

The Post Treatment of Landfill Leachate with a Combination of Microwave and Persulfate Processes

Mohsen Haghparast¹, Nader Mokhtarani^{1, 2 *}, Parisa Nazary¹

1. Civil & Environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Modares Environmental Research Institute, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Abstract

Landfill leachate, a highly polluted wastewater, contains large amounts of organic and inorganic pollutants and requires effective treatment. This study investigated the efficiency of a novel advanced oxidation process utilising sulfate radicals for the post-treatment of landfill leachate. In this research, sulfate radicals were produced by activating persulfate ions with microwave radiation. To determine the optimal treatment conditions, we evaluated the effects of various parameters, including pH, temperature, microwave radiation power, sodium persulfate concentration, and reaction time, on the removal rates of colour and organic load, measured by the COD index. The results indicated that changes in the initial pH from 3 to 9 had no significant effect on the efficiency and performance of the process. However, an increase in temperature led to a notable rise in COD removal efficiency, from 11% at 40 °C to 81% at 95 °C. Additionally, raising the microwave radiation power from 160 W to 800 W resulted in significant improvements in process efficiency, COD removal efficiency, and energy transfer efficiency. A key finding of this study is the superiority of microwave radiation over conventional heating, enhancing the efficiency of organic load removal from the leachate. The maximum colour and COD removal efficiencies reached 100% and 88%, respectively, under optimal conditions of pH 9, a temperature of 80 °C, in the presence of 35 g/l sodium persulfate, a microwave radiation power of 640 W, and a reaction time of 4 hours. During the reaction, the medium became acidic, with pH decreasing from 9 to below 2 by the end of the reaction time, indicating persulfate activation and the advancement of relevant reactions. The findings of this study show that the efficiency of the landfill leachate treatment process using microwaves surpasses that of conventional heating, demonstrating that the Microwave-Persulfate process holds great potential for reducing the organic load and colour of the leachate.

Review History

Received: May 21, 2025
Revised: May 26, 2025
Accepted: Jul 22, 2025

Keywords

Leachate
Persulfate
Microwave
Integrated process
AOPs

* Corresponding Author Email: Mokhtarani@modares.ac.ir



تصفیه تکمیلی شیرابه مرکز دفن توسط فرایند تلفیقی میکروویو-پرسولفات

محسن حق پرست^۱، نادر مختارانی^{۲*}، پرینا نظری^۳

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲. دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۳. دانشجوی دکتری مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

شیرابه مراکز دفن پسماند، به عنوان فاضلابی بسیار آلوده حاوی مقادیر زیادی از آلاینده‌های آلی و غیرآلی بوده و نیازمند شیوه‌های موثر جهت تصفیه می‌باشد. روش‌های متعددی به منظور مدیریت و تصفیه شیرابه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش بررسی کارایی فرایند نوین اکسیداسیون پیشرفته با استفاده از رادیکال سولفات در تصفیه

تکمیلی شیرابه مرکز دفن مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور رادیکال‌های سولفات، از طریق فعالسازی یون پرسولفات با استفاده از تابش اشعه میکروویو تولید شد. جهت تعیین شرایط بهینه تصفیه، تأثیر پارامترهای مختلف شامل pH، دما، توان تابش اشعه میکروویو، غلظت اکسید کننده سدیم پرسولفات و زمان واکنش بر میزان حذف رنگ و بار آلی شیرابه با شاخص COD، در مقیاس آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده تغییرات pH اولیه در بازه ۳ تا ۹، تأثیر قابل توجهی بر راندمان و عملکرد فرایند نداشت. با این حال افزایش دما حین فرایند منجر به افزایش چشمگیر راندمان حذف COD از ۱۱٪ در ۴۰ درجه سانتی‌گراد تا ۸۱٪ در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد شد. همچنین، افزایش توان تابش اشعه میکروویو از ۱۶۰W به ۸۰۰W بهبود قابل ملاحظه‌ای بر کارایی فرایند، راندمان حذف COD و افزایش بازده انتقال انرژی به همراه داشت. نتایج این تحقیق همچنین نشان داد که استفاده از اشعه میکروویو به جای حرارت‌دهی عادی جهت گرم کردن باعث بهبود در بازده حذف بار آلی شیرابه می‌شود. در این پژوهش حداکثر راندمان حذف رنگ و COD به ترتیب به میزان ۱۰۰٪ و ۸۸٪ در شرایط بهینه pH=۹، دمای ۸۰°C، در حضور ۳۵g/L سدیم پرسولفات، توان تابش اشعه میکروویو به میزان ۶۴۰W و مدت زمان واکنش ۴ ساعت، حاصل شد. بر اساس نتایج حاصل فرایند میکروویو-پرسولفات دارای پتانسیل مناسب در کاهش بار آلی و رنگ شیرابه مرکز دفن پسماند می‌باشد.

کلمات کلیدی

شیرابه

میکروویو

پرسولفات

فرایند تلفیقی

اکسیداسیون پیشرفته

۱- مقدمه

سیر صعودی در رشد نرخ و سرانه تولید پسماند در جهان بشمار می‌رود (Fontaine و همکاران، ۲۰۲۵). از دیرباز تاکنون، روش‌های مختلفی برای مدیریت پسماندها مورد استفاده قرار گرفته که از مهم‌ترین آنها می‌توان به فرایندهای دفن، احتراق، کمپوست کردن،

گسترش صنایع، پیشرفت تکنولوژی و تغییر سبک زندگی، تولید انواع پسماند توسط بشر را به مشکلی روزافزون بدل کرده است. افزایش سطح رفاه و میزان جمعیت از جمله عوامل ایجاد

* رایانامه نویسنده مسئول: Mokhtarani@modares.ac.ir

هضم بی‌هوازی و بازیابی و بازیافت اشاره نمود.

دفن پسماند به دلیل هزینه پایین، رایج‌ترین روش دفع است. با این حال، آلودگی از طریق نفوذ شیرابه تولیدی به محیط یکی از آثار ناشی از مدیریت ضعیف این نوع مراکز بوده که زمینه‌ی تحقیقات محیط‌زیستی گسترده‌ای را در سالیان اخیر به خود اختصاص داده است (Seifi و همکاران، ۲۰۲۵). محل‌های دفن پسماند به دلیل دارا بودن ترکیبات متنوع شامل پسماندهای الکترونیکی، صنعتی، داروها، اقلام مراقبت شخصی و مواد شیمیایی مختل‌کننده غدد درون‌ریز، به عنوان مخازن آلاینده‌های نوظهور عمل می‌کنند (Das و همکاران، ۲۰۲۵). شیرابه مراکز دفن حاوی مقادیر زیادی از انواع ترکیبات آلی، نیتروژن آمونیاکی، فلزات سنگین، ترکیبات کلردار و نمک‌ها هستند (Xiang، ۲۰۲۵). عواملی از جمله طراحی محل دفن، نوع پسماند و شرایط محیطی بر تحرک و پایداری آلاینده‌ها و سموم تأثیرگذار بوده و باعث نفوذ آنها از طریق شیرابه به خاک‌های اطراف، آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی می‌شود (Das و همکاران، ۲۰۲۵). بنابراین شیرابه باید پیش از تخلیه به منابع پذیرنده، مورد تصفیه قرار گرفته و پارامترهای آلودگی آن به حد استانداردهای مربوطه تقلیل یابد. مشخصات شیرابه تولیدشده در مراکز دفن، تابع عوامل متعددی بوده که از مهم‌ترین آنها می‌توان به جنس و نوع پسماندهای دفن‌شده، طول عمر محل‌های دفن پسماند، فعالیت‌های بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی صورت گرفته در طول زمان، عوامل محیطی همچون آب و هوا و میزان بارش برف و باران، تکنیک‌های مدیریتی مورد استفاده و نوع پوشش مراکز دفن اشاره نمود (Seifi و همکاران، ۲۰۲۵).

امروزه روش‌های متعددی به منظور مدیریت و تصفیه شیرابه مورد استفاده قرار می‌گیرد. بازگردانی شیرابه روی مراکز دفن و همچنین انتقال شیرابه به تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری جهت استفاده از ظرفیت مازاد تصفیه، از روش‌های ارزان و آسان مدیریت شیرابه محسوب می‌شود (Mokhtarani و همکاران، ۲۰۱۲). از متداول‌ترین روش‌های تصفیه شیرابه نیز می‌توان به فرایندهایی چون جذب، جداسازی غشایی، شناورسازی، انعقاد و لخته‌سازی، تبادل یونی، ترسیب شیمیایی، اکسیداسیون شیمیایی، فرایند فنتون، ازن‌زنی، فرایندهای فوتوکاتالیستی، فرایند لجن فعال، راکتورهای ناپیوسته متوالی، راکتورهای بیولوژیکی چرخان، نیتریفیکاسیون و

دنیتریفیکاسیون، پتوی لجن بی‌هوازی با جریان رو به بالا (UASB)، گیاه‌پالایی و زیست‌پالایی اشاره نمود (Kurniawan و همکاران، ۲۰۲۵).

فرایندهای اکسیداسیون شیمیایی، در تصفیه شیرابه و فاضلاب‌های سخت تجزیه‌پذیر دارای کارایی مناسبی می‌باشند. در این شرایط، آلاینده‌ها به ترکیبات ساده‌تر با قابلیت تجزیه بیولوژیکی شکسته شده و یا با ترسیب و معدنی‌سازی به آب و دی‌اکسیدکربن تبدیل می‌شوند (Dai و همکاران، ۲۰۲۵). اگرچه بدین‌منظور از اکسیدکننده‌هایی همچون ترکیبات کلردار، ازن، پتاسیم پرمنگنات و کلسیم هیدروکسید در تصفیه شیمیایی شیرابه استفاده شده، اما در سال‌های اخیر تمرکز بر روی فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOP) بوده است (Nguyen، ۲۰۲۵). فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته با تولید رادیکال‌های هیدروکسیل و گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) تجزیه‌پذیری زیستی شیرابه را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشند. در فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته، کاربرد انواع اکسیدکننده‌ها (همچون ازن، پراکسید هیدروژن، پرسولفات) و ترکیب آنها با فرایندهایی همچون UV، امواج اولتراسونیک، امواج میکروویو و فلزات واسطه موجب تولید رادیکال‌های فعال در محیط و اکسیداسیون آلاینده‌ها می‌شود (Dhamorikar و همکاران، ۲۰۲۴).

یکی از اکسیدکننده‌های قدرتمند و متداول در فرایندهای AOP یون پرسولفات بوده که با تولید رادیکال‌های سولفات ($SO_4^{\bullet-}$) به عنوان اکسیدکننده‌ای قدرتمند، قادر به تجزیه ترکیبات آلی مقاوم و بهبود تجزیه‌پذیری زیستی شیرابه محل دفن پسماند می‌شود (Abdullah و همکاران، ۲۰۲۲). پتانسیل اکسیداسیون یون‌های پرسولفات برابر $2/017$ بوده، که در صورت فعالسازی قادر به تولید رادیکال‌های سولفات با توانایی تخریب و اکسیداسیون اغلب ترکیبات آلی، به دلیل پتانسیل اکسیداسیون $2/67$ می‌باشند (Chou و همکاران، ۲۰۱۳). مطالعه Chen و همکاران، نشان داد فرایند تلفیقی میکروویو-پرسولفات (MW/PS) به‌دلیل ایجاد رادیکال‌های سولفات ($SO_4^{\bullet-}$) توانایی بیشتری در تخریب آلاینده‌های آلی مقاوم در شیرابه بالغ نسبت به فرایند تلفیقی میکروویو-پراکسید هیدروژن (MW/H_2O_2) دارد که منجر به گستره وسیع‌تری از تخریب مواد آلی محلول (DOM) می‌شود (Chen.W و همکاران، ۲۰۲۰).

نتیجه حذف آلاینده می گردد (Shang و همکاران، ۲۰۲۳).

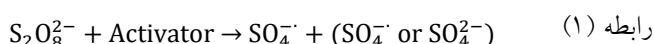


پرتو میکروویو طیفی از تابش های الکترومغناطیس بوده دارای فرکانسی در محدوده ۳۰۰MHz الی ۳۰۰GHz می باشند (Zhang و همکاران، ۲۰۲۵). از تابش میکروویو به منظور ایجاد حرارت در گونه ای خاص از مواد (مثلا مواد دارای خاصیت قطبی همچون آب) که به آن ها دی الکتریک اطلاق می شود استفاده می شود. ذرات دوقطبی در میدان الکترومغناطیسی حاصل از تابش امواج میکروویو چرخش و جهت گیری می کنند. میدان الکتریکی تولیدی در اثر تابش به طور مداوم در حال چرخش بوده، اما چرخش مولکول های دوقطبی هیچ گاه نمی تواند همگام با چرخش میدان الکتریکی ناشی از این امواج باشد. در نتیجه مقادیر بسیار زیادی از انرژی به خاطر همین تأخیر فاز، مصرف شده و به حرارت تبدیل می شود (Wang و همکاران، ۲۰۲۵). همچنین یک ویژگی مهم در حرارت دهی توسط میکروویو پدیده ایجاد نقاط داغ (Hotspots) است، ناحیه هایی با دمای بسیار بالا که به دلیل حرارت دهی غیریکنواخت ایجاد شده اند (Aziz و همکاران، ۲۰۲۵). دمای این نقاط در ماده جاذب می تواند بسیار بالاتر از سایر نقاط باشد (حتی بالاتر از ۱۰۰۰ درجه سلسیوس) که به علت این شرایط خاص دمایی، این فرایند پتانسیل بهبود حذف آلاینده های آلی را دارا می باشد (Liang و همکاران، ۲۰۲۵).

تصفیه مؤثر شیرابه محل دفن پسماند با استفاده از فرایند پراکسی دی سولفات فعال شده با اشعه میکروویو (MW/PDS) در دمای بالاتر از ۳۵۴ کلوین و توان تابشی ۵۵۰ وات گزارش شده است (Gu و همکاران، ۲۰۱۸). بر اساس مطالعات انجام شده تلفیق پراکسید هیدروژن با میکروویو (MW/H₂O₂) باعث تجزیه مواد آلی در شرایط اسیدی شده، در حالی که در هنگام تلفیق پرسولفات با میکروویو (MW/PS) تخریب شدید مواد آلی در طیف وسیعی از مقادیر pH اتفاق افتاده است (Chen.M و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین در تحقیقی دیگر تصفیه مؤثر شیرابه محل دفن پسماند در سیستم MW/PS با دما و توان تابشی به ترتیب برابر ۳۵۴ کلوین و ۵۵۰ وات گزارش شده است (Chen.G و همکاران، ۲۰۲۱).

فرایند اکسیداسیون پیشرفته با استفاده از پرسولفات تقویت شده با تابش امواج میکروویو و فعال شده با آهن-کربن (MW/Fe-C)

یون پرسولفات در دمای اتاق پایدار بوده و در اثر عوامل مختلفی همچون تفکیک حرارتی، فلزات واسطه، تابش اشعه ماوراءبنفش و روش های دیگر می تواند مطابق رابطه ۱ به رادیکال های سولفات تبدیل شود (Huang و همکاران، ۲۰۲۵). همچنین رادیکال های سولفات می توانند با مولکول های آب وارد واکنش شده و رادیکال هیدروکسیل را تولید نمایند (Wojnárovits و همکاران، ۲۰۲۴).



میزان مشارکت این دو نوع رادیکال در واکنش های حذف آلاینده وابسته به عوامل مختلفی از جمله pH محیط است. رادیکال سولفات از طریق پیوند هیدروژنی، اضافه شدن به پیوند دوگانه و انتقال الکترون قادر به واکنش با مواد آلی می باشد. همچنین پرسولفات قادر به واکنش مستقیم با ترکیبات آلی بوده و رادیکال سولفات و رادیکال های ترکیبات آلی را تولید می نماید. در این شرایط، راندمان حذف آلاینده وابسته به پیچیدگی ترکیبات آلی موجود، میزان توسعه زنجیره رادیکال ها و واکنش های نهایی می باشد (Mutke و همکاران، ۲۰۲۴).

تصفیه شیرابه به روش اکسیداسیون توسط پرسولفات به وسیله روش های مختلف فعال سازی مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور فعال سازی حرارتی (Chou و همکاران، ۲۰۱۵) و یا فرایندهای تلفیقی ازن-پرسولفات (Lavanya و همکاران، ۲۰۲۴؛ Soubh و Mokhtarani، ۲۰۱۶)، اولتراسونیک-پرسولفات (Kianian و همکاران، ۲۰۲۴) و پراکسید هیدروژن-پرسولفات (Liu و همکاران، ۲۰۲۵) در تحقیقات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

یکی از روش های متداول فعال سازی پرسولفات، استفاده از حرارت می باشد. پیوند پراکسید در یون پرسولفات در اثر دریافت انرژی حرارتی شکسته شده و مطابق رابطه ۲ به دو عدد رادیکال سولفات تبدیل می شود (Wang و همکاران، ۲۰۲۴). انرژی فعال سازی این واکنش در شرایط خنثی، بازی و اسیدی بترتیب در محدوده ۱۲۹-۱۱۹، ۱۳۹-۱۳۴ و ۱۱۶-۱۰۰ کیلوژول بر مول است (House، ۱۹۶۲). مطالعات انجام شده نشان می دهد که استفاده از تابش میکروویو به جای حرارت دهی متداول در فعال سازی پرسولفات، باعث انتقال سریع تر حرارت، بهبود فرایندها و در

جدول (۱): پارامترهای کیفی شیرابه مورد آزمایش

پارامتر	مقدار
pH	۹
COD	۲۱۰۰ mg/L
TS	۲۸۰۰۰ mg/L
رنگ	۶/۰ Gardner
TDS	۲۷۸۰۰ mg/L
TSS	۳۵۰ mg/L
VS	۳۳۰۰ mg/L
قلیابیت	۲۰۴۰ mg/L as CaCO ₃
هدایت الکتریکی	۳۲ S/m
کدورت (فیلتر نشده)	۱۹/۵ NTU
کدورت (فیلتر شده)	۷/۵ NTU

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد مورد استفاده

شیرابه مورد نیاز جهت انجام آزمایش‌های این پژوهش، از خروجی تصفیه‌خانه یکی از مراکز دفع پسماند کشور تهیه شد. به منظور پرهیز از تأثیر ذرات معلق بر کیفیت شیرابه در گذر زمان، در بدو ورود نمونه به آزمایشگاه عمل فیلتراسیون انجام و سپس شیرابه در دمای ۴°C در داخل یخچال نگهداری شد. پارامترهای مختلف شیرابه مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ نشان داده شده است. در این پژوهش از سدیم پرسولفات (SPS) به منظور تصفیه شیرابه، همچنین از اسیدنیتریک و محلول هیدروکسید سدیم به منظور تنظیم pH استفاده شد.

۲-۲- روش انجام کار

آزمایش‌های این پژوهش بصورت ناپیوسته و در یک ارلن ۲۵۰ میلی‌لیتری شیشه‌ای حاوی ۲۰۰ میلی‌لیتر شیرابه انجام شد. طرح شماتیک مراحل انجام این آزمایش‌ها در شکل ۱ ارائه شده است. در این تحقیق در هر آزمایش در ابتدا pH و دمای شیرابه تنظیم شده و سپس مقدار مشخصی از سدیم پرسولفات به آن اضافه شد. در مراحل بررسی تأثیر pH و دما پس از انتقال راکتور به درون دستگاه میکروویو (بوتان M251)، شیرابه در حالت اختلاط به صورت مداوم تحت اشعه میکروویو با توان ۱۶۰W قرار گرفت. در این مرحله به منظور کنترل دما از ظروف حاوی مقدار مشخص آب در کنار راکتور اصلی با هدف کنترل انرژی دریافتی استفاده شد.

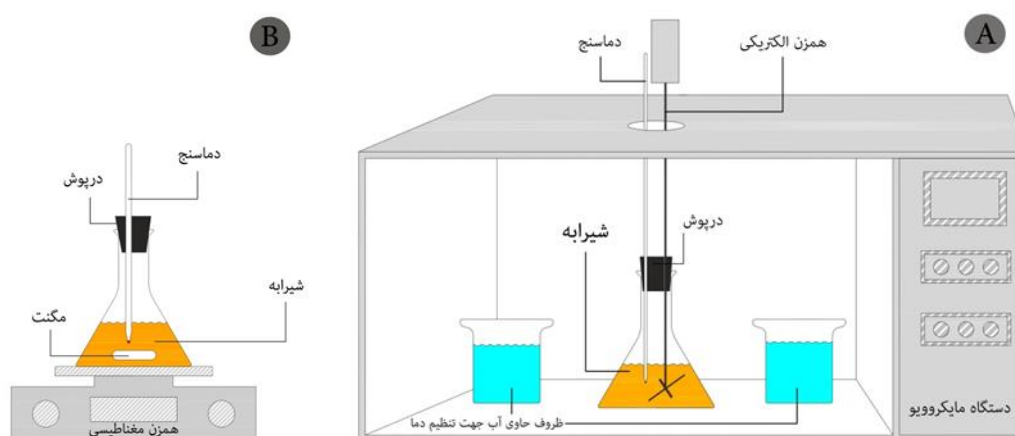
C/PS) نیز برای تصفیه تکمیلی مواد آلی مقاوم باقیمانده در شیرابه محل دفن پسماند پس از تصفیه بیولوژیکی موثر گزارش شده است. بر اساس نتایج حاصل در این فرایند عملکرد سیستم با افزایش دوز Fe-C/PS و توان MW بهبود یافته است (Hu و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین در تحقیقی دیگر فرایند MW/Fe-C/PS در تجزیه ترکیبات آروماتیک و هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای موجود در شیرابه محل دفن پسماند و تبدیل آنها به مواد آلی با مولکول‌های کوچکتر و همچنین از بین رفتن مواد شبه هیومیک موثر گزارش شده است (Hu و همکاران، ۲۰۲۴). در تصفیه شیرابه محل دفن پسماند با استفاده از فرایند اکسیداسیون پرسولفات تقویت شده با میکروویو و کربن فعال به عنوان کاتالیزور نیز تحت شرایط بهینه (۱۰ گرم در لیتر کربن فعال، pH برابر ۹ و توان میکروویو ۵۰۰ وات در مدت زمان تابش ۱۰ دقیقه) راندمان حذف COD و NH_4^+-N به ترتیب ۷۸٫۲٪ و ۶۷٫۲٪ به دست آمده است (Li و همکاران، ۲۰۱۴).

در تصفیه شیرابه به روش تلفیقی میکروویو-پرسولفات حذف ۸۰٪ از TOC با مقدار اولیه ۵۵mg/L گزارش شده است (Chou و همکاران، ۲۰۱۵). در تحقیقی دیگر حذف ۹۰٪ از TOC شیرابه با مقدار اولیه ۴۳۷mg/L مشاهده شده است (Ahn و Kim، ۲۰۱۵). در تحقیقی مشابه با افزایش توان میکروویو و زمان تابش، افزایش میزان حذف COD و نیتروژن آمونیاکی از شیرابه محل دفن پسماند گزارش شده است (Ahn و Kim، ۲۰۱۷). لازم به ذکر است که تنوع کیفیت شیرابه در مراکز دفن لزوم مطالعه موردی این روش تصفیه را برای یک مرکز دفن خاص الزامی می‌دارد.

با عنایت به مطالب فوق، در این پژوهش کاربرد فرایند تلفیقی میکروویو-پرسولفات به منظور تصفیه تکمیلی شیرابه یکی از مراکز دفن کشور مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر پارامترهای pH، دما، توان میکروویو، غلظت پرسولفات و زمان بر فرایند تصفیه شیرابه و یافتن راندمان بهینه حذف رنگ و COD در طی این فرایند بوده است. لازم به توضیح است اکثر مطالعات انجام شده بر روی این فرایند به بررسی فاضلاب‌های مصنوعی پرداخته (Lee و همکاران، ۲۰۱۲؛ Yang و همکاران، ۲۰۰۹، Qi و همکاران، ۲۰۱۵، Bose و همکاران، ۲۰۲۲) و تعداد کمتری از مطالعات بر روی تصفیه فاضلاب‌های واقعی همچون شیرابه مرکز دفن متمرکز بوده است.

موردنظر حفظ شود. پارامترهای اولیه مورد بررسی در این پژوهش شامل pH، دما، غلظت پرسولفات، توان تابش میکروویو و زمان آزمایش بود. در کلیه آزمایش‌ها در بازه‌های زمانی مشخص از هر راکتور نمونه‌گیری بعمل آمده و سپس مقادیر pH، رنگ (به روش ASTM method D 6166-97) و COD (مطابق با دستورالعمل D5220 کتاب استاندارد متد) اندازه گیری شد.

(شکل ۱-۱A). در مراحل بررسی تأثیر توان تابش اشعه میکروویو، غلظت پرسولفات و زمان ماند، راکتور به طور مداوم توسط استیرر (SHAFAQ MSH-600) با دور ۱۲۰ rpm خارج از دستگاه میکروویو در حال اختلاط قرار گرفته (شکل ۱-۱B) و بصورت مرحله‌ای (هر ۱۵ دقیقه در طی زمان آزمایش) درون دستگاه میکروویو گذاشته شده و به مدت زمان معین (وابسته به توان تابش مورد استفاده) تحت تابش قرار گرفت تا دمای آن در محدوده



شکل (۱): طرح شماتیک پایلوت مورد استفاده

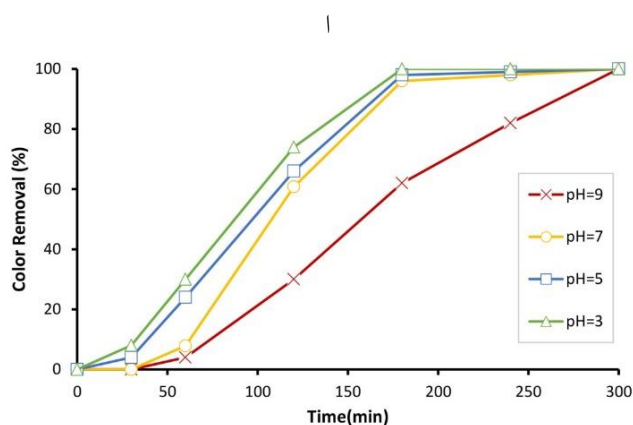
(A) مرحله تابش اشعه درون دستگاه میکروویو (B) مرحله اختلاط توسط همزن مغناطیسی

اندک تغییر pH بر فرایند و پرهیز از مصرف اسید به منظور کاهش pH اولیه، شرایط طبیعی شیرابه (pH=9) بعنوان مبنا جهت انجام آزمایش‌های مراحل بعد انتخاب شد. به طور مشابه در مطالعه Kim و Ahn در سال ۲۰۱۵ در تصفیه شیرابه به روش میکروویو-پرسولفات نیز تأثیر کاهش pH اولیه بر فرایند تصفیه ناچیز گزارش شده است.

۳- بحث و نتیجه‌گیری

۳-۱- تأثیر pH

به منظور بررسی تأثیر pH بر راندمان فرایند، آزمایش‌ها با استفاده از پرسولفات سدیم با غلظت ۲۵g/L، دمای ۶۰°C، توان میکروویو به میزان ۱۶۰W و در pH های مختلف انجام شد. همانگونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، با کاهش pH اولیه، نرخ حذف رنگ بهبود یافته، اما در پایان ۵ ساعت زمان واکنش حذف رنگ در همه pH ها یکسان بوده است. بهبود بازده حذف رنگ در شرایط اسیدی در مطالعه سایر محققین نیز گزارش شده است (Grouli و همکاران، ۲۰۲۴). با کاهش pH شرایط اسیدی باعث از بین رفتن گونه‌های قلیایی و جلوگیری از ربایش رادیکال سولفات توسط CO_3^{2-} و HCO_3^- می‌شود. در $\text{pH} < 4/5$ همه گونه‌های قلیایی از بین می‌روند. لذا شرایط اسیدی پیشرفت واکنش‌ها را بهبود می‌بخشد (Ahmed و همکاران، ۲۰۲۴؛ Kim و Ahn، ۲۰۱۵). مقایسه درصد حذف COD در شکل ۳ نشان می‌دهد که افزایش نرخ حذف در اثر کاهش pH اولیه کمتر از ۵٪ بوده است. با توجه به تأثیر



شکل (۲): تأثیر تغییر pH اولیه بر حذف رنگ شیرابه توسط فرایند میکروویو-

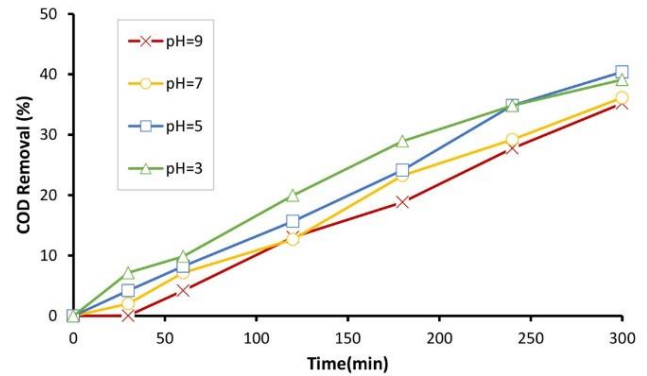
پرسولفات در طی زمان

([SPS]=۲۵g/L, T=۶۰°C, W=۱۶۰W=توان)

(نقطه جوش محلول شیرابه مورد آزمایش در محیط آزمایشگاه حدوداً 98°C بوده است). همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است افزایش دما تأثیر چشمگیری در بهبود فرایند و افزایش نرخ حذف رنگ از شیرابه دارد. دماهای بالاتر از 60°C قادر به حذف کامل رنگ شیرابه بوده، اما نرخ حذف در دماهای 80°C و 95°C بسیار بالاتر می‌باشد. در حالت کلی، دلیل این امر را می‌توان به فعالسازی حرارتی اکسیدکننده پرسولفات و تولید رادیکال‌های قدرتمندتر سولفات به نسبت یون پرسولفات نسبت داد که موجب بهبود چشمگیر راندمان حذف در دماهای 80°C و 95°C به نسبت دو دمای دیگر شده است. نمودار حذف COD در شکل ۵ نیز نشان می‌دهد که در دماهای بالاتر از 80°C پس از گذشت حدود ۴ ساعت راندمان حذف COD به بیش از ۸۰٪ افزایش می‌یابد. این در حالیتی که در دمای 60°C در شرایط مشابه حداکثر میزان حذف بار آلی تنها ۳۵٪ بوده و در دمای 40°C از ۱۱٪ فراتر نرفته است. همانگونه که مشاهده می‌شود دمای واکنش عاملی بسیار تأثیرگذار در این فرایند می‌باشد. با توجه به اختلاف ناچیز راندمان حذف COD در دماهای بالا، دمای 80°C بعنوان مبنای جهت ادامه آزمایش‌ها انتخاب شد. در مطالعه Kim و Ahn در سال ۲۰۱۵ نیز نتایج مشابهی در بررسی تأثیر افزایش دما بر این فرایند گزارش شده است.

۳-۳- تأثیر توان میکروویو

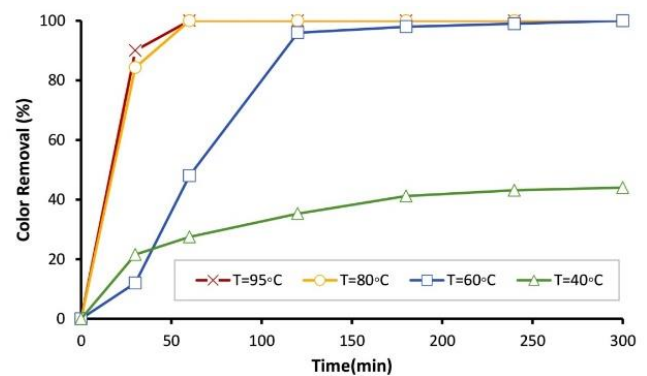
بر اساس نتایج بدست آمده در بخش قبل، دمای واکنش پارامتر بسیار مهمی در پیشرفت واکنش‌های تصفیه توسط پرسولفات می‌باشد. به منظور بررسی تأثیر توان تابش میکروویو، بر راندمان تصفیه آزمایش‌ها با استفاده از توان‌های مختلف ۱۶۰، ۴۰۰، ۶۴۰ و ۸۰۰ وات در $\text{pH}=9$ ، دمای 80°C و در حضور پرسولفات سدیم با غلظت 25g/L تکرار شد. لازم به توضیح است که بازه تغییرات توان با توجه به نتایج مطالعات قبلی (Wang و همکاران، ۲۰۱۶)، و همچنین آزمایش‌های اولیه انجام پذیرفته انتخاب شد. همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، حذف کامل رنگ در همه توان‌ها در کمتر از ۲ ساعت اتفاق افتاده، اما در توان‌های بالاتر سرعت واکنش‌ها بیشتر بوده است. نتایج حذف COD در شکل ۷ نیز نشان می‌دهد که افزایش توان در بازه 160W تا 800W موجب بهبود راندمان حذف بار آلی شده است.



شکل (۳): تأثیر تغییر pH اولیه بر حذف COD شیرابه توسط فرایند میکروویو-

پرسولفات در طی زمان

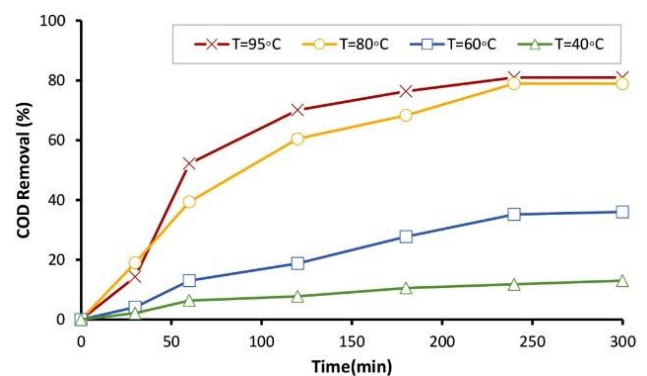
(160W , $T=60^{\circ}\text{C}$, $[\text{SPS}]=25\text{g/L}$)



شکل (۴): تأثیر دما بر حذف رنگ شیرابه توسط فرایند میکروویو-پرسولفات

در طی زمان

(160W , $\text{pH}=9$, $[\text{SPS}]=25\text{g/L}$)



شکل (۵): تأثیر دما بر حذف COD شیرابه توسط فرایند میکروویو-پرسولفات

در طی زمان

(160W , $\text{pH}=9$, $[\text{SPS}]=25\text{g/L}$)

۳-۲- تأثیر دما

به منظور بررسی تأثیر دما بر راندمان فرایند، آزمایش‌ها در $\text{pH}=9$ ، در حضور پرسولفات سدیم با غلظت 25g/L ، توان 160W و در چهار دمای ۴۰، ۶۰، ۸۰ و 95°C درجه سلسیوس تکرار شد

حرارت یکنواخت را می توان از دلایل این امر ذکر نمود (Zhang و همکاران، ۲۰۱۰).

به منظور انتخاب بهترین توان دستگاه میکروویو در فرایند مورد استفاده در ادامه راندمان حرارتی سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور ۲۰۰mL شیرابه توسط تابش میکروویو با توان های مختلف حرارت داده شده و نرخ تغییر دما در واحد زمان ($\Delta\theta/t$) برای هر کدام از توان های مورد استفاده برحسب $^{\circ}\text{C/s}$ اندازه گیری گردید. در ادامه توان واقعی حرارتی دریافت شده توسط شیرابه، با توجه به روابط ۳ و ۴ محاسبه شد.

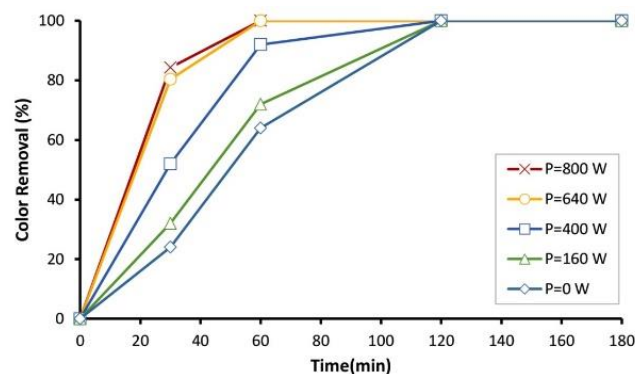
$$Q = m \cdot C \cdot \Delta\theta \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$P = \frac{Q}{t} = m \cdot C \cdot (\Delta\theta/t) \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این روابط Q انرژی دریافتی بر حسب ژول، m جرم آب بر حسب کیلوگرم، C ظرفیت گرمایی ویژه آب برابر با $J/(kg \cdot ^{\circ}\text{C})$ ۴۱۸۷، $\Delta\theta$ تغییر دما برحسب $^{\circ}\text{C}$ ، t زمان بر حسب ثانیه و P توان برحسب وات می باشد. برای هر توان تابش میکروویو، نسبت توان واقعی دریافت شده به توان اسمی مصرف شده محاسبه گردیده که نتایج بدست آمده در جدول ۲ ارائه شده است. همانگونه که در این جدول مشاهده می شود، مقدار راندمان انرژی در دو توان 640 W و 800 W تقریباً برابر و بالاتر از سایر توان های مورد آزمایش می باشد. لذا با توجه به تشابه تقریبی بازده حذف COD و انرژی مصرفی در دو توان بالاتر، توان 640 W به عنوان حالت بهینه انتخاب گردید. برخی مطالعات انجام شده نیز نشان می دهد که افزایش توان میکروویو در دمای ثابت، قادر است واکنش فعال سازی پرسولفات در تصفیه شیرابه را بهبود دهد. همان گونه که در مطالعه Chou و همکاران در سال ۲۰۱۳ نیز گزارش شده است، افزایش توان میکروویو از 128 W به 325 W و سپس 550 W باعث بهبود فرایند حذف TOC از شیرابه می شود (Chou و همکاران، ۲۰۱۳).

جدول (۲): مقایسه راندمان انتقال حرارت در توان های مختلف تابش اشعه میکروویو

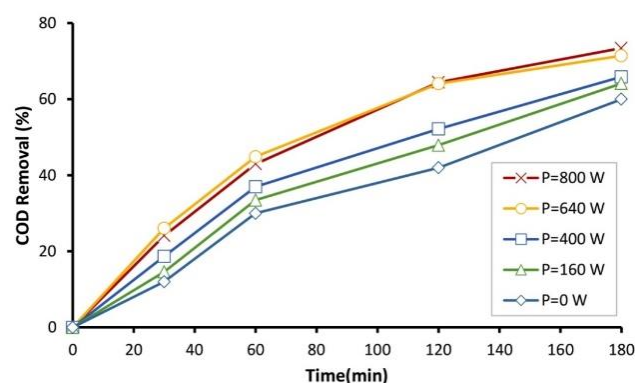
توان واقعی (w)	$\Delta\theta/t$ ($^{\circ}\text{C/S}$)	توان اسمی (w)
۷۲/۱۰	۰/۰۹	۱۶۰
۱۹۰/۲۶	۰/۲۳	۴۰۰
۴۰۸/۷۳	۰/۴۹	۶۴۰
۴۹۹/۶۸	۰/۶۰	۸۰۰



شکل (۶): تأثیر توان میکروویو بر حذف رنگ توسط فرایند میکروویو-

پرسولفات در طی زمان

$$(T=80^{\circ}\text{C}, \text{pH}=9, [\text{SPS}]=25\text{g/L})$$



شکل (۷): تأثیر توان میکروویو بر حذف COD توسط فرایند میکروویو-

پرسولفات در طی زمان

$$(T=80^{\circ}\text{C}, \text{pH}=9, [\text{SPS}]=25\text{g/L})$$

برخی مطالعات انجام شده نیز نشان می دهد که افزایش توان میکروویو در دمای ثابت، قادر است که واکنش فعال سازی پرسولفات در تصفیه شیرابه را بهبود دهد. در این فرایند بازده تبدیل انرژی میکروویو به انرژی حرارتی در مقیاس مولکولی با افزایش توان میکروویو افزایش یافته که این امر منجر به انتقال انرژی بیشتر و نرخ حذف بالاتر فرایندها می گردد (Chou و همکاران، ۲۰۱۵). لازم به ذکر است در شکل های ۶ و ۷، منحنی توان صفر ($P=0\text{ W}$) بیانگر استفاده از سیستم حرارت دهی متداول به منظور مقایسه با میکروویو می باشد. همانگونه که قابل مشاهده است، استفاده از میکروویو به عنوان عامل تأمین انرژی و افزایش حرارت باعث افزایش در بازده حذف رنگ و COD شده است. این بهبود را می توان به اثرات خاص تابش میکروویو، علاوه بر ایجاد گرما و تفکیک حرارتی اکسیدکننده نسبت داد. جنبش شدید ذرات دوقطبی در ابعاد مولکولی، ایجاد حرارت موضعی بالا و

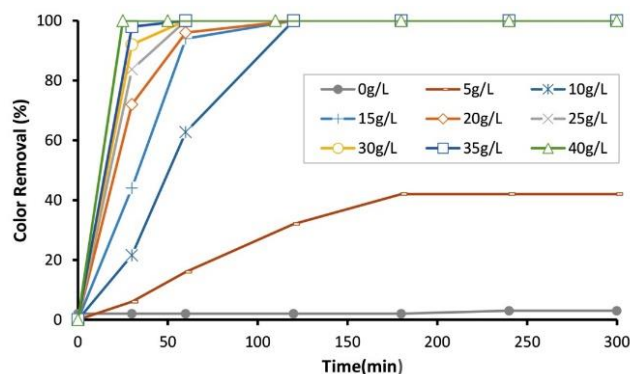
شد. با توجه به نتایج حذف رنگ شیرابه که در شکل ۸ ارائه گردیده مشاهده می‌شود که در هنگام استفاده از پرسولفات سدیم با غلظت ۵ گرم در لیتر حداکثر راندمان حذف رنگ در حدود ۴۵٪ بوده، ولی در ادامه با افزایش غلظت پرسولفات سدیم در کمتر از ۲ ساعت حذف کامل رنگ برای کلیه غلظت‌های مورد آزمایش حاصل شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود در این مورد نیز با افزایش غلظت پرسولفات سدیم راندمان حذف COD به تدریج افزایش یافته است. در این آزمایش‌ها حداکثر راندمان حذف COD به میزان ۸۸٪ پس از گذشت حدود ۴ ساعت و در حضور پرسولفات سدیم با غلظت ۳۵g/L حاصل شده است. لازم به ذکر است که افزایش نرخ حذف آلاینده با افزایش غلظت پرسولفات توسط سایر محققین نیز گزارش شده است (Carter و Matzek، ۲۰۱۶).

تأثیر غلظت پرسولفات سدیم بر راندمان حذف COD نیز در شکل ۹ ارائه شده است. همانطور که در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود در این فرایند اشعه میکروویو به تنهایی (عدم حضور پرسولفات سدیم) تأثیر معنی‌داری بر حذف و تخریب ترکیبات آلی موجود در شیرابه نداشته است. توانایی اشعه میکروویو غالباً در ایجاد حرارت سریع و همسان در محیط بوده که به تصفیه فاضلاب‌های دارای مواد فرار کمک می‌کند، که به تنهایی در تصفیه سایر فاضلاب‌های دارای ترکیبات سخت تجزیه‌پذیر و غیرفرار مؤثر نمی‌باشد (Wang و Wang، ۲۰۱۶).

۳-۵- تأثیر زمان ماند

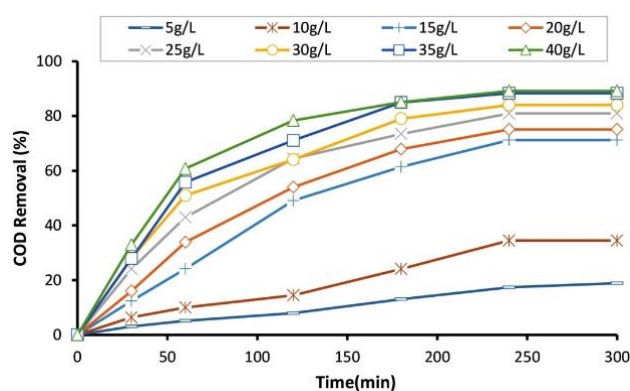
به منظور بررسی تأثیر زمان ماند، آزمایش تصفیه شیرابه توسط فرایند میکروویو-پرسولفات در شرایط بهینه حاصل از آزمایش‌های قبل شامل pH=۹، دمای ۸۰°C، در حضور پرسولفات سدیم با غلظت ۳۵g/L، تابش میکروویو با توان ۶۴۰W و در مدت زمان ۴۸۰ دقیقه تکرار شد. نتایج این بررسی در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که در این فرایند رنگ در کمتر از یک ساعت به طور کامل حذف شده است. همچنین با توجه به منحنی حذف COD، پس از نرخ قابل توجه حذف بار آلی در زمان‌های ابتدایی، فرایند حذف COD کند شده و پس از حدود ۴ ساعت راندمان حذف به ۸۸٪ می‌رسد؛ اما پس از این نقطه تغییر خاصی در راندمان حذف رخ نمی‌دهد. لذا به نظر می‌رسد که زمان ماند بهینه همان ۴ ساعت می‌باشد.



شکل (۸): تأثیر غلظت پرسولفات بر حذف رنگ توسط فرایند میکروویو-

پرسولفات برحسب زمان

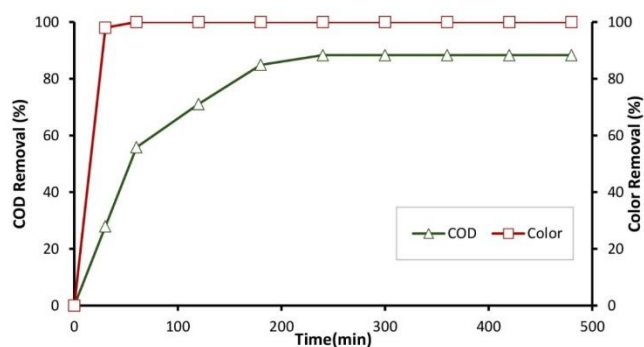
($640W$, $T=80^{\circ}C$, $pH=9$)



شکل (۹): تأثیر غلظت پرسولفات بر روند حذف COD توسط فرایند

میکروویو-پرسولفات برحسب زمان

($640W$, $T=80^{\circ}C$, $pH=9$)



شکل (۱۰): روند حذف رنگ و COD در فرایند تصفیه شیرابه توسط فرایند

میکروویو-پرسولفات

($pH=9$, دمای $80^{\circ}C$ ، توان تابش میکروویو $640W$, $[SPS]=35g/L$)

۳-۴- تأثیر غلظت پرسولفات

به منظور بررسی تأثیر غلظت پرسولفات بر راندمان فرایند، آزمایش‌ها در pH اولیه ۹، دمای ۸۰°C، تابش میکروویو با توان ۶۴۰W و با استفاده از غلظت‌های مختلف پرسولفات سدیم تکرار

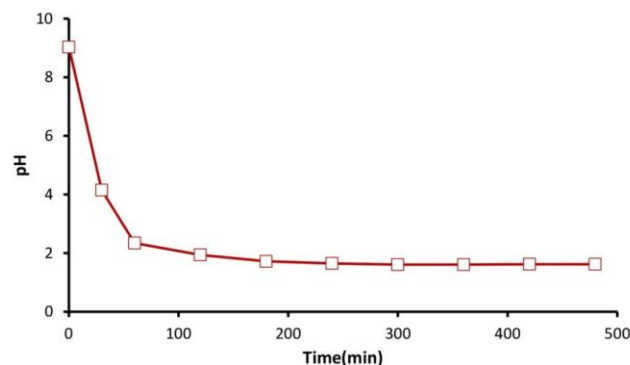
منظور تأثیر پارامترهای pH، دما، توان تابش میکروویو، غلظت سدیم پرسولفات و زمان بر حذف رنگ و COD شیرابه مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده تأثیر عامل pH بر واکنش، کوچک و قابل صرف نظر کردن بوده، اما دما به عنوان پارامتری مهم در این فرایند نقش داشته که باعث فعالسازی گسترده یونهای پرسولفات می گردد. مقایسه توانهای مختلف تابش اشعه میکروویو نشان داد که استفاده از توانهای بالاتر باعث تأثیر مثبت در راندمان تصفیه شیرابه و همچنین بازده انتقال حرارت می گردد. غلظت پرسولفات عامل مهم دیگر تأثیرگذار بر فرایند بوده که با افزایش آن به بیش از ۱۵۵g/L، حذف COD بالای ۷۰٪ حاصل شد. در نهایت در شرایط بهینه انجام آزمایش ها شامل pH=۹، دمای ۸۰°C، توان تابش ۸۰۰W، غلظت سدیم پرسولفات برابر با ۳۵g/L و در طی مدت زمان ۴ ساعت، حذف کامل رنگ و حذف COD به میزان ۸۸٪ حاصل شد. همچنین بر اساس نتایج این آزمایش در جریان این فرایند محیط واکنش به شدت اسیدی شده و pH شیرابه از ۹ به کمتر از ۲ کاهش یافت. با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق، این فرایند به منظور حذف رنگ دارای عملکرد مناسبی بوده و غلظت ۱۰g/L سدیم پرسولفات قادر به حذف کامل رنگ شیرابه می باشد. اما این روش به تنهایی به عنوان تصفیه تکمیلی به منظور کاهش بار آلی در حدود استاندارد موفق نبوده و نهایتاً در شرایط بهینه، COD شیرابه به ۳۳۰mg/L کاهش یافت که بالاتر از میزان مجاز جهت تخلیه به محیط های پذیرنده مطابق استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ایران است. از طرف دیگر میزان مصرف نسبتاً بالای سدیم پرسولفات یکی از جنبه های منفی مطرح در این فرایند بوده که باید مد نظر قرار گیرد.

۵- تقدیر و تشکر

بدینوسیله از اداره پژوهش دانشگاه تربیت مدرس جهت حمایت مالی در راستای پیشبرد این پژوهش تقدیر و تشکر به عمل می آید.

References

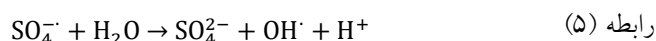
1. Abdullah, N. D. B., Isa, M. H., Juani, R. H. M., Sultan, A. M. S. B. H. M., Nayan, Z. B. H., & Mustafa, M. R. U. (2022, December). Organic Matter Removal from Sanitary Landfill Leachate Through Chemical Oxidation. In *International Conference on*



شکل (۱۱): روند تغییرات pH در فرایند تصفیه شیرابه توسط فرایند میکروویو-پرسولفات (۹=pH، دمای ۸۰°C، توان تابش میکروویو ۸۰۰W، غلظت سدیم پرسولفات ۳۵g/L)

۳-۶- تغییرات pH شیرابه

اندازه گیری pH در طی این آزمایش نشان داد که در فرایند تصفیه توسط پرسولفات، با گذر زمان شرایط اسیدی بر سیستم حاکم بوده و pH به شدت افت می کند. به نظر می رسد با شروع واکنش های فعال سازی و تجزیه پرسولفات، مطابق رابطه ۵ یون H^+ در محیط تولید شده و باعث افت ناگهانی pH می شود. در مطالعه Lee و همکاران نیز افت pH در اثر پیشرفت واکنش فعال سازی پرسولفات به منظور تجزیه پرفلوئورو اوکتانویک اسید گزارش شده است (Lee و همکاران در سال ۲۰۱۲).



در شکل ۱۱ تغییرات pH شیرابه در طی فرایند در شرایط بهینه انجام آزمایش ها ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود در یک ساعت اول واکنش، شدت تغییرات pH زیاد بوده و سپس این نرخ کاهش یافته و در نهایت در طی زمان حدود ۴ ساعت به حدود ۱/۶ می رسد. کاهش تدریجی pH در طی این فرایند را می توان به عنوان نشانه ای از فعال سازی پرسولفات و پیشرفت واکنش های مربوطه تلقی نمود.

۴- نتیجه گیری

هدف اصلی از انجام این تحقیق بررسی تصفیه تکمیلی شیرابه مرکز دفن توسط فرایند تلفیقی میکروویو-پرسولفات بود. بدین

Emerging Smart Cities (pp. 479-487). Singapore: Springer Nature Singapore.

2. Ahmed, N. (2024). Removal of Emerging and Persistent Pollutants by Fenton-like and Photodegradation Processes.

3. Aziz, N. A. M., Mohamed, H., Ong, M. Y., Yunus, R., Law, M. C., Abd Hamid, H., ... & Mahlia, T. M. I. (2025). Numerical simulation of hotspot in polyol ester production using microwave-assisted reaction. *Results in Engineering*, 25, 104577.
4. Bose, S., & Kumar, M. (2022). Microwave-assisted persulfate/peroxymonosulfate process for environmental remediation. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 36, 100826.
5. Chen, G., Wu, G., Li, N., Lu, X., Zhao, J., He, M., ... & Wang, S. (2021). Landfill leachate treatment by persulphate related advanced oxidation technologies. *Journal of Hazardous Materials*, 418, 126355.
6. Chen, M., He, Y., & Gu, Z. (2020). Microwave irradiation activated persulfate and hydrogen peroxide for the treatment of mature landfill leachate effluent from a membrane bioreactor. *Separation and Purification Technology*, 250, 117111.
7. Chen, W., Wang, F., He, C., & Li, Q. (2020). Molecular-level comparison study on microwave irradiation-activated persulfate and hydrogen peroxide processes for the treatment of refractory organics in mature landfill leachate. *Journal of hazardous materials*, 397, 122785.
8. Chou, Y.C., Lo, S.L., Kuo, J. and Yeh, C.J., 2013. Derivative mechanisms of organic acids in microwave oxidation of landfill leachate. *Journal of hazardous materials*, 254, pp.293-300.
9. Chou, Y.C., Lo, S.L., Kuo, J. and Yeh, C.J., 2015. Microwave-enhanced persulfate oxidation to treat mature landfill leachate. *Journal of hazardous materials*, 284, pp.83-91.
10. Dai, Y., & Liu, Z. (2025). Research progress on remediation of total petroleum hydrocarbons in soil by chemical oxidation-a review. *Frontiers in Environmental Engineering*, 4, 1532795.
11. Das, R., & Raj, D. (2025). Sources, distribution, and impacts of emerging contaminants—a critical review on contamination of landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 100602.
12. Dhamorikar, R. S., Lade, V. G., Kewalramani, P. V., & Bindwal, A. B. (2024). Review on integrated advanced oxidation processes for water and wastewater treatment. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*.
13. Fontaine, L., Legros, R., & Frayret, J. M. (2025). Solid waste generation prediction model framework using socioeconomic and demographic factors with real-time MSW collection data. *Waste Management & Research*, 43(2), 267-281.
14. Grouli, A., Chraka, A., Bachra, Y., Elkouali, M. H., Chtita, S., & Berrada, M. (2024). An investigation of the adsorption of Congo red dye on two naturally occurring adsorbents Hydroxyapatite and Bentonite: An Experimental Analysis, DFT calculations, and Monte Carlo simulation. *Heliyon*, 10(21).
15. Gu, Z., Chen, W., Li, Q., Wang, Y., Wu, C., & Zhang, A. (2018). Degradation of recalcitrant organics in landfill concentrated leachate by a microwave-activated peroxydisulfate process. *RSC advances*, 8(57), 32461-32469.
16. House, D.A., 1962. Kinetics and mechanism of oxidations by peroxydisulfate. *Chemical reviews*, 62(3), pp.185-203.
17. Hu, B., Zhou, M., Zhang, K., Lu, J., Qin, Y., Tan, Y., ... & Gu, X. (2024). The advanced treatment of mature landfill leachate by iron-carbon micro-electrolysis combined with persulfate activated (ICME-PS) process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(5), 113786.
18. Hu, Y. (2021). A microwave radiation-enhanced Fe–C/persulfate system for the treatment of refractory organic matter from biologically treated landfill leachate. *RSC advances*, 11(47), 29620-29631.
19. Huang, Z., Li, X., Hou, S., Zhao, Y., Lu, H., Wang, J., & Deng, Y. (2025). Surfactant Enhancement in Degradation of Phenanthrene Contaminated Soil by Sodium Persulfate. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 114(3), 33.
20. Kianian, S., Toulakani, R. M., Zisti, F., Balarak, D., Siddiqui, S. H., & Saloot, M. K. (2024). Degradation of Antibiotics by Ultrasound-Assisted Heterogeneous Activation of Persulfate and Peroxymonosulfate: A Review. *International Journal of Pharmaceutical Investigation*, 14(1).
21. Kim, Y.B. and Ahn, J.H., 2015. Microwave-Assisted Decomposition of Landfill Leachate with Persulfate. *Journal of Environmental Engineering*, 142(3), p.04015084.
22. Kim, Y. B., & Ahn, J. H. (2017). Changes of absorption spectra, SUVA 254, and color in treating landfill leachate using microwave-assisted persulfate oxidation. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 34, 1980-1984.
23. Kurniawan, T. A., Yap, P. S., & Chen, Z. (2025). Techniques for pollutant removal, nutrient recovery, and energy production from landfill leachates: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 1-61.
24. Lavanya, A. (2024). Treatment and nutrient recovery from landfill leachate by sequential persulfate oxidation and struvite precipitation: An evaluation of technical feasibility. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(42), 55022-55034.
25. Lee, Y., Lo, S., Kuo, J. and Hsieh, C., 2012. Decomposition of perfluorooctanoic acid by microwaveactivated persulfate: Effects of temperature, pH, and chloride ions. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 6(1), pp.17-25.
26. Li Na, L. N., Li XiaoMing, L. X., Yang Qi, Y. Q., Liu

- Xian, L. X., & Wu XiuQiong, W. X. (2014). Landfill leachate treatment by microwave-enhanced persulfate oxidation process using activated carbon as catalyst.
27. Liang, F., Liu, Y., Yang, S., Wang, Y., & Peng, Y. (2025). Highly Efficient Degradation of Lactic Acid by Microwave-Induced Activated Carbon Catalytic Oxidation Process. Available at SSRN 5173094.
 28. Liu, C., Xia, W., Cao, Z., Dai, J., Zhou, R., Li, H., & Xu, J. (2025). Bibliometric analysis and research progress on hydrogen peroxide and persulfate oxidation processes in the remediation of actual oil-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-28.
 29. Matzek, L.W. and Carter, K.E., 2016. Activated persulfate for organic chemical degradation: a review. *Chemosphere*, 151, pp.178-188.
 30. Mokhtarani, N. Bayatfard, A. Mokhtarani B., 2012. Full scale performance of compost's leachate treatment by biological anaerobic reactors, *Waste Management and Research*, 30, pp.524-529.
 31. Mutke, X. A., Swiderski, P., Drees, F., Akin, O., Lutze, H. V., & Schmidt, T. C. (2024). Efficiency of ozonation and sulfate radical-AOP for removal of pharmaceuticals, corrosion inhibitors, X-ray contrast media and perfluorinated compounds from reverse osmosis concentrates. *Water Research*, 255, 121346.
 32. Nguyen, C. (2025). Evaluating The Impacts Of Pre-Oxidation And Intermediate Oxidation On Dual Media Filtration. [10.7275/55980](https://doi.org/10.7275/55980)
 33. Qi, C., Liu, X., Zhao, W., Lin, C., Ma, J., Shi, W., Sun, Q. and Xiao, H., 2015. Degradation and dechlorination of pentachlorophenol by microwave-activated persulfate. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(6), pp.4670-4679.
 34. Seifi, M., Kamran-Pirzaman, A., Dehghani Kiadehi, A., & Rahimnejad, M. (2025). A comprehensive comparison of various methods and hybrid systems in leachate treatment: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-96.
 35. Shang, X., Liu, X., Ren, W., Huang, J., Zhou, Z., Lin, C., ... & Ouyang, W. (2023). Comparison of peroxodisulfate and peroxymonosulfate activated by microwave for degradation of chlorpyrifos in soil: Effects of microwaves, reaction mechanisms and degradation products. *Separation and Purification Technology*, 306, 122682.
 36. Soubh, A., Mokhtarani, N., 2016. The post treatment of composting leachate with a combination of ozone and persulfate oxidation processes, *RSC Advances*, 6, pp.76113-22.
 37. Wang, S., Razanajatovo, M. R., Du, X., Wan, S., He, X., Peng, Q., & Zhang, Q. (2024). Recent advances on decomplexation mechanisms of heavy metal complexes in persulfate-based advanced oxidation processes. *Chinese Chemical Letters*, 35(6), 109140.
 38. Wang, N. and Wang, P., 2016. Study and application status of microwave in organic wastewater treatment—a review. *Chemical Engineering Journal*, 283, pp.193-214.
 39. Wang, Y., Xi, Y., Bian, J., Fu, X., & Zi, W. (2025). Advancements in Microwave Drying of Fresh Ginger: Drying Mode, Influencing Factors, Quality Characteristics and Challenges. *Food Engineering Reviews*, 1-29.
 40. Wojnárovits, L., Homlok, R., Kovács, K., Tegze, A., & Takács, E. (2024). Oxidation and mineralization rates of harmful organic chemicals in hydroxyl radical induced reactions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 281, 116669.
 41. Xiang, R., Wei, W., Mei, T., Wei, Z., Yang, X., Liang, J., & Zhu, J. (2025). A Review on Landfill Leachate Treatment Technologies: Comparative Analysis of Methods and Process Innovation. *Applied Sciences* (2076-3417), 15(7).
 42. Yang, Y., Wang, P., Shi, S. and Liu, Y., 2009. Microwave enhanced Fenton-like process for the treatment of high concentration pharmaceutical wastewater. *Journal of Hazardous materials*, 168(1), pp.238-245.
 43. Zhang, W., Yang, S., Niu, R., Shao, X., Shan, L., Yang, X. and Wang, P., 2010, June. Microwave-assisted COD removal from landfill leachate by hydrogen peroxide, peroxymonosulfate and persulfate. In *Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE), 2010 4th International Conference on* (pp. 1-4). IEEE.
 44. Zhang, Y., Li, G., Ma, S., Li, Z., Fan, F., & Huang, Y. (2025). Switchable Multi-Spectral Electromagnetic Defense in the Ultraviolet, Visible, Infrared, Gigahertz, and Terahertz Bands Using a Magnetically-Controllable Soft Actuator. *ACS nano*, 19(11), 11295-11308.