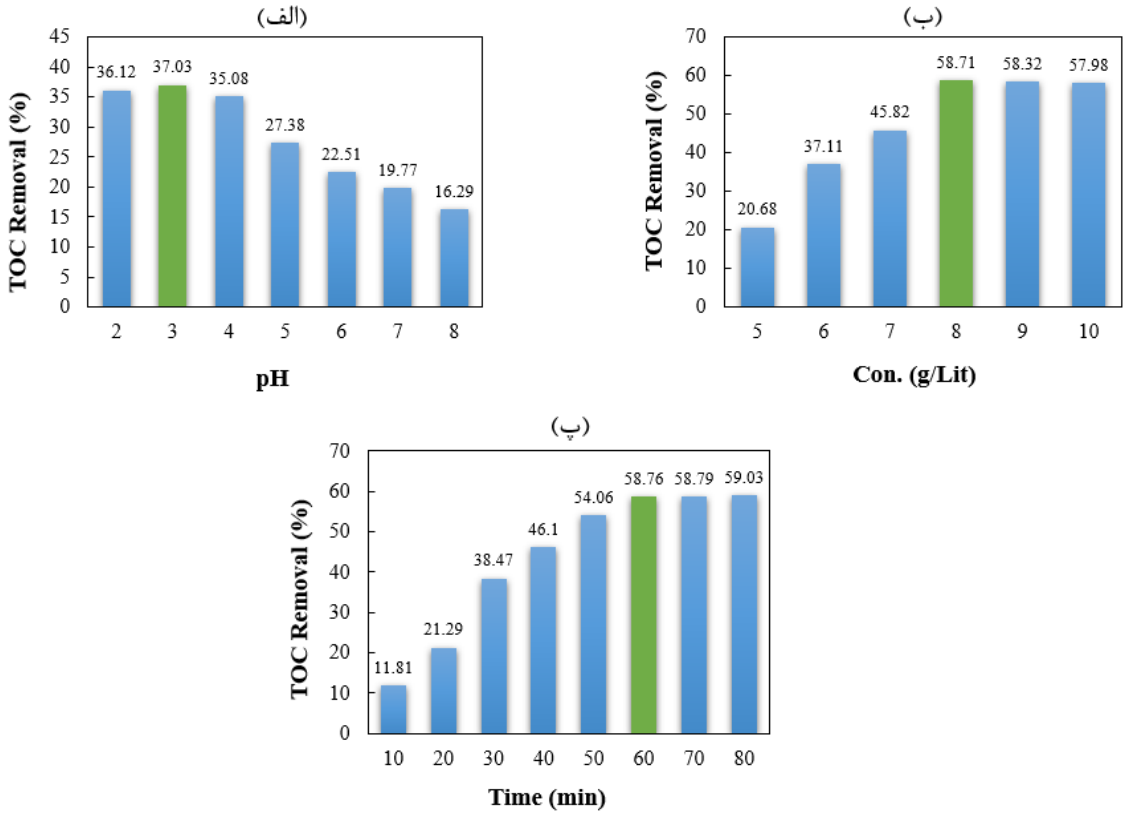


شکل۲-کشت مخلوط باکتری تشکیل شده روی سطح گرافیت.

همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، تفاوت در مورفولوژی باکتری‌ها بیانگر حضور گونه‌های مختلف و در نتیجه، تشکیل یک کشت مخلوط باکتریایی بر روی سطح گرافیت است.

تصفیه فاضلاب با استفاده از فرآیند $UV\text{-}H_2O_2$

در آغاز فرآیند تصفیه به روش UV/H_2O_2، به منظور تعیین شرایط بهینه از قبیل: pH، غلظت H_2O_2 و زمان واکنش مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین pH مناسب، غلظت پراکسید هیدروژن برابر با ۶ گرم بر لیتر در نظر گرفته شد و درصد حذف TOC در محدوده‌ی pH ۲ تا ۸ اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان دادند که در pH = ۳ بالاترین میزان حذف TOC، برابر با ۳۷/۳٪ حاصل شد. سپس در همین pH، غلظت‌های مختلف H_2O_2 بررسی گردید که در ۸ گرم بر لیتر بیشترین راندمان حذف TOC (۵۸/۷۱٪) به‌دست آمد. همچنین، برای تعیین زمان بهینه واکنش، فرآیند در بازه‌های زمانی ۱۰ تا ۸۰ دقیقه انجام شد که نتایج آن در شکل (۳-پ) ارائه شده است.

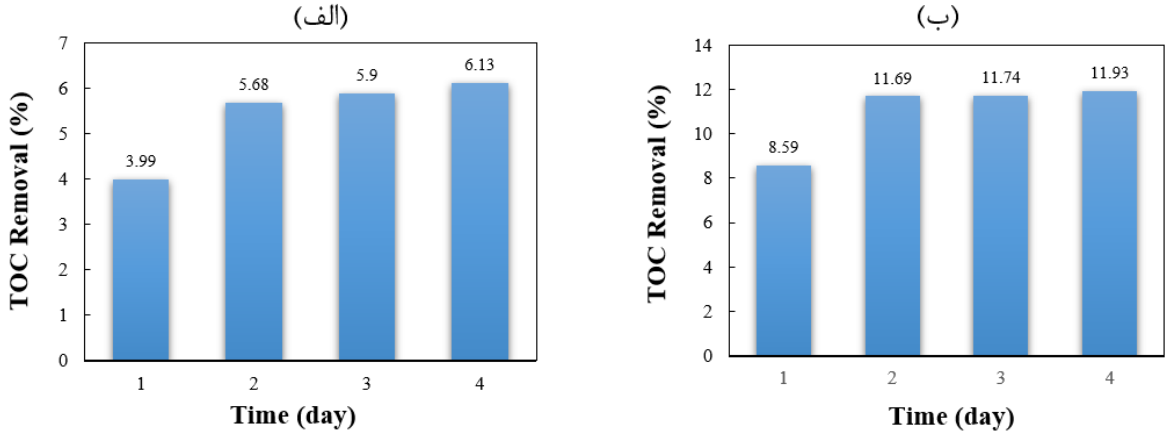


شکل۳- مربوط به تعیین شرایط بهینه برای پارامترهای (الف) pH، (ب) غلظت و (پ) زمان.

بر اساس نتایج به دست‌آمده در شکل (۳-الف)، فرآیند UV/H_2O_2 در ناحیه‌ی اسیدی بالاترین راندمان را نشان می‌دهد. با این حال، درpHهای کمتر از ۳، کنترل دقیق اسیدیته دشوار است، زیرا نیاز به مصرف مقدار زیادی اسید با غلظت بالا دارد. افزایش بیش ازحد غلظت اسید موجب بالا رفتن تراکم یون‌های H^+ می‌شود که در نتیجه، رادیکال‌های آزاد تولید شده به جای واکنش با آلاینده‌ها، با پروتون‌ها ترکیب می‌شوند و کارایی حذف کاهش می‌یابد (Zhong et al., 2024). همچنین با توجه به شکل (۳-ب) مشخص است، در غلظت‌های بالاتر از ۸ گرم بر لیتر از H_2O_2، درصد حذف TOC کاهش پیدا می‌کند. این پدیده احتمالاً به دلیل کاهش تولید مؤثر رادیکال‌های هیدروکسید و جذب رقابتی نور توسط پراکسید اضافی است. در بررسی اثر زمان واکنش که در شکل (۳-پ) آورده شده است، پس از ۶۰ دقیقه تغییر قابل توجهی در راندمان حذف رخ نمی‌دهد؛ از این‌رو، زمان بهینه‌ی فرآیند ۶۰ دقیقه در نظر گرفته شد تا تصفیه‌ی پساب خام در حداقل زمان ممکن انجام گیرد .در شرایط بهینه، میزان درصد حذف TOC به روش UV/H_2O_2 برابر با ۵۸/۷۶٪ درصد به‌دست آمد.

تصفیه فاضلاب با استفاده از فرآیند Ae-Bio

ابتدا میکروارگانیسم‌ها در ظرفی قرار داده شده و در دستگاه اتوکلاو با دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه استریل شدند تا پس از مرگ باکتری‌ها، اثر جذب سطحی آلاینده‌ها توسط باکتری‌های مرده در تماس با پساب خام مورد بررسی قرار گیرد. سپس، پساب خام با باکتری‌های زنده نیز تماس داده شد و نتایج حاصل در شکل (۴) ارائه شده است.

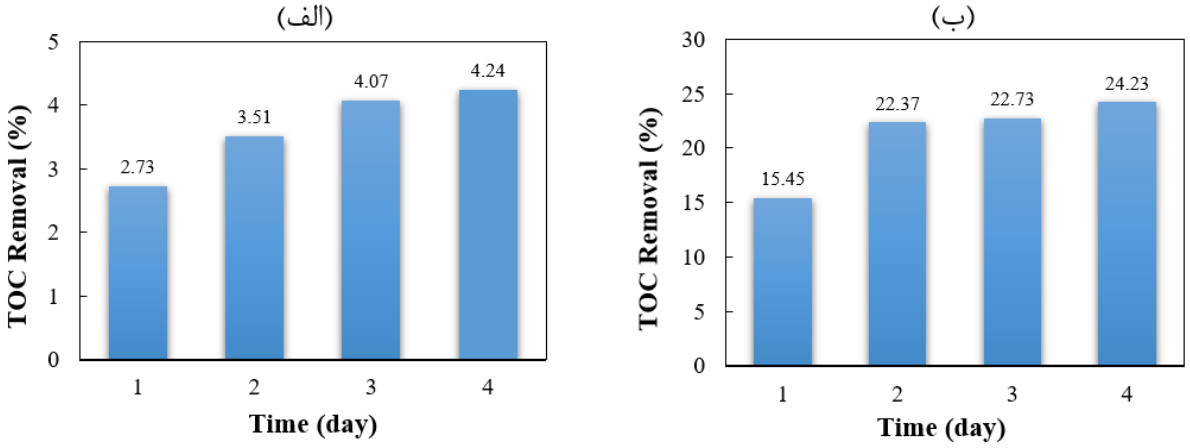


شکل۴- الگوی ستونی درصد حذف TOC از پساب خام در حضور دو گروه: (الف) باکتری‌های مرده و (ب) باکتری‌های زنده.

مطابق شکل (۴-الف)، پساب خام تنها به‌صورت جزئی بر سطح باکتری‌های مرده جذب شده است، به‌طوری‌که میزان درصد حذف TOC در حضور باکتری مرده ۶/۱۳٪ بوده که بیانگر وقوع جذب سطحی است. این موضوع نشان می‌دهد که به دلیل غلظت بالای آلاینده‌ها در پساب خام، میزان جذب سطحی نسبت به پساب پیش‌تصفیه شده (که دارای غلظت آلاینده کمتری است) کمتر بوده است. در شکل (۴-ب)، که در آن پساب خام در تماس با باکتری‌های زنده قرار گرفته، مشاهده می‌شود که درصد حذف TOC تا ۱۱/۹۳٪ افزایش یافته است؛ این افزایش نشان می‌دهد که علاوه بر جذب سطحی، فرآیند تصفیه زیستی نیز در حذف آلاینده‌ها نقش مؤثری داشته است.

تصفیه فاضلاب با استفاده از فرآیند ترکیبی UV-H_2O_2/ Ae-Bio

همانند روش تصفیه فاضلاب با استفاده از فرآیند Ae-Bio، اثر جذب سطحی و تصفیه پساب پیش‌تصفیه شده (خروجی پساب UV/H_2O_2) بر روی دو گروه باکتری زنده و مرده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده در شکل (۵) ارائه شده است.



شکل۵- الگوی ستونی درصد حذف TOC از پساب پیش تصفیه شده در حضور دو گروه: (الف) باکتری‌های مرده و (ب) باکتری‌های زنده.

مطابق شکل (۵-الف)، پساب پیش‌تصفیه شده ابتدا در تماس با باکتری‌های مرده قرار گرفت که میزان درصد حذف TOC برابر ۴/۲۴٪ به‌دست آمد. این مقدار نشان دهنده‌ی جذب سطحی محدود پساب پیش‌تصفیه شده بر سطح باکتری‌های مرده است.

کاهش میزان جذب سطحی نسبت به پساب خام می‌تواند ناشی از کاهش غلظت آلاینده‌ها در پساب پیش‌تصفیه شده می‌باشد. همچنین، با توجه به شکل (۵-ب)، هنگامی که این پساب در معرض باکتری‌های زنده قرار گرفت، درصد حذف TOC تا ۲۴/۲۳٪ افزایش یافت که نشان‌دهنده‌ی سهولت تصفیه زیستی پساب پیش‌تصفیه‌شده و کارایی بیشتر میکروارگانیسم‌ها در حذف آلاینده‌ها از محیطی با غلظت کمتر است.

نتیجه‌گیری

جدول۱- نتایج بدست آمده از روش های مختلف تصفیه.

$UV-H_2O_2$	تصفیه زیستی	$UV-H_2O_2$+ تصفیه زیستی	فرآیند ترکیبی $UV-H_2O_2$ و تصفیه زیستی	هم افزایی
٪۵۸/۷۶	٪۱۱/۹۳	٪۷۰/۶۹	٪۸۲/۹۹	٪۱۲/۳

نتایج پژوهش که در جدول (۱) آورده شده است، نشان داد که فرآیند UV/H_2O_2 به عنوان مرحله پیش‌تصفیه، پیچیدگی ترکیبات آلی پساب صنعتی را کاهش داده و زیست تخریب‌پذیری آن را افزایش می‌دهد، در حالی که فرآیند Ae-Bio توانایی قابل توجهی در حذف آلاینده‌ها دارد اما در مواجهه با ترکیبات سمی محدود است. استفاده از سیستم ترکیبی UV/H_2O_2–Ae-Bio اثر هم‌افزایی ایجاد کرده و میزان حذف TOC را تا ۸۲/۹۹٪ افزایش داد، به‌ویژه در پسابی که پیش‌تصفیه شده بود، تصفیه زیستی مؤثرتری حاصل شد. این مطالعه تأکید می‌کند که ترکیب اکسایش پیشرفته و فرآیند زیستی هوازی، رویکردی پایدار و اقتصادی برای تصفیه پساب‌های صنعتی با ترکیبات پیچیده فراهم می‌کند و نقش مهمی در کاهش آلودگی آب و حفاظت از محیط‌زیست ایفا می‌نماید.

فهرست منابع

Abdelhaleem, A., Aziz, F., Alalm, M. G., & Mahmoud, A. E. D. (2024). Hybrid Treatment Technologies for the Removal of Pharmaceuticals in Wastewater. In *Environmental Nexus Approach*. CRC Press.

Chandran, P., Suresh, S., Balasubramain, B., Gangwar, J., Raj, A. S., Aarathy, U. L., Meyyazhagan, A., Pappuswamy, M., & Sebastian, J. K. (2025). Biological treatment solutions using bioreactors for environmental contaminants from industrial waste water. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, *11*(2), 185–207. https://doi.org/10.1007/s43994-023-00071-4

Kato, S., & Kansha, Y. (2024). Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*(39), 51064–51097. https://doi.org/10.1007/s11356-024-34584-0

Singh, N. S. S., Jameel, R. K., Aldulaimi, A., Albadr, R. J., Taher, W. M., Alwan, M., Abilkasimov, A., Siddikov, R., Umarov, A., Smerat, A., & Diab, M. A. (2025). Dual-stage fenton–anaerobic treatment achieving complete elimination of diazinon and its toxic intermediates. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. https://doi.org/10.1007/s43153-025-00608-6

Yu, Q., Shen, G., Zhao, F., Fan, Y., Xue, H., Bao, Y., Ren, H., & Geng, J. (2025). Removal of mixed PhACs by combined UV/H_2O_2 and biologically activated carbon process: Toxicity assessment, transformation products and microbial community. *Journal of Environmental Management*, *373*, 123980. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123980

Zhang, J., Li, M., Liu, Z., Lian, J., Huang, Y., Sun, Z., & Qiang, Z. (2024). Polyacrylamide degradation in oil field wastewater by UV/H_2O_2 and UV/PDS: Rapid experimental measurement and model simulation. *Chemical Engineering Journal*, *485*, 149745. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149745

Zhong, M., Cao, L., Li, C., Xu, H., Li, Q., Fu, W., Lu, Y., Zhang, Y., Luo, X., & Liu, X. (2024). Ecological response mechanism of alkaline wastewater periphytic biofilms to pH alteration. *Journal of Water Process Engineering*, *68*, 106502. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106502