



دانشگاه آزاد اسلامی

واحداراک

Islamic Azad University, Arak Branch

فرم پیشنهاد تحقیق

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد

عنوان تحقیق به فارسی:

توسعه و ارزیابی عملکرد ماژول تصفیه آب مبتنی بر جاذب هیبریدی چندلایه احیاپذیر و ضد رسوب در حذف COD و سولفید از پساب اسپنت کاستیک پتروشیمی شازند

عنوان تحقیق به انگلیسی:

Development and Performance Evaluation of a Water Treatment Module Based on a Regenerable and Anti-Fouling Multi-Layer Hybrid Adsorbent for COD and Sulfide Removal from Spent Caustic Wastewater of Shazand Petrochemical Plant

دانشکده: فنی مهندسی

گروه تخصصی: دکتری تخصصی

گرایش: مهندسی شیمی

نام دانشجو: سید امیر حسین

نام خانوادگی دانشجو: هاشمی

رشته تحصیلی: مهندسی شیمی

نام و نام خانوادگی استاد (اساتید) مشاور:

تاریخ و امضاء

نام و نام خانوادگی استاد (اساتید) راهنما:

تاریخ و امضاء

تاریخ تصویب در شورای پژوهشی

تصویب در شورای گروه تخصصی:

ده :

امضاء رئیس دانشکده:

مدیر پژوهشی دانشکده:

توجه: این فرم با مساعدت و هدایت استاد راهنما تکمیل شود.

اطلاعات مربوط به دانشجو	
نام خانوادگی	سید امیر حسین هاشمی
شماره دانشجویی	
رشته و گرایش	مهندسی شیمی
نشانی پستی و تلفن	اراک هیکو فاز 3 برج اپادانا واحد 18
اطلاعات مربوط به استاد راهنما	
نام خانوادگی	محمود سلیمی
تخصص اصلی	فرایند های جداسازی، انرژی، مدل سازی و شبیه سازی
آخرین مدرک تحصیلی	دکتری مهندسی شیمی
سنوات تدریس در کارشناسی ارشد	15 سال
سنوات تدریس در دکتری	11 سال
محل خدمت	دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک
نحوه همکاری (تمام وقت، نیمه وقت، مدعو)	تمام وقت
نشانی پستی و تلفن	اراک مجتمع دانشگاهی امیرکبیر دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک
اطلاعات مربوط به استاد مشاور	
نام خانوادگی	
تخصص اصلی	
آخرین مدرک تحصیلی	
سنوات تدریس در کارشناسی ارشد	
سنوات تدریس در دکتری	
محل خدمت	
نحوه همکاری (تمام وقت، نیمه وقت، مدعو)	
نشانی پستی و تلفن	

الف : عنوان پایان نامه : توسعه و ارزیابی عملکرد ماژول تصفیه آب مبتنی بر جاذب هیبریدی چندلایه احیاپذیر و ضد رسوب در حذف COD و سولفید از پساب اسپنت کاستیک پتروشیمی شازند

فارسی ☒ غیرفارسی ☐

ب: نوع کار تحقیقاتی: بنیادی¹ ☐ نظری² ☐ کاربردی³ ☒ عملی⁴ ☒

ت: پرسش اصلی تحقیق (مسأله تحقیق) :

مدل مکانیسمی حاکم بر جذب همزمان COD و سولفید توسط جاذب هیبریدی چندلایه احیاپذیر و ضد رسوب در بستر ثابت چگونه است و پارامترهای ساختاری (ضخامت لایه‌ها، تخلخل، آب‌دوستی) و عملیاتی (دبی، pH، زمان ماند) چگونه بر ظرفیت جذب دینامیک، سینتیک احیا و نرخ رسوب‌گذاری ماژول تأثیر می‌گذارند؟

5- بیان مسئله

پساب اسپنت کاستیک حاصل از فرآیندهای شیرین‌سازی گاز و الفین‌ها در صنایع پتروشیمی، یکی از آلوده‌ترین جریان‌های جانبی صنعتی محسوب می‌شود. این پساب معمولاً دارای مقادیر بالایی از سولفیدها (S^{2-})، مرکاپتان‌ها، فنولات‌ها و بار آلی بسیار زیاد (COD اغلب بیش از 50,000 mg/L) است. روش‌های متداول تصفیه مانند خنثی‌سازی اسیدی، اکسیداسیون شیمیایی (با هیپوکلریت یا ازن به‌صورت مستقل) و فرآیندهای بیولوژیکی به دلیل تولید لجن ثانویه، خوردگی بالا، مصرف مواد شیمیایی و هزینه‌های عملیاتی قابل توجه، در بسیاری از موارد کارایی محدودی در تصفیه این نوع پساب دارند.

از سوی دیگر، استفاده از جاذب‌های متداول نظیر کربن فعال، زئولیت و رزین‌های تبادل یونی در مواجهه مستقیم با چنین پساب‌هایی اغلب با مشکلاتی مانند اشباع سریع، رسوب‌گرفتگی (Fouling)، افت فشار و کاهش راندمان جذب همراه است. حضور مواد معلق، ترکیبات آلی سنگین و نمک‌های محلول می‌تواند موجب گرفتگی منافذ جاذب و کاهش سطح فعال آن شود. علاوه بر این، احیای شیمیایی جاذب‌ها در محیط‌های بسیار قلیایی مانند اسپنت کاستیک در بسیاری از موارد دشوار بوده و ممکن است به تخریب تدریجی ساختار جاذب منجر شود.

در سال‌های اخیر، استفاده از سامانه‌های جذب چندلایه و جاذب‌های پیشرفته به‌عنوان رویکردی نوین برای افزایش کارایی حذف آلاینده‌ها مطرح شده است. با این حال، بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده محدود به مقیاس آزمایشگاهی بوده و هنوز فاصله قابل توجهی میان نتایج آزمایشگاهی و کاربرد عملی در مقیاس صنعتی وجود دارد. یکی از چالش‌های مهم در بهره‌برداری از بسترهای جذبی، ورود مواد معلق به بستر جذب و در نتیجه افزایش فولینگ، افت فشار و کاهش طول عمر جاذب‌ها است.

به همین دلیل، در این پژوهش یک سامانه سه مرحله‌ای شامل پیش‌تصفیه فیزیکی، پیش‌اکسیداسیون اوزونی و ماژول جذب چندلایه طراحی شده است. در مرحله نخست، یک فیلتر شنی چندلایه به‌عنوان واحد پیش‌تصفیه جهت حذف ذرات معلق و کاهش احتمال گرفتگی بسترهای جذبی در نظر گرفته شده است که نگهداری آن از طریق بک‌واش دوره‌ای انجام می‌شود.

در مرحله دوم، جریان پساب وارد واحد اوزون‌زنی (Ozonation) شده و اوزون تولیدی توسط ژنراتور (۵-۱۰ گرم بر ساعت) از طریق انژکتور و نچوری به جریان تزریق می‌شود. اوزون با شکستن ساختار مولکولی ترکیبات آلی پیچیده، اکسیداسیون سولفیدها و کاهش اولیه COD، بار آلودگی ورودی به ستون جذبی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. علاوه بر این، با ورود جریان حاوی اوزون به لایه اول ماژول، در تماس با نانوذرات $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ واکنش‌های کاتالیزوری رخ داده و رادیکال‌های هیدروکسیل ($\text{OH}^\bullet$) تولید می‌شود که از قوی‌ترین عوامل اکسیدکننده در فرآیندهای تصفیه هستند. این پدیده، سیستم را از یک واحد جذب ساده به یک سامانه Hybrid AOP-Adsorption ارتقا می‌دهد.

در مرحله سوم، جریان وارد ماژول جذب چندلایه می‌شود که شامل سه بستر جاذب با عملکرد مکمل است: نانوذرات مغناطیسی $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ برای فعال‌سازی کاتالیستی اوزون و حذف سریع ترکیبات آلی و فنولی؛ هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای (LDH) برای جذب آنیون‌ها و تبادل یونی؛ کربن فعال گرانولی (GAC) برای پالایش نهایی، جذب محصولات اکسیداسیون و حذف اوزون باقی‌مانده. این آرایش چندمرحله‌ای با هدف کاهش بار آلی، حذف ترکیبات گوگردی، افزایش پایداری عملیاتی و کاهش فولینگ طراحی شده و امکان احیای شیمیایی جاذب‌ها با محلول‌های قلیایی و اسیدی رقیق را فراهم می‌کند. با توجه به افزایش بحران جهانی آب و نیاز صنایع به فناوری‌های پایدار تصفیه، توسعه سامانه‌هایی که بتوانند با راندمان بالا، قابلیت احیا و عملکرد پایدار در محیط‌های قلیایی شدید عمل کنند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بر این اساس، پرسش اصلی این پژوهش آن است که آیا ترکیب پیش‌تصفیه فیزیکی و پیش‌اکسیداسیون اوزونی با یک ماژول جذب چندلایه مبتنی بر $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ، LDH و GAC می‌تواند عملکردی پایدار، کارآمد و قابل توسعه در پیش‌تصفیه پساب اسپنت کاستیک پتروشیمی سازند ارائه دهد یا خیر.

6- سوابق و پیشینه تحقیق

Yadav et al., 2025 (1)

- این مطالعه یک مرور سیستماتیک بر فناوری‌های احیای جاذب‌های اشباع‌شده در تصفیه آب ارائه می‌دهد.
- روش‌های احیای حرارتی، شیمیایی، الکتروشیمیایی و بیولوژیک را با تأکید بر کارایی و اثرات زیست‌محیطی مقایسه می‌کند.
- نشان می‌دهد که فناوری‌های کم‌مصرف و مبتنی بر چرخه‌پذیری بهترین گزینه برای ایجاد اقتصاد چرخشی آب هستند.
- محدودیت‌های انرژی، هزینه و پایداری ماده جاذب بررسی می‌شود.

- در نهایت مسیر توسعه سیستم‌های تصفیه پایدار و احیاپذیر را ترسیم می‌کند.

Uyo et al., 2025 (2)

- مقاله یک جمع‌بندی عمیق از فناوری‌های نوین تصفیه آب با تمرکز ویژه بر جذب ارائه می‌دهد.
- انواع جاذب‌ها (نانومواد، بیوچار، کامپوزیت‌ها، MOFها) با کارایی حذف آلاینده‌ها مقایسه شده‌اند.
- چالش‌هایی مانند اشباع سریع، احیاپذیری پایین و فولینگ مطرح می‌شود.
- راهکارهای ترکیبی مانند جذب-غشا یا جذب-کاتالیست مورد تأکید قرار گرفته‌اند.
- پژوهش نتیجه می‌گیرد که جاذب‌های هیبریدی آینده اصلی فناوری تصفیه هستند.

Crini & Lichtfouse, 2019 (3)

این مقاله مروری روش‌های مختلف تصفیه فاضلاب شامل جذب، انعقاد، اکسیداسیون پیشرفته و غشا را مقایسه می‌کند. مزایا و محدودیت‌های هر فناوری از نظر هزینه، کارایی حذف آلاینده‌ها و مقیاس‌پذیری بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که فرآیند adsorption به دلیل سادگی، راندمان بالا و انعطاف‌پذیری یکی از گزینه‌های مناسب برای حذف آلاینده‌های آلی و معدنی است. این مطالعه نقش جاذب‌های پیشرفته در بهبود کارایی سیستم‌های تصفیه آب را برجسته می‌کند.

Foo & Hameed, 2010 (4)

این مقاله به بررسی مدل‌های مختلف ایزوترم جذب مانند Freundlich, Langmuir و Temkin می‌پردازد. روش‌های تحلیل داده‌های جذب برای تعیین ظرفیت جذب و مکانیزم فرآیند ارائه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد انتخاب مدل مناسب برای تحلیل رفتار جاذب‌ها در طراحی سیستم‌های تصفیه بسیار مهم است. این مدل‌ها ابزار مهمی برای طراحی ستون‌های جذب صنعتی محسوب می‌شوند.

Ho & McKay, 1999(5)

این مطالعه مدل Pseudo-Second Order را برای توصیف سینتیک فرآیندهای جذب ارائه می‌دهد. مدل پیشنهادی توانایی بالایی در پیش‌بینی رفتار جذب در سیستم‌های محلولی دارد. نتایج نشان می‌دهد که بسیاری از فرآیندهای جذب شیمیایی با این مدل تطابق خوبی دارند.

این مدل در طراحی و تحلیل سیستم‌های جذب در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی کاربرد گسترده‌ای دارد.

Ruthven, 1984(6

این کتاب یکی از منابع کلاسیک در زمینه اصول و فرآیندهای جذب است. مباحثی مانند ترمودینامیک جذب، انتقال جرم و طراحی بسترهای ثابت به‌طور جامع بررسی شده‌اند. مدل‌های طراحی ستون‌های جذب و رفتار جاذب‌ها در سیستم‌های پیوسته ارائه شده است. این منبع پایه نظری مهمی برای طراحی packed-bed adsorption columns محسوب می‌شود

Kaushik et al., 2024 (7

- این تحقیق اثر وزن مولکولی مختلف یک آنتی‌اسکلانت پلی‌اکریلیک اسید (PAA) را بر رسوب‌گیری بررسی می‌کند.

- نتایج نشان می‌دهد که اجزای با وزن مولکولی متوسط عملکرد بهتری در مهار تشکیل رسوبات دارند.

- تعامل آنتی‌اسکلانت با یون‌های کلسیم و منیزیم به‌صورت دقیق تحلیل شده است.

- ساختار مولکولی عامل ضد رسوب تأثیر مستقیم بر کنترل رشد کریستال‌ها دارد.

- مطالعه راهنمای مفیدی برای انتخاب مواد کنترل رسوب در سیستم‌های صنعتی ارائه می‌دهد.

(Ganaraja et al., 2024 (Bioengineered (8

- این مقاله پدیده بیوفولینگ را از دیدگاه سیستم‌های زیستی و مکانیسم quorum sensing بررسی می‌کند.

- نتایج نشان می‌دهد که QS یکی از عوامل اصلی تشکیل بیوفیلم در تجهیزات صنعتی است.

- راهکار quorum quenching برای مهار مسیرهای ارتباط سلولی معرفی شده است.

- مزیت این روش کاهش فولینگ بدون استفاده از مواد شیمیایی تهاجمی است.

- مطالعه مسیر توسعه روش‌های زیستی کنترل رسوب را تقویت می‌کند.

(Ganaraja & Mulky, 2024 (Environmental Technology Reviews (9

- این مقاله نسخه توسعه‌یافته‌ای از بررسی بیوفولینگ در سیستم‌های تصفیه آب است.

- رویکردهای زیستی برای کنترل فولینگ در مقابل روش‌های شیمیایی مقایسه شده‌اند.

- مکانیسم‌های QS و QQ از نظر کاربرد صنعتی و پایداری محیطی تحلیل شده‌اند.

- چالش‌های مقیاس‌پذیری و هزینه اجرای این فناوری‌ها نیز مطرح شده است.

- مقاله نشان می‌دهد که مهندسی میکروبی می‌تواند نقش مهمی در آینده کنترل فولینگ داشته باشد.

Feng & Wang, 2024 (10

- هدف مقاله بررسی بازیابی یون‌های فلزی با ترکیب فناوری غشا و فرآیند جذب است.

- هم‌افزایی میان نانوجاذب‌ها و غشاهای انتخاب‌پذیر در افزایش راندمان جداسازی نشان داده شده است.
- کاربرد این فناوری در بازیابی فلزاتی مانند Cu، Zn و Ni مورد بررسی قرار گرفته است.
- بازده بالا و مصرف انرژی کمتر نسبت به روش‌های سنتی گزارش شده است.
- با این حال چالش‌هایی مانند فولینگ و انتخاب‌پذیری همچنان نیازمند بهبود هستند.

11 Haghghi Mood et al., 2024

- مطالعه روی بیوچار اصلاح‌شده با آهن و نیتروژن برای حذف نیترات از آب انجام شده است.
- اصلاح ساختاری باعث افزایش سطح فعال و ایجاد عملکرد انتخابی در جذب شده است.
- مدل‌های سینتیکی و ایزوترمی کارایی بالای جذب را تأیید کرده‌اند.
- عملکرد جاذب در شرایط pH متغیر و محیط‌های واقعی بررسی شده است.
- نتایج نشان می‌دهد که بیوچار اصلاح‌شده می‌تواند گزینه‌ای اقتصادی برای حذف آلاینده‌ها باشد.

12 Satyam & Patra, 2024

- این مقاله یک مرور جامع درباره فرآیند جذب و چالش‌های آن در تصفیه فاضلاب ارائه می‌دهد.
- عوامل مؤثر بر کارایی شامل ساختار سطح، ظرفیت، سرعت جذب و قابلیت احیا بررسی شده‌اند.
- چالش‌هایی نظیر رسوب‌گذاری، اشباع سریع جاذب و هزینه تولید مطرح شده است.
- فناوری‌های آینده مانند جاذب‌های هوشمند و خوداحیا مورد توجه قرار گرفته‌اند.
- مقاله نقشه راه توسعه نسل جدید مواد جذبی را ارائه می‌دهد.

13 Kazemi et al., 2025

- در این پژوهش یک ساختار چندلایه هیبریدی برای حذف هیدروکربن‌های آلی از پساب صنعتی طراحی شده است.
- آرایش لایه‌ها موجب افزایش سطح فعال و بهبود انتقال جرم شده است.
- ماده توسعه‌یافته قابلیت احیا و استفاده مجدد در چرخه‌های متعدد را نشان داده است.
- نتایج مزیت ساختارهای چندلایه در افزایش راندمان و پایداری عملیاتی را تأیید می‌کند.

14 Metcalf & Eddy, 2014

- این کتاب مرجع استاندارد مهندسی تصفیه فاضلاب است که فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی را توضیح می‌دهد.

روش‌های مختلف حذف آلاینده‌ها در فاضلاب شهری و صنعتی بررسی شده‌اند.
نقش پیش‌تصفیه، فیلتراسیون و فرآیندهای جذب در بهبود کیفیت پساب تشریح شده است.
این منبع به‌طور گسترده برای طراحی سیستم‌های تصفیه آب و فاضلاب صنعتی استفاده می‌شود.

Terrigeol & Trifilieff, 2015 (15)

- این پژوهش به اصول طراحی بسترهای جاذب و افزایش طول عمر آن‌ها در واحدهای صنعتی می‌پردازد.
- عوامل مهمی مانند توزیع جریان، فشار، دما و زمان تماس بررسی شده‌اند.
- نتایج نشان می‌دهد که طراحی نامناسب بستر می‌تواند موجب کاهش شدید بهره‌وری شود.
- راهکارهایی برای جلوگیری از افت عملکرد و بهینه‌سازی عملکرد بستر ارائه شده است.
- مقاله یکی از منابع مرجع در طراحی مهندسی واحدهای جذب صنعتی محسوب می‌شود.

Weber & Morris, 1963 (16)

- این مطالعه مدل Intraparticle Diffusion را برای تحلیل مکانیزم جذب معرفی می‌کند.
- مدل نشان می‌دهد انتقال جرم در داخل ذرات جاذب یکی از مراحل کنترل‌کننده فرآیند جذب است.
- نتایج برای تحلیل مراحل مختلف جذب شامل انتقال فیلمی و نفوذ درون‌ذره‌ای کاربرد دارند.
- این مدل در تحلیل داده‌های سینتیکی سیستم‌های جذب بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد.

Nouhou Moussa et al., 2025 (17)

- این مقاله سیستم‌های ترکیبی خورشیدی-غشایی برای تصفیه پساب را بررسی می‌کند.
- مزیت اصلی این سامانه‌ها کاهش مصرف انرژی و افزایش خودکفایی عملیاتی است.
- طراحی‌های مختلف غشا و نحوه استفاده از انرژی خورشیدی معرفی شده‌اند.
- مشکلاتی مانند ناپایداری حرارتی و رسوب‌گذاری نیز تحلیل شده‌اند.
- نتیجه مقاله نشان می‌دهد که این فناوری‌ها برای مناطق با محدودیت انرژی مناسب هستند.

Crittenden et al., 2012 (18)

- این کتاب اصول طراحی سیستم‌های تصفیه آب با تمرکز بر فرآیندهای جذب و کربن فعال را ارائه می‌دهد.
- پارامترهای مهم طراحی مانند زمان تماس، ارتفاع بستر و سرعت جریان بررسی شده‌اند.
- کاربرد کربن فعال در حذف ترکیبات آلی و آلاینده‌های مقاوم مورد مطالعه قرار گرفته است.
- این منبع راهنمای مهمی برای طراحی fixed-bed adsorption systems محسوب می‌شود.

بررسی مکانیزم‌های انتقال جرم در بسترهای جذب ثابت (Fixed Bed).
مدل‌های Thomas و Yoon–Nelson برای پیش‌بینی زمان شکست ارائه شده‌اند.
اثر سرعت جریان و اندازه ذرات بر راندمان بررسی شده است.
یافته‌ها برای طراحی صنعتی ستون‌های جذب کاربرد دارد.

Barman, 2025 (20)

- این مقاله روی مواد هیبریدی سیلیکا-کامپوزیت برای حذف فلزات سنگین تمرکز دارد.
- ترکیب سیلیکا با فازهای آلی و معدنی موجب افزایش ظرفیت جذب شده است.
- سطح فعال بالا و پایداری حرارتی از مزایای این مواد گزارش شده است.
- کاربرد آن‌ها در حذف یون‌هایی مانند Pb^{2+} و Cd^{2+} بررسی شده است.
- نتایج نشان می‌دهد که مواد هیبریدی گزینه‌ای مناسب برای تصفیه صنعتی هستند.

Rahman et al., 2023 (21)

این پژوهش عملکرد فیلترهای شنی چندلایه (Multimedia Sand Filters) را در پیش‌تصفیه فاضلاب صنعتی بررسی کرده است.

حذف مؤثر مواد معلق و کاهش کدورت پیش از ورود به واحدهای پایین‌دست گزارش شده است.
استفاده از این فیلترها موجب کاهش فولینگ در ستون‌های جذب و افزایش طول عمر جاذب‌ها می‌شود.
نگهداری سیستم از طریق بک‌واش دوره‌ای انجام شده و افت فشار کنترل شده است.
نتایج اهمیت پیش‌تصفیه فیزیکی در طراحی سامانه‌های چندمرحله‌ای صنعتی را تأیید می‌کند.

Hussain et al., 2025 (22)

- مقاله نقش جاذب‌های پیشرفته در حذف آلاینده‌های پیچیده را بررسی می‌کند.
- مواد نوظهوری مانند MOF، COF و نانوکامپوزیت‌ها تحلیل شده‌اند.
- این مواد ظرفیت جذب بالا و پایداری چرخه‌ای مناسبی دارند.
- با این حال چالش‌هایی مانند مقیاس‌پذیری صنعتی مطرح است.
- مقاله تأکید می‌کند که جاذب‌های پیشرفته آینده فناوری تصفیه خواهند بود.

Gkika & Kyzas, 2026 (23)

- این مقاله به استفاده مجدد از جاذب‌های مصرف‌شده در چارچوب اقتصاد چرخشی می‌پردازد.
- کاربردهای جدید برای جاذب‌های اشباع‌شده معرفی شده است.

- تحلیل چرخه عمر نشان می‌دهد که بازیافت جاذب‌ها می‌تواند هزینه‌ها را کاهش دهد.
- چالش‌هایی مانند پایداری مکانیکی و محدودیت‌های قانونی مطرح شده‌اند.
- مقاله نشان می‌دهد که بازیافت جاذب‌ها یک حوزه در حال رشد در صنعت تصفیه است.

Li et al., 2024 (24)

- این مطالعه رفتار *fouling* در سیستم‌های تصفیه مبتنی بر جذب را بررسی می‌کند.
- عوامل مؤثر بر کاهش کارایی جاذب‌ها در عملیات طولانی مدت تحلیل شده‌اند.
- روش‌های کاهش گرفتگی شامل پیش تصفیه و اصلاح سطح جاذب‌ها پیشنهاد شده است.
- نتایج نشان می‌دهد مدیریت *fouling* برای پایداری سیستم‌های جذب صنعتی ضروری است.

Zhang et al., 2024 (25)

- این مطالعه عملکرد *LDH* هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای (LDH) را در حذف ترکیبات آلی و آنیونی بررسی می‌کند.
- ساختار لایه‌ای LDH باعث ایجاد مکان‌های فعال برای تبادل یونی و جذب سطحی می‌شود.
- نتایج نشان می‌دهد که LDH در محیط‌های قلیایی نیز پایداری قابل قبولی دارد.
- سینتیک جذب سریع و ظرفیت بالا برای ترکیبات فنولی گزارش شده است.
- مقاله کاربرد LDH را در تصفیه فاضلاب‌های صنعتی پیچیده پیشنهاد می‌کند.

Wang et al., 2023 (26)

- این تحقیق کاربرد *GAC* کربن فعال گرانولی (GAC) را در حذف ترکیبات آلی محلول بررسی می‌کند.
- ساختار متخلخل و سطح ویژه بالا موجب افزایش ظرفیت جذب COD می‌شود.
- عملکرد جاذب در شرایط عملیاتی مختلف مانند pH، دما و زمان تماس تحلیل شده است.
- نتایج نشان می‌دهد که GAC به عنوان مرحله پالایش نهایی بسیار مؤثر است.
- قابلیت احیای حرارتی و شیمیایی نیز مورد تأیید قرار گرفته است.

Chen et al., 2025 (27)

- این مقاله سیستم‌های *چندمرحله‌ای جذب* را برای افزایش راندمان حذف آلاینده‌ها بررسی می‌کند.
- ترکیب چند جاذب با مکانیسم‌های متفاوت باعث افزایش کارایی کلی سیستم شده است.
- نتایج نشان می‌دهد که ترتیب قرارگیری لایه‌ها در بستر جذب نقش مهمی در عملکرد دارد.

- سیستم‌های چندلایه توانایی حذف طیف گسترده‌تری از آلاینده‌ها را دارند.
- این پژوهش پایه علمی برای طراحی ماژول‌های هیبریدی فراهم می‌کند.

Singh et al., 2024 (28)

- مطالعه روی تصفیه فاضلاب‌های با **COD** بالا با استفاده از جاذب‌های نانوساختار انجام شده است.
- نتایج نشان می‌دهد که استفاده از نانوجاذب‌ها می‌تواند کاهش قابل توجهی در **COD** ایجاد کند.
- عملکرد سیستم در شرایط واقعی فاضلاب صنعتی نیز بررسی شده است.
- چالش‌هایی مانند اشباع سریع جاذب و نیاز به احیا مطرح شده است.
- پژوهش استفاده از سیستم‌های ترکیبی را برای افزایش پایداری پیشنهاد می‌کند.

Liu et al., 2024 (29)

- این تحقیق به بررسی **مکانیزم‌های انتقال جرم در بسترهای جذبی ثابت (Fixed Bed Adsorption)** می‌پردازد.
- مدل‌های پیش‌بینی زمان شکست (**Breakthrough curve**) برای طراحی صنعتی ارائه شده‌اند.
- نتایج نشان می‌دهد که اندازه ذرات و سرعت جریان تأثیر مستقیم بر راندمان دارند.
- مدل‌های ریاضی برای طراحی ستون‌های جذب توسعه یافته است.
- این مطالعه در طراحی مقیاس صنعتی واحدهای جذب کاربرد دارد.

Rahman et al., 2023 (30)

- مقاله کاربرد **فیلترهای چندلایه شنی (Multimedia Sand Filters)** در پیش تصفیه فاضلاب صنعتی را بررسی می‌کند.
- این فیلترها توانایی حذف مؤثر ذرات معلق و کاهش کدورت را دارند.
- استفاده از آن‌ها موجب کاهش گرفتگی تجهیزات پایین‌دست می‌شود.
- نگهداری سیستم عمدتاً با عملیات بک‌واش انجام می‌شود.
- مطالعه اهمیت پیش تصفیه فیزیکی در افزایش عمر واحدهای تصفیه را نشان می‌دهد.

Park et al., 2025 (31)

- این پژوهش بر روی **نانوکامپوزیت‌های هیبریدی سیلیکا-کربن** برای جذب آلاینده‌های آلی تمرکز دارد.
- ترکیب ساختار سیلیکا و کربن فعال موجب افزایش سطح فعال و پایداری مکانیکی شده است.
- نتایج ظرفیت جذب بالایی برای ترکیبات آلی آروماتیک نشان داده‌اند.
- عملکرد در چندین چرخه احیا مورد بررسی قرار گرفته است.

- این مواد برای استفاده در سیستم‌های تصفیه پیشرفته پیشنهاد شده‌اند.

Ahmed et al., 2024 (32)

- این مقاله فناوری‌های تصفیه **Spent Caustic** در صنایع پالایشگاهی و پتروشیمی را بررسی می‌کند.
- روش‌هایی مانند اکسیداسیون پیشرفته، جذب، بیولوژیکی و ترکیبی تحلیل شده‌اند.
- نتایج نشان می‌دهد که هیچ روش منفردی قادر به حذف کامل آلاینده‌ها نیست.
- سیستم‌های ترکیبی بهترین عملکرد را برای کاهش COD و ترکیبات گوگردی دارند.
- پژوهش بر اهمیت طراحی فرآیند چندمرحله‌ای تأکید می‌کند.

Zhao et al., 2024 (33)

- این مطالعه به بررسی حذف ترکیبات فنولی در محیط‌های قلیایی با استفاده از جاذب‌های اصلاح‌شده می‌پردازد.
- نتایج نشان می‌دهد که در pH بالا، مکانیسم‌های جذب الکترواستاتیکی و $\pi-\pi$ نقش غالب دارند.
- اصلاح سطح جاذب موجب افزایش انتخاب‌پذیری نسبت به ترکیبات آروماتیک شده است.
- مدل‌های لانگمویر و فروندلیچ برای توصیف رفتار جذب استفاده شده‌اند.
- یافته‌ها برای تصفیه پساب‌های قلیایی با بار آلی بالا کاربردی است.

Al-Mashaqbeh et al., 2023 (34)

- مقاله بر حذف ترکیبات گوگردی (سولفیدها و مرکاپتان‌ها) از فاضلاب صنعتی تمرکز دارد.
- استفاده از مواد معدنی اصلاح‌شده موجب افزایش ظرفیت تبادل یونی شده است.
- نتایج نشان می‌دهد که حذف سولفیدها به‌طور مستقیم موجب کاهش بو و COD می‌شود.
- پایداری جاذب در محیط‌های خورنده بررسی شده است.
- این مطالعه اهمیت جذب اختصاصی ترکیبات گوگردی را برجسته می‌کند.

Roy et al., 2025 (35)

- پژوهش درباره طراحی بسترهای جذبی با توزیع یکنواخت جریان برای جلوگیری از Channeling است.
- استفاده از صفحات توزیع‌کننده و طراحی مناسب دانه‌بندی پیشنهاد شده است.
- نتایج نشان می‌دهد که توزیع نامناسب جریان می‌تواند تا ۳۰٪ راندمان را کاهش دهد.
- مدل‌سازی CFD برای بهینه‌سازی طراحی استفاده شده است.
- این تحقیق برای مقیاس‌گذاری صنعتی بسیار مهم است.

El-Naggar et al., 2024 (36)

- این مقاله به بررسی اثر دمای عملیاتی بر ظرفیت جذب در فاضلاب صنعتی می‌پردازد.
- نتایج نشان می‌دهد که فرآیند جذب غالباً گرمازا است و با افزایش دما ظرفیت کاهش می‌یابد.
- پارامترهای ترمودینامیکی مانند ΔH و ΔG محاسبه شده‌اند.
- پایداری جاذب در دماهای بالا نیز تحلیل شده است.

- یافته‌ها برای طراحی سیستم‌های صنعتی با دمای متغیر اهمیت دارد.

Ortega et al., 2025 (37)

- مطالعه‌ای بر احیای شیمیایی کربن فعال با استفاده از NaOH و اسید رقیق.
- نتایج نشان می‌دهد که احیای قلیایی برای حذف ترکیبات آلی اسیدی مؤثرتر است.
- چرخه‌های متعدد احیا بدون افت شدید ظرفیت گزارش شده است.
- آنالیز ساختاری پس از احیا با BET و SEM انجام شده است.
- این پژوهش مبنای انتخاب استراتژی احیای GAC در سیستم‌های صنعتی است.

Hassan et al., 2024 (38)

- مقاله بر عملکرد LDH در حذف آنیون‌های پیچیده در pH بالا تمرکز دارد.
- مکانیسم غالب تبادل یونی و جذب بین‌لایه‌ای گزارش شده است.
- ساختار LDH پس از چندین چرخه احیا پایدار باقی مانده است.
- کاهش قابل توجه در غلظت سولفات و سولفید مشاهده شده است.
- این مطالعه قابلیت استفاده LDH در پساب‌های قلیایی را تأیید می‌کند.

Martins et al., 2023 (39)

- این پژوهش به تحلیل اقتصادی سیستم‌های جذب در مقیاس صنعتی می‌پردازد.
- هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه عملیاتی مقایسه شده‌اند.
- نتایج نشان می‌دهد که استفاده از جاذب‌های قابل احیا هزینه کل را کاهش می‌دهد.
- تحلیل حساسیت برای قیمت انرژی و مواد شیمیایی انجام شده است.
- مقاله اهمیت طراحی اقتصادی در کنار عملکرد فنی را نشان می‌دهد.

Gupta et al., 2026 (40)

- مقاله توسعه نانوجاذب‌های مغناطیسی هیبریدی با پایداری شیمیایی بالا را بررسی می‌کند.
- پوشش‌دهی سیلیکا باعث افزایش مقاومت در محیط‌های قلیایی شده است.
- ظرفیت جذب بالا برای ترکیبات آلی گوگردار گزارش شده است.
- جداسازی سریع با میدان مغناطیسی مزیت عملیاتی ایجاد می‌کند.
- این فناوری برای پیش‌تصفیه در سیستم‌های چندمرحله‌ای مناسب است.

Tran et al., 2024 (41)

- این مطالعه اثر زمان تماس و ارتفاع بستر در ستون‌های جذب پیوسته را بررسی می‌کند.
- منحنی‌های شکست برای طراحی بهینه ستون استخراج شده‌اند.
- نتایج نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع بستر موجب افزایش زمان شکست می‌شود.
- مدل توماس و Yoon-Nelson برای پیش‌بینی عملکرد استفاده شده است.
- یافته‌ها برای طراحی صنعتی بستر ثابت کاربرد مستقیم دارد.

Nair & Krishnan, 2025 (42)

- مقاله به بررسی سیستم‌های تصفیه ماژولار با قابلیت تعویض سریع جاذب می‌پردازد.
- مزیت اصلی کاهش زمان توقف (Downtime) در واحد صنعتی است.
- طراحی کارتریجی برای لایه‌های مختلف جاذب معرفی شده است.
- نتایج نشان می‌دهد که این ساختار انعطاف‌پذیری بالایی در بهره‌برداری دارد.
- پژوهش کاربرد ماژول‌های چندلایه در تصفیه فاضلاب‌های پیچیده صنعتی را توصیه می‌کند.

Torres et al., 2024 (43)

- این پژوهش به بررسی کاربرد ****کربن فعال در حذف ترکیبات آلی مقاوم (Refractory organics)**** از فاضلاب‌های صنعتی می‌پردازد.
- نتایج نشان می‌دهد که ساختار میکرو و مزوحفره‌ای کربن فعال نقش مهمی در جذب ترکیبات آروماتیک دارد.
- پارامترهایی مانند pH، زمان تماس و اندازه ذرات جاذب بر راندمان جذب تأثیرگذار هستند.
- آزمایش‌ها نشان داده‌اند که GAC می‌تواند کاهش قابل توجهی در COD ایجاد کند.
- قابلیت احیا و استفاده مجدد در چند چرخه عملیاتی نیز تأیید شده است.

Patel et al., 2025 (44)

- این مطالعه طراحی ****سیستم‌های هیبریدی تصفیه فاضلاب صنعتی**** مبتنی بر ترکیب چند فناوری را بررسی می‌کند.
- ترکیب فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و جذبی موجب افزایش راندمان حذف آلاینده‌ها شده است.
- نتایج نشان می‌دهد که سیستم‌های چندمرحله‌ای برای فاضلاب‌های پیچیده مانند پساب‌های پالایشگاهی مناسب‌تر هستند.
- تحلیل عملکرد سیستم در مقیاس پایلوت انجام شده است.
- پژوهش تأکید می‌کند که طراحی ماژولار و چندلایه می‌تواند پایداری عملیاتی سیستم را افزایش دهد.

Beltrán, 2004 (45)

- کتاب *Ozone Reaction Kinetics for Water and Wastewater Systems* یکی از منابع کلاسیک و مرجع در زمینه مکانیزم‌های واکنش اوزون است.
- سینتیک واکنش مستقیم اوزون و مسیرهای تشکیل رادیکال هیدروکسیل ($\text{OH}^\bullet$) به صورت جامع بررسی شده است.
- اثر pH، دما و حضور کاتالیست‌های فلزی بر تجزیه اوزون تحلیل شده است.
- نقش اوزون در تخریب ترکیبات فنولی، سولفیدی و ترکیبات آروماتیک مورد تأکید قرار گرفته است.
- این منبع پایه نظری قوی برای توجیه استفاده از اوزون در تصفیه پساب‌های با COD بالا فراهم می‌کند.

von Gunten, 2003 (46)

مقاله مروری جامع درباره شیمی اوزون در آب و مقایسه اکسیداسیون مستقیم و غیرمستقیم (رادیکالی) ارائه می‌دهد.

تفاوت عملکرد اوزون در محیط‌های قلیایی و اسیدی بررسی شده است. نشان می‌دهد که در pH بالا، تجزیه اوزون تسریع شده و تولید $\text{OH}^\bullet$ افزایش می‌یابد. مسیره‌های اکسیداسیون ترکیبات آلی مقاوم و حذف میکروآلاینده‌ها تحلیل شده است. نتایج مقاله اهمیت استفاده از اوزون در پساب‌های قلیایی نظیر اسپنت کاستیک را تقویت می‌کند.

Nawrocki & Kasprzyk-Hordern, 2010 (47)

مقاله‌ای مروری درباره اوزون‌زنی کاتالیستی (Catalytic Ozonation) در حضور اکسیدهای فلزی. نقش کاتالیست‌های آهن، منگنز و آلومینا در افزایش تولید رادیکال هیدروکسیل بررسی شده است. مکانیزم‌های سطحی فعال‌سازی اوزون و بهبود راندمان حذف COD تحلیل شده‌اند. مقایسه بین اوزون تنها و اوزون کاتالیستی از نظر راندمان و هزینه عملیاتی ارائه شده است. نتیجه‌گیری می‌کند که ترکیب اوزون با کاتالیست‌های فلزی یک راهکار مؤثر برای پساب‌های با بار آلی بالا است.

7- فرضیه‌ها یا پرسشهای تحقیق

1. هم‌افزایی نانوترکیبات و اکسیداسیون کاتالیستی مکانیسم هم‌افزایی نانوذرات مغناطیسی $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ، هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای (LDH) و کربن فعال گرانولی (GAC) در حضور مرحله پیش‌اکسیداسیون اوزونی چگونه می‌تواند از طریق فعال‌سازی کاتالیستی اوزون و تولید رادیکال‌های هیدروکسیل $(\cdot\text{OH})(\cdot\text{OH})$ موجب تجزیه ترکیبات آلی پیچیده، افزایش ظرفیت جذب اختصاصی و کاهش پدیده فولینگ در مقایسه با سیستم‌های تک‌ماده‌ای گردد؟

2. هیدرولیک، انتقال جرم و تماس گاز-مایع طراحی هندسی ماژول چندلایه و نحوه تزریق اوزون از طریق سیستم‌های اختلاط (مانند انژکتور ونچوری) چه تأثیری بر کارایی انتقال جرم گاز-مایع، پروفیل توزیع سرعت، کاهش افت فشار استاتیک و جلوگیری از پدیده Channeling در جریان‌های پرفشار پساب صنعتی خواهد داشت؟

3. پایداری عملیاتی در سامانه هیبریدی استفاده همزمان از پیش‌اکسیداسیون اوزونی و محلول‌های احیاکننده بهینه در محیط‌های قلیایی و اسیدی کنترل شده تا چه حد می‌تواند از اشباع سریع بسترها جلوگیری کرده، پایداری ساختاری جاذب‌ها را حفظ نموده و هزینه‌های عملیاتی سیستم را در مقیاس صنعتی کاهش دهد؟

4. راندمان حذف آلاینده‌های هدف

سامانه ترکیبی شامل پیش تصفیه فیزیکی، پیش اکسیداسیون اوزونی و ماژول جذب چندلایه (Sand Filter / $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ / LDH / GAC) در شرایط واقعی پساب اسپنت کاستیک با pH بالا و شوری زیاد تا چه میزان قادر به حذف همزمان COD، یون های سولفیدی و ترکیبات فنولی است؟

۵. بهینه سازی ساختاری و عملکردی سیستم

ضخامت بهینه هر لایه و ترتیب چیدمان اجزا در ماژول چندلایه در حضور مرحله اوزون زنی چگونه باید تعیین شود تا حداکثر کارایی فرآیندهای اکسیداسیون و جذب همراه با حداقل افت فشار هیدرولیکی و مصرف انرژی حاصل گردد؟

۶. ارزیابی خاصیت ضد رسوب (Anti-fouling)

آیا اصلاح سطح نانوذرات با پوشش های سیلیکاتی، همراه با پیش تصفیه فیزیکی و مرحله پیش اکسیداسیون اوزونی، می تواند با تجزیه ترکیبات آلی سنگین و کاهش بار آلودگی ورودی به بستر جذب، منجر به کاهش بیش از ۴۰٪ نرخ گرفتگی سطحی و افزایش طول عمر عملیاتی ماژول نسبت به سیستم های متداول شود؟

۷- مکانیسم و شیمی سطح احیا

"مکانیسم اکسیداسیون-حلالیت ترکیبات جذب شده (سولفیدها و فنولاتها) در فرآیند احیای شیمیایی با محلول $\text{NaOH}/\text{H}_2\text{O}_2$ چیست؟ چه محصولات واسطه و نهایی (با استفاده از GC-MS، TOC و IC) تشکیل می شوند و سینتیک احیا (ثابت نرخ بازیابی ظرفیت) چگونه به غلظت عوامل اکسیدان، pH و دما وابسته است؟

۸. اهداف تحقیق (شامل اهداف علمی، کاربردی، و ضرورت های خاص انجام تحقیق)

۱. اهداف علمی (Scientific Objectives)

هدف اصلی علمی این پژوهش، تبیین مکانیسم های هم افزایی بین فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته و جذب در یک بستر نانوترکیب است:

تبیین مکانیسم اوزون زنی کاتالیستی سطحی: بررسی نقش نانوذرات $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ به عنوان کاتالیست ناهمگن در فعال سازی مولکول های اوزون و تولید رادیکال های آزاد $(\cdot\text{OH})$ جهت تخریب ترکیبات آلی مقاوم (Refractory COD).

مدل سازی سینتیک و تعادل در بستر ترکیبی: استخراج مدل های ریاضی برای توصیف رفتار همزمان اکسیداسیون، تبادل یونی (توسط LDH) و جذب فیزیکی (توسط GAC) در یک جریان پیوسته.

تحلیل دینامیک سیالات و انتقال جرم: مطالعه تأثیر چیدمان لایه ای با دانه بندی گرادینانی بر پروفیل سرعت و نرخ انتقال جرم در شرایط عملیاتی پرفشار.

بررسی پایداری نانوساختارهای هیبریدی: ارزیابی مقاومت شیمیایی و پایداری ساختاری نانوذرات اصلاح شده در محیط های به شدت قلیایی ($\text{pH} > 12$) و شور.

۲. اهداف کاربردی (Applied Objectives)

هدف نهایی این بخش، دستیابی به یک دانش فنی (Know-how) برای بومی سازی تجهیزات تصفیه پساب های سمی است:

توسعه پروتوتایپ صنعتی (Pilot-Scale Unit): طراحی و ساخت یک ماژول تصفیه با قابلیت نصب در مسیر جریان‌های جانبی (Side-stream) واحدهای پتروشیمی.

کاهش هزینه‌های عملیاتی (OPEX): جایگزینی فرآیندهای گران‌قیمت یا یک‌بار مصرف با فناوری جاذب‌های هیبریدی احیاءپذیر با هدف کاهش حداقل ۳۰ درصدی هزینه‌ها.

بهینه‌سازی نرخ حذف آلاینده‌های هدف: دستیابی به راندمان استاندارد در حذف همزمان COD، سولفیدها و فنول‌ها جهت بازچرخانی پساب یا دفع ایمن.

تدوین پروتکل احیای درجا (In-situ Regeneration): دستیابی به روشی برای بازیابی بیش از ۸۰٪ ظرفیت بستر بدون نیاز به توقف طولانی خط تولید یا دمونتاژ تجهیزات.

۳. ضرورت‌های خاص انجام تحقیق (Significance & Necessity)

چرا این تحقیق برای صنعت و محیط‌زیست حیاتی است؟

بحران پساب اسپنت‌کاستیک در ایران: این پساب یکی از خطرناک‌ترین خروجی‌های پالایشگاه‌ها و پتروشیمی‌هاست که به دلیل pH بسیار بالا و سمیت شدید، سیستم‌های تصفیه بیولوژیکی متداول را از کار می‌اندازد.

ناکارآمدی روش‌های تک‌مرحله‌ای: روش‌های جذب ساده (مانند فقط کربن فعال) به سرعت دچار اشباع و "گرفتگی شدید" (Fouling) می‌شوند. ترکیب اوزون با جذب، پاسخی به این محدودیت فنی است.

جلوگیری از خروج ارز: در حال حاضر بسیاری از کاتالیست‌ها و جاذب‌های پیشرفته وارداتی هستند؛ تولید بستر هیبریدی داخلی گامی در جهت خودکفایی صنعتی است.

الزامات سخت‌گیرانه زیست‌محیطی: با توجه به جریمه‌های سنگین سازمان حفاظت محیط‌زیست برای پساب‌های حاوی سولفید و فنول، ارائه یک راهکار اقتصادی و با راندمان بالا برای صنایع الزامی است.

مدیریت پدیده فولینگ: توسعه دانش سطح برای کاهش ۴۰ درصدی نرخ گرفتگی، عمر مفید تجهیزات صنعتی را به شدت افزایش داده و زمان توقف فرآیند را کاهش می‌دهد.

۹. در صورت داشتن هدف کاربردی بیان نام بهره‌وران (اعم از مؤسسات آموزشی و اجرایی و غیره)

۱. بهره‌وران صنعتی

این پژوهش به‌طور مستقیم برای صنایع دارای جریان‌های پساب قلیایی، سولفیدی و فنولی قابل استفاده است، از جمله:

پالایشگاه‌های نفت و گاز

مجتمع‌های پتروشیمی

واحدهای شیرین‌سازی و مرکاپتان‌زدایی

صنایع شیمیایی تولیدکننده مواد قلیایی

صنایع دارای جریان اسپنت‌کاستیک و پساب‌های با COD بالا

در این واحدها، سامانه هیبریدی پیشنهادی می‌تواند برای پیش‌تصفیه، تصفیه تکمیلی، کاهش بار آلودگی، کنترل فولینگ و کاهش هزینه‌های عملیاتی مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

۲. بهره‌وران اجرایی و نظارتی

یافته‌های این تحقیق می‌تواند برای نهادهای تصمیم‌گیر، سیاست‌گذار و بهره‌بردار در حوزه محیط‌زیست و مدیریت پساب صنعتی مفید باشد، از جمله:

سازمان حفاظت محیط‌زیست

شرکت ملی پالایش و پخش فرآورده‌های نفتی ایران

شرکت ملی صنایع پتروشیمی

شرکت‌های آب و فاضلاب صنعتی

شرکت‌های مشاور و پیمانکار حوزه طراحی و بهره‌برداری تصفیه‌خانه‌ها

واحدهای HSE در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی

نتایج این پژوهش می‌تواند در تدوین دستورالعمل‌های اجرایی، ارتقای استانداردهای تصفیه و اصلاح یا بازطراحی واحدهای موجود به کار گرفته شود.

۳. بهره‌وران علمی و پژوهشی

از منظر علمی، این پژوهش برای مراکز دانشگاهی و پژوهشی فعال در حوزه تصفیه پساب‌های صنعتی، نانومواد و فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته قابل بهره‌برداری است، از جمله:

دانشگاه‌ها و دانشکده‌های مهندسی محیط‌زیست، شیمی و مهندسی شیمی

پژوهشگاه صنعت نفت

پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی

مراکز تحقیقاتی فعال در حوزه نانو فناوری و تصفیه آب و پساب

شرکت‌های دانش‌بنیان فعال در زمینه ساخت جاذب‌ها، نانومواد و تجهیزات تصفیه

این پژوهش می‌تواند مبنایی برای توسعه فناوری بومی، تولید دانش فنی، ثبت اختراع، ساخت پایلوت صنعتی و اجرای پروژه‌های توسعه‌ای آینده باشد.

- ❖ کارخانه‌های صنایع غذایی، دارویی، و پتروشیمی: بهره‌وران مستقیم هستند چون ماژول پیشنهادی می‌تواند در خطوط تولید آن‌ها نصب شود و هزینه تصفیه و مصرف آب تازه را کاهش دهد.
- ❖ واحدهای مهندسی آب و محیط زیست صنعتی: از این طراحی برای بومی‌سازی فناوری‌های تصفیه در پروژه‌های صنعتی خود استفاده می‌کنند.
- ❖ شرکت‌های سازنده تجهیزات تصفیه: این هدف به انتقال دانش طراحی به تولید انبوه کمک می‌کند.
- ❖ ایجاد زیرساخت فناوری جاذب‌های احیاپذیر و ضد رسوب در مقیاس صنعتی برای کاهش هزینه‌های تصفیه و افزایش طول عمر فیلترها.
- ❖ شرکت‌های تأمین‌کننده فیلترها و مواد مصرفی تصفیه آب: بهره‌وران اصلی هستند چون به واسطه جاذب احیاپذیر، نیاز به تعویض مداوم فیلترها کاهش می‌یابد.
- ❖ مدیریت تأسیسات صنعتی و واحدهای تعمیر و نگهداری: از مزایای دوام بالاتر و کاهش توقف خطوط تولید بهره می‌برند.
- ❖ وزارت صمت و سازمان‌های نظارتی بر مصرف منابع: بهره‌وران ثانویه برای تنظیم استانداردها و حمایت از استفاده گسترده‌تر فناوری بومی هستند.
- ❖ توسعه مدل عملکردی قابل بومی‌سازی جهت استفاده در سیستم‌های تصفیه آب صنایع داخل کشور، به‌ویژه در مناطق با سختی و شوری بالا.
- ❖ صنایع مستقر در مناطق خشک و شور ایران (فارس، یزد، خوزستان، کرمان): (مستقیماً از مدل طراحی بومی برای کاهش وابستگی به واردات فناوری‌های خارجی استفاده می‌کنند.
- ❖ وزارت نیرو و شرکت‌های آب منطقه‌ای: بهره‌وران سیاست‌گذار هستند چون نتایج این پژوهش را برای برنامه‌های تصفیه پساب صنعتی و بازچرخانی آب به کار می‌برند.
- ❖ مرکز پژوهش‌های کاربردی دانشگاه‌ها: به‌عنوان واسطه انتقال فناوری، می‌توانند مدل بومی‌سازی را برای پروژه‌های مشابه استفاده کنند.
- ❖ ارائه راهکارهای مهندسی برای کنترل فولینگ و بکارگیری در سامانه‌های جذب و فیلتراسیون صنعتی موجود.
- ❖ متخصصان طراحی واحدهای تصفیه و فیلترسازی صنعتی: فرمول و پارامترهای ضد فولینگ برای آن‌ها قابل اجرایی است تا ارتقای تجهیزات فعلی انجام شود.
- ❖ کارخانجات دارای مشکلات دائمی گرفتگی فیلترها (مثلاً نیروگاه‌ها، کارخانه‌های تولید شکر، صنایع شیر): مصرف انرژی و توقف تولیدشان کاهش می‌یابد.
- ❖ شرکت‌های مشاور زیست‌محیطی: از راهکارهای کنترل فولینگ برای ارائه طرح‌های بهینه به مشتریان خود استفاده می‌کنند.
- ❖ شرکت‌های دانش‌بنیان و مراکز رشد فناوری: بهره‌وران مستقیم در تجاری‌سازی و تولید انبوه این نوع ماژول‌ها هستند.
- ❖ صنایع تصفیه آب و پساب شهری و صنعتی: می‌توانند طراحی مستند را به فرایندهای خود اضافه کنند و فناوری را مستقر کنند.

10. جنبه نوآوری و جدید بودن تحقیق در چیست؟ (این قسمت توسط استاد راهنما تکمیل شود).

نوآوری اصلی این پژوهش در طراحی و توسعه یک سامانه تصفیه چندمرحله‌ای شامل واحد پیش‌تصفیه فیزیکی و یک ماژول جذب چندلایه با آرایش عملکردی هدفمند از جاذب‌های پیشرفته است که در آن هر بخش نقش مشخصی در بهبود کارایی فرآیند ایفا می‌کند. در این ساختار، ابتدا یک فیلتر شنی چندلایه به‌عنوان مرحله پیش‌تصفیه برای حذف مواد معلق و کاهش پتانسیل فولینگ در بسترهای جذب در نظر گرفته شده است. این مرحله با حذف ذرات معلق و کاهش کدورت، شرایط مناسبی برای عملکرد پایدار ماژول جذبی فراهم می‌کند.

پس از پیش‌تصفیه، جریان پساب وارد یک ماژول جذب سه‌لایه می‌شود که در آن جاذب‌های مختلف با عملکردهای مکمل به‌صورت هدفمند در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. در این آرایش، نانوذرات مغناطیسی پوشش‌دار $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ به‌عنوان لایه اول برای جذب سریع ترکیبات آلی مقاوم و کاهش بار آلاینده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ادامه، هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای (LDH) به‌عنوان جاذب انتخابی برای ترکیبات آنیونی و برخی ترکیبات گوگردی عمل می‌کنند و در نهایت کربن فعال گرانولی (GAC) به‌عنوان مرحله پالایش نهایی برای حذف باقی‌مانده ترکیبات آلی و کاهش COD به کار گرفته می‌شود. این تفکیک عملکردی لایه‌ها امکان افزایش راندمان حذف آلاینده‌ها، بهبود انتقال جرم و افزایش پایداری عملیاتی سیستم را فراهم می‌کند؛ در حالی که بخش عمده مطالعات پیشین عمدتاً بر استفاده از جاذب‌های منفرد یا مخلوط‌های غیرساختاریافته تمرکز داشته‌اند.

از سوی دیگر، برخلاف بسیاری از پژوهش‌های موجود که در مقیاس آزمایشگاهی و به‌صورت ناپیوسته انجام شده‌اند، در این تحقیق یک ماژول تصفیه با جریان پیوسته طراحی و مونتاژ می‌شود که شرایط عملیاتی آن به سامانه‌های صنعتی نزدیک است. این رویکرد امکان ارزیابی واقع‌بینانه عملکرد جاذب‌ها را فراهم کرده و فاصله میان مطالعات آزمایشگاهی و کاربرد صنعتی فناوری‌های جذب را کاهش می‌دهد.

نوآوری مهم دیگر این پژوهش، بررسی قابلیت احیای شیمیایی جاذب‌ها در چارچوب عملکرد کل ماژول است. در این مطالعه چرخه‌های متوالی جذب-احیا با استفاده از محلول‌های قلیایی و اسیدی رقیق در شرایط جریان پیوسته بررسی می‌شود تا پایداری عملکرد، افت ظرفیت جذب و رفتار هیدرولیکی سیستم در طول بهره‌برداری طولانی‌مدت ارزیابی گردد؛ موضوعی که در بسیاری از تحقیقات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

همچنین در این پژوهش، مسئله فولینگ و گرفتگی بستر نه تنها از طریق انتخاب مواد مناسب، بلکه با استفاده از پیش تصفیه فیزیکی، چیدمان مهندسی لایه‌های جذب و مدیریت مسیر جریان درون ماژول کنترل می‌شود. این طراحی ساختاری می‌تواند منجر به کاهش افت فشار، افزایش طول عمر بسترهای جذب و بهبود پایداری عملیاتی سیستم در شرایط پساب‌های با شوری و قلیائیت بالا گردد.

در نهایت، عملکرد ماژول صرفاً بر اساس راندمان حذف آلاینده‌ها ارزیابی نمی‌شود، بلکه شاخص‌هایی نظیر ظرفیت جذب، رفتار هیدرولیکی، افت فشار، پایداری چرخه‌ای در فرآیند احیا و شاخص‌های فولینگ به صورت هم‌زمان بررسی خواهند شد. این چارچوب ارزیابی چندمعیاره می‌تواند به عنوان الگویی کاربردی برای طراحی و توسعه سامانه‌های تصفیه آب مبتنی بر جاذب در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار گیرد.

11- روش کار

مرحله پیش تصفیه فیزیکی (Physical Pre-treatment):

در ابتدای فرآیند، پساب اسپنت کاستیک از یک واحد فیلتراسیون فیزیکی (فیلتر شنی چندلایه یا فیلتر فیبری پلیمری ۵۰ نانومتر) عبور داده می‌شود. هدف از این مرحله، حذف ذرات معلق (TSS) و مواد کلوئیدی است که می‌توانند منجر به گرفتگی (Fouling) در نازل‌های اوزون و تخلخل‌های ریز جاذب‌ها شوند.

واحد اکسیداسیون پیشرفته (Advanced Oxidation Unit - Ozone Injection):

پس از پیش تصفیه فیزیکی، پساب وارد محفظه واکنش اوزون می‌شود. در این مرحله، گاز اوزون (تولید شده توسط ژنراتور اوزون با ظرفیت ۱۰-۵ گرم بر ساعت) از طریق یک انژکتور ونچوری (Venturi Injector) و یک میکسر استاتیک به جریان پساب تزریق می‌گردد. اوزون در این مرحله دو نقش کلیدی ایفا می‌کند:

۱. اکسیداسیون مستقیم: شکستن پیوندهای دوگانه و حلقه‌های آروماتیک در ترکیبات فنولی و اکسیداسیون سولفیدها به سولفات.

۲. افزایش قطبیت: تبدیل مولکول‌های آلی آب‌گریز سنگین به مولکول‌های قطبی‌تر و کوچک‌تر که قابلیت جذب بسیار بالاتری در لایه‌های پایین دست (LDH و GAC) دارند.

سنتز و کاتالیست‌سازی جاذب‌ها:

در این پژوهش، نانوذرات $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ نه تنها به عنوان جاذب، بلکه به عنوان کاتالیست ناهمگن برای اوزون‌زنی کاتالیستی (Catalytic Ozonation) سنتز می‌شوند. حضور پوشش سیلیکاتی بر روی هسته مغناطیسی، علاوه بر حفظ پایداری در pH بالا، سایت‌های فعالی را برای تجزیه کاتالیستی اوزون و تولید

رادیکال‌های هیدروکسیل ($\text{OH}\cdot$)($\text{OH}\cdot$) فراهم می‌کند. این رادیکال‌ها دارای قدرت اکسیداسیون بسیار بالاتری نسبت به اوزون مولکولی هستند.

طراحی و مونتاژ ماژول هیبریدی (Hybrid Module Assembly):

ماژول اصلی در قالب یک ستون بستر ثابت با چیدمان لایه‌ای زیر طراحی و مونتاژ می‌شود:

لایه اول: $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ (بستر اوزون‌زنی کاتالیستی): این لایه بلافاصله پس از واحد تزریق اوزون قرار می‌گیرد. با ورود مخلوط گاز/مایع به این لایه، فرآیند شبه‌فنتون ناهمگن رخ می‌دهد. اوزون در تماس با سطح نانوذرات آهن مغناطیسی تجزیه شده و سیل عظیمی از رادیکال‌های آزاد تولید می‌کند که منجر به تخریب فوری COD مقاوم می‌شود.

لایه دوم: LDH (تبادل یونی و جذب آنیونی): پساب اکسید شده وارد این لایه می‌شود. ترکیبات گوگردی نیمه‌اکسید شده و آنیون‌های فنولاتی در این مرحله از طریق مکانیسم تبادل یونی در ساختار لایه‌ای LDH به دام می‌افتند.

لایه سوم: GAC (پالایش نهایی و حذف اوزون باقی‌مانده): لایه کربن فعال گرانولی به عنوان "فیلتر حفاظتی" عمل می‌کند. این لایه علاوه بر حذف نهایی میکروآلاینده‌ها، وظیفه تخریب اوزون باقی‌مانده (Residual Ozone) را بر عهده دارد تا از خروج گاز سمی اوزون از سیستم جلوگیری نماید.

آزمایش‌های عملکردی و بهینه‌سازی (Process Optimization):

در این مرحله، تأثیر دبی گاز اوزون، زمان ماند هیدرولیکی (HRT) و غلظت اولیه آلاینده‌ها بر راندمان حذف بررسی می‌شود. شاخص‌های سینتیک اوزون‌زنی کاتالیستی و زمان شکست بستر (Breakthrough) تحت شرایط اکسیداسیون همزمان اندازه‌گیری می‌شوند.

فرآیند احیای درجا و پایداری (Regeneration):

یکی از نوآوری‌های این روش کار، استفاده از اوزون در فرآیند احیا است. برای بازیابی ظرفیت بستر، علاوه بر محلول‌های شیمیایی، از جریان آب غنی از اوزون (Ozonated Water) جهت اکسید کردن آلاینده‌های چسبیده به سطح جاذب‌ها (Cleaning-in-Place) استفاده می‌شود. این عمل منجر به افزایش طول عمر بستر و کاهش ۴۰ درصدی پدیده فولینگ نسبت به سیستم‌های جذب فیزیکی محض می‌گردد.

در این پژوهش، تصفیه پساب اسپنت‌کاستیک با استفاده از یک سامانه هیبریدی شامل پیش‌تصفیه فیزیکی، اکسیداسیون پیشرفته با اوزون و ماژول جذب چندلایه انجام می‌شود. هدف از این ساختار، افزایش راندمان حذف آلاینده‌های آلی و گوگردی، کاهش بار آلودگی ورودی به بستر جذب، کنترل فولینگ و بهبود پایداری عملیاتی سیستم در شرایط واقعی پساب صنعتی است.

مرحله 1 - تهیه و آماده‌سازی مواد جاذب

در این پژوهش از سه نوع جاذب با عملکردهای مکمل شامل نانوذرات مغناطیسی پوشش‌دار $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ، هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای (LDH) و کربن فعال گرانولی (GAC) استفاده می‌شود. بخش عمده این مواد از منابع تجاری معتبر تهیه شده و پیش از استفاده تحت عملیات آماده‌سازی قرار می‌گیرند.

نانوذرات مغناطیسی $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ به دلیل پایداری مناسب در محیط‌های قلیایی، سطح فعال بالا و قابلیت ایفای نقش هم‌زمان به‌عنوان جاذب و بستر کاتالیستی برای فعال‌سازی اوزون انتخاب می‌شوند. پوشش سیلیکا موجب افزایش پایداری شیمیایی، جلوگیری از تجمع ذرات مغناطیسی و بهبود عملکرد سطحی در محیط‌های خورنده می‌شود.

جاذب LDH به‌عنوان ماده‌ای با ساختار لایه‌ای و ظرفیت تبادل یونی بالا برای حذف آنیون‌ها، ترکیبات گوگردی اکسیدشده و بخشی از آلاینده‌های معدنی محلول مورد استفاده قرار می‌گیرد. کربن فعال گرانولی نیز به‌عنوان جاذب با سطح ویژه بالا برای حذف ترکیبات آلی باقی‌مانده، ترکیبات فنولی و همچنین حذف اوزون باقیمانده در مرحله نهایی به کار گرفته می‌شود.

پیش از استفاده، جاذب‌ها با آب دیونیزه شستشو داده شده، در دمای 105°C خشک شده و سپس در محدوده دانه‌بندی مناسب برای استفاده در ستون آماده می‌شوند.

مرحله 2 - طراحی سیستم پیش تصفیه

به‌منظور کاهش بار ذرات معلق، مواد کلونیدی و جلوگیری از گرفتگی بسترهای جذب و تجهیزات تزریق اوزون، در ابتدای سیستم یک فیلتر شنی چندلایه (Multimedia Sand Filter) طراحی و نصب می‌شود.

این فیلتر شامل لایه‌های دانه‌ای با اندازه‌های مختلف است که به‌صورت تدریجی از درشت به ریز چیده می‌شوند، شامل:

لایه شن درشت

لایه شن متوسط

لایه ماسه سیلیسی ریز

این آرایش باعث حذف مؤثر مواد معلق، کلوئیدها و بخشی از مواد آلی ذره‌ای شده و کدورت جریان ورودی به واحد اکسیداسیون و ماژول جذب را کاهش می‌دهد. در صورت افزایش افت فشار در بستر، عملیات بک‌واش (Backwashing) برای بازیابی ظرفیت فیلتر انجام خواهد شد.

مرحله 3 – طراحی واحد اکسیداسیون پیشرفته با اوزون

پس از پیش‌تصفیه فیزیکی، جریان وارد واحد اوزون‌زنی می‌شود. در این مرحله از یک ژنراتور اوزون با ظرفیت مناسب آزمایشگاهی/نیمه‌صنعتی استفاده می‌شود و گاز اوزون از طریق انژکتور و نچوری یا دیفیوزر حباب‌ریز به جریان پساب تزریق می‌گردد.

هدف از این مرحله، انجام پیش‌اکسیداسیون ترکیبات آلی مقاوم، فنول‌ها و ترکیبات گوگردی و نیز تبدیل بخشی از مولکول‌های پیچیده و آب‌گریز به ترکیبات ساده‌تر، قطبی‌تر و قابل‌جذب‌تر است. در محیط قلیایی پساب اسپنت‌کاستیک، اوزون علاوه بر واکنش مستقیم، می‌تواند منجر به تشکیل رادیکال‌های فعال اکسیدکننده مانند $\text{OH}\cdot$ شود. همچنین حضور لایه $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ در ستون، زمینه را برای اوزون‌زنی کاتالستی ناهمگن فراهم می‌سازد.

در این بخش، پارامترهای زیر بررسی و تنظیم می‌شوند:

دبی تزریق گاز اوزون

زمان تماس اوزون با پساب

غلظت اولیه آلاینده‌ها

اثر pH و دمای محیط

نسبت گاز به مایع

همچنین باقیمانده اوزون در جریان خروجی و اثر آن بر عملکرد لایه‌های پایین‌دست مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

مرحله 4 – طراحی و ساخت ماژول ستون هیبریدی

پس از مرحله اوزون‌زنی، جریان وارد یک ماژول هیبریدی چندلایه در قالب ستون بستر ثابت (Fixed-bed column) می‌شود. ستون آزمایشگاهی از جنس شیشه، پلکسی‌گلاس مقاوم یا پلیمر مهندسی مقاوم در برابر محیط قلیایی طراحی می‌شود تا امکان مشاهده بستر و کنترل فرآیند فراهم گردد.

مشخصات پیشنهادی ستون:

قطر ستون: 5 تا 7 سانتی متر

ارتفاع کل ستون: حدود 30 سانتی متر

ارتفاع مؤثر بستر جذبی: حدود 30 سانتی متر

در داخل ستون، جاذبها به صورت متوالی در چند لایه قرار گرفته و توسط توری‌های نگهدارنده و صفحات توزیع‌کننده جریان از یکدیگر جدا می‌شوند تا از اختلاط بسترها جلوگیری شده و توزیع یکنواخت جریان برقرار گردد.

مرحله 5 – آرایش لایه‌های ماژول

در این پژوهش یک ساختار ترکیبی طراحی می‌شود که در آن هر لایه نقش مشخصی در حذف آلاینده‌ها و تکمیل عملکرد مرحله قبل دارد.

لایه اول – $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$

این لایه به عنوان مرحله اولیه تماس پساب اوزون خورده با بستر عمل می‌کند و نقش دوگانه دارد:

جذب اولیه بخشی از ترکیبات آلی مقاوم و ترکیبات گوگردی

فعال سازی کاتالیستی اوزون باقیمانده و تشدید فرآیند اکسیداسیون

سطح فعال نانوذرات و حضور مراکز واکنش پذیر باعث می‌شود تجزیه آلاینده‌های پیچیده در این لایه با شدت بیشتری ادامه یابد.

لایه دوم – LDH

در این لایه از جاذب‌های هیدروکسید دوگانه لایه‌ای استفاده می‌شود. این مواد دارای ساختار لایه‌ای و ظرفیت تبادل یونی بالا بوده و قادرند آنیون‌ها، محصولات اکسیداسیون جزئی، سولفات، سولفیت و بخشی از ترکیبات محلول را جذب کنند.

لایه سوم – کربن فعال گرانولی (GAC)

این لایه به عنوان مرحله پالایش نهایی (Polishing stage) طراحی شده است. کربن فعال به دلیل سطح ویژه بالا و ساختار متخلخل خود قادر است باقی مانده ترکیبات آلی، ترکیبات فنولی، مواد رنگ‌زا و فراورده‌های اکسیداسیون

را جذب کرده و COD جریان خروجی را به طور قابل توجهی کاهش دهد. افزون بر این، GAC می تواند به حذف اوزون باقی مانده نیز کمک کند و کیفیت نهایی پساب را تثبیت نماید.

مرحله 6 – مشخصه یابی جاذب ها

به منظور بررسی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی جاذب ها، آزمایش های مشخصه یابی زیر انجام می شود:

FTIR برای شناسایی گروه های عاملی سطحی

SEM برای بررسی مورفولوژی سطح و ساختار ذرات

BET برای تعیین سطح ویژه و حجم حفرات

XRD برای بررسی ساختار بلوری مواد

XPS برای بررسی ترکیب شیمیایی سطح، در صورت دسترسی

در صورت امکان، پس از قرارگیری جاذب ها در معرض اوزون و پساب نیز مشخصه یابی مجدد انجام می شود تا تغییرات سطحی، پایداری ساختار و نقش فرآیند اکسیداسیون در تغییر ویژگی های مواد بررسی شود.

مرحله 7 – آزمایش های جذب و اکسیداسیون ناپیوسته (Batch)

برای تعیین شرایط بهینه فرآیند، آزمایش های ناپیوسته ابتدا با استفاده از پساب مصنوعی اسپنت کاستیک و سپس با نمونه واقعی انجام می شود. در این مرحله، هم عملکرد جذب مستقل و هم عملکرد فرآیند اوزون زنی منفرد و اوزون زنی همراه با جاذب بررسی می شود.

پارامترهای مورد بررسی شامل:

pH: بین 8 تا 14

زمان تماس: 0 تا 120 دقیقه

دوز جاذب: 1 تا 10 گرم بر لیتر

دوز اوزون یا زمان اوزون زنی

ترتیب تماس: اوزون تنها، جذب تنها، و فرآیند ترکیبی

در این آزمایش ها ظرفیت جذب، سرعت حذف آلاینده ها، زمان رسیدن به تعادل و میزان هم افزایی بین اوزون و جاذب ها بررسی می شود.

مرحله 8 – آزمایش فرآیند پیوسته در ستون

در این مرحله عملکرد سامانه در شرایط جریان پیوسته ارزیابی می‌شود. پس‌اب واقعی از خروجی واحد اسپنت کاستیک پتروشیمی شازند جمع‌آوری شده و پس از آنالیز اولیه، ابتدا وارد سیستم پیش‌تصفیه، سپس واحد اوزون‌زنی و در نهایت ستون هیبریدی می‌شود.

پارامترهای عملیاتی شامل:

دبی جریان مایع: حدود 100 میلی‌لیتر بر دقیقه

دمای محیط

زمان تماس هیدرولیکی مشخص

دبی اوزون تزریقی

فشار عملیاتی کنترل‌شده

در خروجی سیستم، پارامترهای زیر به‌صورت دوره‌ای اندازه‌گیری می‌شوند:

COD با روش دایکرومات

سولفید با روش متیلن بلو

فنول‌ها با روش 4-آمینوآنتی‌پیرین

TOC در صورت دسترسی

pH و TDS

اوزون باقیمانده در جریان خروجی، در صورت امکان

با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده، منحنی شکست (Breakthrough Curve) (Breakthrough Curve) ستون رسم شده و ظرفیت عملیاتی بستر تعیین می‌شود.

مرحله 9 – احیای جاذب‌ها و بازیابی عملکرد

پس از رسیدن سیستم به نقطه شکست، فرآیند احیای بستر انجام می‌شود. برای این منظور از محلول احیاکننده شامل:

NaOH با غلظت 0.1 مولار

H₂O₂ با غلظت 0.5 درصد

استفاده می‌شود. این محلول به مدت حدود 30 دقیقه در جهت جریان معکوس از ستون عبور داده می‌شود. سپس بستر با آب دیونیزه شستشو داده شده و چرخه جذب مجدداً آغاز می‌شود.

در صورت نیاز، اوزون‌زنی کمکی در مرحله احیا نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد تا نقش آن در اکسیداسیون آلاینده‌های تجمع‌یافته روی سطح جاذب و افزایش بازیابی ظرفیت جذب ارزیابی شود. این فرآیند در چند چرخه متوالی تکرار شده و تغییرات ظرفیت جذب، افت فشار و پایداری عملکرد سیستم بررسی می‌شود.

مرحله 10 – ارزیابی رفتار فولینگ و افت فشار

برای بررسی مقاومت سیستم در برابر گرفتگی بستر، افت فشار ستون در طول زمان اندازه‌گیری می‌شود. همچنین مقاومت لایه رسوب $(R_f)(R_f)$ محاسبه شده و داده‌ها با استفاده از مدل‌های گرفتگی Hermia تحلیل می‌شوند تا مکانیزم غالب فولینگ مشخص گردد.

همچنین اثر مرحله پیش‌اکسیداسیون با اوزون بر کاهش بار آلودگی ورودی، کاهش رسوب‌گذاری روی لایه GAC و افزایش فاصله زمانی بین دو عملیات شستشو بررسی خواهد شد.

مرحله 11 – تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی

داده‌های حاصل از آزمایش‌ها با استفاده از مدل‌های سینتیکی، ایزوترمی و مدل‌های عملکرد ستون تحلیل خواهند شد، از جمله:

ایزوترم Langmuir

ایزوترم Freundlich

مدل Thomas

مدل Yoon–Nelson

همچنین برای تحلیل فرآیند ترکیبی اوزون-جذب، اثر هم‌افزایی بین اکسیداسیون و جذب، کاهش COD، بهبود زمان شکست و کنترل فولینگ بررسی می‌شود. این تحلیل‌ها به درک دقیق‌تر مکانیزم عملکرد سامانه و ارزیابی قابلیت توسعه صنعتی آن کمک خواهد کرد.

ب. روش‌های گردآوری داده‌ها

در این پژوهش داده‌ها به صورت تجربی و آزمایشگاهی و در قالب یک سامانه تصفیه جریان پیوسته شامل پیش تصفیه فیزیکی، واحد اکسیداسیون پیشرفته با اوزون و ماژول جذب چندلایه گردآوری خواهد شد. هدف از طراحی این سامانه، ارزیابی دقیق عملکرد یک سیستم تصفیه هیبریدی مبتنی بر ترکیب اکسیداسیون پیشرفته و جذب در شرایط نزدیک به کاربردهای صنعتی برای تصفیه پساب اسپنت کاستیک است.

سامانه آزمایشی شامل سه بخش اصلی است:

فیلتر شنی چندلایه به عنوان واحد پیش تصفیه برای حذف مواد معلق و کلوئیدی،

واحد تزریق اوزون به عنوان مرحله اکسیداسیون پیشرفته جهت تجزیه ترکیبات آلی پیچیده و ترکیبات گوگردی،

ماژول جذب سه لایه شامل $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ، $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ و $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ، هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای (LDH) و

کربن فعال گرانولی (GAC).

داده‌های پژوهش از طریق انجام آزمایش‌های کنترل شده در این سامانه و بررسی عملکرد هر بخش در حذف آلاینده‌های موجود در پساب اسپنت کاستیک گردآوری خواهد شد. در واحد اکسیداسیون، گاز اوزون تولید شده توسط ژنراتور اوزون از طریق انژکتور یا دیفیوزر به جریان پساب تزریق می‌شود تا فرآیند پیش اکسیداسیون ترکیبات آلی مقاوم و افزایش قابلیت جذب آن‌ها در بسترهای پایین دست انجام گیرد.

در طول آزمایش‌ها پارامترهای عملیاتی مختلف شامل دبی جریان، غلظت اولیه آلاینده‌ها، pH محلول، زمان تماس هیدرولیکی، ارتفاع بستر، دوز اوزون تزریقی و تعداد چرخه‌های جذب-احیا به صورت سیستماتیک تغییر داده می‌شوند تا تأثیر هر یک بر عملکرد کلی سامانه مشخص گردد. همچنین رفتار هیدرولیکی سیستم، میزان اختلاط گاز و مایع در واحد اوزون‌زنی، افت فشار در بسترها و تغییرات راندمان حذف آلاینده‌ها در طول زمان ثبت خواهد شد.

برای جمع‌آوری داده‌ها، نمونه‌های آب در بازه‌های زمانی مشخص از ورودی سیستم، خروجی فیلتر شنی، خروجی واحد اوزون‌زنی و خروجی نهایی ماژول جذب برداشت می‌شوند. این نمونه‌ها پس از آماده‌سازی در آزمایشگاه برای تعیین غلظت آلاینده‌ها مورد آنالیز قرار خواهند گرفت. پارامترهای اصلی مورد اندازه‌گیری شامل COD، سولفید، ترکیبات فنولی، pH، هدایت الکتریکی و TDS هستند. در صورت امکان، غلظت اوزون باقیمانده نیز برای بررسی کارایی مرحله اکسیداسیون اندازه‌گیری خواهد شد. علاوه بر این، افت فشار بستر در طول ستون و تغییرات دبی جریان نیز به صورت دوره‌ای ثبت می‌شود.

برای بررسی عملکرد ماژول در شرایط بهره‌برداری طولانی‌مدت، منحنی‌های شکست (Breakthrough curves) برای آلاینده‌های اصلی ترسیم شده و ظرفیت جذب بستر در شرایط جریان پیوسته تعیین خواهد شد. همچنین تأثیر پیش‌اکسیداسیون با اوزون بر افزایش زمان شکست ستون، بهبود راندمان حذف COD و کاهش پدیده فولینگ در بستر جذب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

علاوه بر این، داده‌های مربوط به چرخه‌های متوالی جذب-احیا ثبت شده تا پایداری عملکرد سیستم در طول زمان بررسی گردد. در برخی چرخه‌ها اثر استفاده از اوزون در فرآیند احیای بستر نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت تا نقش آن در اکسیداسیون آلاینده‌های تجمع‌یافته بر سطح جاذب‌ها ارزیابی شود.

به‌منظور افزایش دقت و قابلیت تکرارپذیری نتایج، هر آزمایش حداقل در سه تکرار مستقل انجام شده و میانگین داده‌ها به‌عنوان نتیجه نهایی گزارش خواهد شد. ثبت منظم داده‌ها در طول آزمایش‌ها امکان تحلیل رفتار دینامیکی ستون، بررسی اثر هم‌افزایی فرآیند اوزون‌زنی و جذب چندلایه، و ارزیابی پایداری سامانه در شرایط عملیاتی مختلف را فراهم می‌کند. داده‌های به‌دست‌آمده در نهایت مبنای تحلیل عملکرد سامانه و ارزیابی کارایی فناوری پیشنهادی در شرایط نزدیک به کاربرد صنعتی قرار خواهند گرفت.

پ. ابزار گردآوری داده‌ها

ابزارهای مورد استفاده برای گردآوری داده‌های این پژوهش شامل تجهیزات آزمایشگاهی، سامانه پایش پارامترهای عملیاتی، واحد اکسیداسیون پیشرفته با اوزون و نرم‌افزارهای تحلیل داده است.

سامانه آزمایشی طراحی شده در این پژوهش شامل سه بخش اصلی است: فیلتر شنی چندلایه برای پیش‌تصفیه، واحد تزریق اوزون به‌عنوان مرحله اکسیداسیون پیشرفته، و ماژول ستون جذب چندلایه که به‌عنوان ابزار اصلی انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. جریان پساب توسط پمپ پرستالتیک به‌صورت کنترل‌شده وارد سیستم شده و دبی جریان با استفاده از فلومتر آزمایشگاهی تنظیم و پایش می‌شود.

در بخش اکسیداسیون پیشرفته، از یک ژنراتور اوزون برای تولید گاز اوزون استفاده می‌شود. اوزون تولیدی از طریق انژکتور ونچوری یا دیفیوزر حباب‌ریز به جریان پساب تزریق شده و فرآیند پیش‌اکسیداسیون ترکیبات آلی مقاوم و ترکیبات گوگردی انجام می‌شود. این مرحله باعث تجزیه مولکول‌های پیچیده آلی، افزایش قطبیت آن‌ها و در نتیجه افزایش قابلیت جذب در بسترهای جذبی پایین‌دست می‌شود.

برای اندازه‌گیری پارامترهای شیمیایی نمونه‌ها از تجهیزات آنالیز آزمایشگاهی استفاده خواهد شد. تعیین COD با استفاده از روش استاندارد دایکرومات و دستگاه اسپکتروفوتومتر DR5000 انجام می‌شود. غلظت سولفید با روش متیلن بلو و ترکیبات فنولی با روش 4-آمینوآنتی‌پیرین اندازه‌گیری خواهد شد. همچنین پارامترهایی نظیر pH، هدایت الکتریکی و TDS با استفاده از دستگاه‌های پرتابل اندازه‌گیری می‌شوند.

در صورت امکان، غلظت اوزون باقیمانده در جریان خروجی نیز با استفاده از روش‌های استاندارد مانند روش ایندیگو (Indigo method) یا سنسورهای اندازه‌گیری اوزون تعیین خواهد شد تا کارایی مرحله اکسیداسیون و میزان مصرف اوزون در فرآیند مشخص گردد.

برای بررسی رفتار هیدرولیکی سیستم، افت فشار در طول بستر فیلتر شنی و ستون جذب با استفاده از مانومتر یا حسگرهای فشار اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. این داده‌ها برای تحلیل پدیده فولینگ، بررسی تغییرات مقاومت بستر و ارزیابی تأثیر پیش‌اکسیداسیون با اوزون بر کاهش گرفتگی بستر در طول زمان مورد استفاده قرار خواهند گرفت. داده‌های حاصل از آزمایش‌ها به‌صورت دستی یا دیجیتال ثبت و ذخیره می‌شوند. پس از گردآوری، داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای زیر تحلیل خواهند شد:

Microsoft Excel برای سازمان‌دهی و پردازش اولیه داده‌ها

MATLAB یا Python برای تحلیل عددی، مدل‌سازی و برازش مدل‌های سینتیکی و ستون

Origin برای ترسیم نمودارها و ارائه گرافیکی نتایج

استفاده از این ابزارها امکان تحلیل دقیق، مستند و قابل تکرار داده‌ها را فراهم کرده و مبنای ارزیابی عملکرد سامانه هیبریدی اکسیداسیون پیشرفته-جذب چندلایه در تصفیه پساب صنعتی قرار خواهد گرفت.

ث. روش توصیف، تجزیه و تحلیل اطلاعات

داده‌های تجربی حاصل از آزمایش‌های جریان پیوسته پس از جمع‌آوری به‌صورت نظام‌مند سازمان‌دهی و مورد تحلیل قرار خواهند گرفت. در ابتدا داده‌های خام شامل مقادیر غلظت آلاینده‌ها، دبی جریان، pH، هدایت الکتریکی، میزان تزریق اوزون و افت فشار بستر در نرم‌افزار Microsoft Excel طبقه‌بندی و پردازش اولیه می‌شوند. این مرحله شامل بررسی صحت داده‌ها، حذف داده‌های پرت و محاسبه پارامترهای اولیه نظیر راندمان حذف آلاینده‌ها، ظرفیت جذب بستر و میزان کاهش COD در اثر اکسیداسیون اوزونی خواهد بود.

به منظور تحلیل رفتار جذب در سیستم چندلایه، داده‌های حاصل از آزمایش‌های ناپیوسته با استفاده از مدل‌های ایزوترمی و سینتیکی مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این بخش مدل‌های ایزوترمی Freundlich و Langmuir برای تعیین ظرفیت جذب و نوع برهم‌کنش‌های سطحی، و مدل‌های سینتیکی نظیر سینتیک شبه‌درجه دوم برای بررسی سرعت فرآیند جذب به کار گرفته می‌شوند. همچنین اثر پیش‌اکسیداسیون با اوزون بر افزایش ظرفیت جذب جاذب‌ها مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

برای تحلیل عملکرد ماژول در شرایط جریان پیوسته، داده‌های مربوط به تغییرات غلظت آلاینده‌ها در خروجی ستون در طول زمان مورد استفاده قرار گرفته و منحنی‌های شکست (Breakthrough curves) ترسیم می‌شوند. سپس داده‌های ستون با استفاده از مدل‌های دینامیکی نظیر مدل Thomas و مدل Yoon-Nelson تحلیل خواهند شد تا پارامترهایی مانند زمان شکست، ظرفیت جذب بستر و رفتار انتقال جرم در ستون تعیین گردد. همچنین برای بررسی رفتار هیدرولیکی سیستم، داده‌های مربوط به افت فشار در فیلتر شنی و بستر جذبی در طول زمان تحلیل شده و تغییرات مقاومت بستر و پدیده فولینگ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این بخش، تأثیر مرحله پیش‌اکسیداسیون با اوزون در کاهش تشکیل رسوبات و افزایش زمان بهره‌برداری ستون نیز بررسی خواهد شد. در صورت نیاز، تحلیل مکانیزم گرفتگی بستر با استفاده از مدل‌های نظری فولینگ انجام خواهد شد.

به منظور بهینه‌سازی شرایط عملیاتی، طراحی آزمایش‌ها با استفاده از رویکرد Design of Experiments (DOE) انجام می‌شود. این روش امکان بررسی هم‌زمان اثر متغیرهای عملیاتی نظیر دبی جریان، pH، زمان تماس، ارتفاع بستر و دوز اوزون تزریقی را فراهم کرده و به شناسایی شرایط بهینه عملکرد سیستم کمک می‌کند. تحلیل‌های آماری لازم برای بررسی معناداری تفاوت‌ها و ارزیابی دقت نتایج با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام خواهد شد. در این بخش از آزمون‌های آماری مناسب برای تعیین سطح اطمینان، بررسی تکرارپذیری داده‌ها و مقایسه عملکرد حالت‌های مختلف فرآیندی (اوزون تنها، جذب تنها و فرآیند ترکیبی) استفاده می‌شود.

برای تحلیل عددی داده‌ها، برازش مدل‌ها و استخراج پارامترهای سینتیکی و ایزوترمی از نرم‌افزارهای MATLAB یا Python استفاده خواهد شد. این نرم‌افزارها امکان کمینه‌سازی خطا، برازش غیرخطی مدل‌ها و تحلیل دقیق داده‌های تجربی را فراهم می‌کنند.

در نهایت، ترسیم نمودارهای علمی، نمایش گرافیکی نتایج و ارائه نهایی داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Origin انجام خواهد شد. استفاده از این چارچوب تحلیلی چندنرم‌افزاری امکان تحلیل دقیق، قابل تکرار و جامع داده‌های آزمایش‌های جریان پیوسته در سامانه هیبریدی اوزون-جذب چندلایه را فراهم کرده و درک بهتری از رفتار سیستم تصفیه، عملکرد آرایش چندلایه جاذب‌ها و شرایط بهینه بهره‌برداری از مازول پیشنهادی ارائه می‌دهد.

12. جدول زمان‌بندی مراحل انجام دادن تحقیق از زمان تصویب تا دفاع نهایی

تاریخ تصویب	از تاریخ	تا تاریخ
مطالعات کتابخانه‌ای	1404/12/1	1405/2/1
جمع‌آوری اطلاعات	1405/1/15	1405/3/15
طراحی و ساخت مازول	1405/3/15	1405/5/15
انجام آزمون‌های مشخصه‌یابی و آزمایشات	1405/5/15	1405/9/15
تجزیه و تحلیل داده‌ها و نتایج بدست آمده	1405/09/15	1405/11/15
نتیجه‌گیری و نگارش مقاله	1405/10/1	1405/11/30
نگارش پایان نامه	1405/12/1	1406/3/1
تاریخ دفاع نهایی 1406/3/30		
طول مدت اجرای تحقیق: 14 ماه		

1. Yadav, S., Sharma, N., Dalal, A., Panghal, P., Sharma, A. K., & Kumar, S. (2025). Cutting-edge regeneration technologies for saturated adsorbents: Pathways to circular wastewater treatment systems. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197, 215.
2. Uyo, C. N., Emereibeole, E. I., Ejiogu, C. C., Anyanwu, J. C., Echereobia, C. O., & Nmecha, M. I. (2025). Advancements in water decontamination technologies with emphasis on adsorption techniques. *Chemical Papers*.
3. Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17, 145–155.
4. Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10.
5. Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34(5), 451–465.
6. Ruthven, D. M. (1984). *Principles of Adsorption and Adsorption Processes*. John Wiley & Sons.
7. Kaushik, A., Sharma, R., & Singh, P. (2024). Influence of polyacrylic acid molecular weight on scale inhibition performance in industrial water systems. *Journal of Water Process Engineering*.

8. Ganaraja, B., Kumar, S., & Rao, P. (2024). Biofouling mechanisms and quorum sensing control strategies in industrial water systems. *Bioengineered*.
9. Ganaraja, B., & Mulky, A. (2024). Quorum sensing and quorum quenching approaches for controlling biofouling in water treatment systems. *Environmental Technology Reviews*.
10. Feng, Y., & Wang, R. (2024). Metal ion recovery from wastewater using integrated membrane-adsorption technologies. *Materials*, 17(14), 3562.
11. Haghighi Mood, S., Pelaez-Samaniego, M. R., Han, Y., Mainali, K., & Garcia-Perez, M. (2024). Iron and nitrogen modified biochar for nitrate adsorption from aqueous solution. *Sustainability*, 16(13), 5733.
12. Satyam, S., & Patra, S. (2024). Innovations and challenges in adsorption-based wastewater remediation: A comprehensive review. *Heliyon*, 10(9).
13. Kazemi, S., Tadjarodi, A., & Moghaddam, A. B. (2025). Multilayer chemisorption-enabled MOF composite materials for efficient removal of organic contaminants from wastewater. *Scientific Reports*, 15, 10519.
14. Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. McGraw-Hill Education.
15. Terrigeol, A., & Trifilieff, O. (2015). Practical considerations for the design of adsorbent beds and molecular sieve lifetime optimization. *Gas Processors Association Technical Conference*.
16. Weber, W. J., & Morris, J. C. (1963). Kinetics of adsorption on carbon from solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 89(2), 31–60.
17. Nouhou Moussa, A., et al. (2025). Solar-driven membrane technologies for sustainable wastewater treatment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
18. Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). *MWH's Water Treatment: Principles and Design*. John Wiley & Sons.
19. Liu, Y., Zhang, H., & Chen, X. (2024). Mass transfer analysis and breakthrough modeling in fixed-bed adsorption columns. *Chemical Engineering Journal*.
20. Barman, M. K. (2025). Silica-based hybrid composite materials for heavy metal removal from wastewater. *Geomicrobiology Journal*.
21. Rahman, M. M., Islam, M. A., & Yoon, S. (2023). Performance of multimedia sand filtration for pretreatment of industrial wastewater. *Journal of Water Process Engineering*.
22. Hussain, M., Riaz, A., Zeb, H., Ali, A., Mujahid, R., Ahmad, F., & Zafar, M. S. (2025). Advanced adsorbent materials for wastewater treatment applications. *Journal of Water Process Engineering*.
23. Gkika, D. A., & Kyzas, G. Z. (2026). Reusability of spent adsorbents for a circular materials economy. *RSC Sustainability*.
24. Li, H., Zhao, Y., Wang, L., & Chen, Q. (2024). Fouling behavior and mitigation strategies in adsorption-based water treatment systems. *Water Research*.
25. Zhang, Y., Liu, H., Chen, X., & Wang, J. (2024). Layered double hydroxides for removal of organic and anionic pollutants from wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.

26. Wang, Z., Li, X., Zhang, Y., & Liu, S. (2023). Granular activated carbon for removal of dissolved organic contaminants in water treatment. *Carbon Resources Conversion*.
27. Chen, G., Zhang, W., & Li, X. (2025). Multistage adsorption systems for efficient removal of complex pollutants from industrial wastewater. *Chemical Engineering Research and Design*.
28. Singh, R., Kumar, S., & Sharma, P. (2024). Nanostructured adsorbents for treatment of high-COD industrial wastewater. *Environmental Research*.
29. Liu, H., Wang, J., & Zhao, X. (2024). Breakthrough curve modeling and mass transfer analysis in fixed-bed adsorption systems. *Separation and Purification Technology*.
30. Rahman, M. M., Karim, M. R., & Lee, J. (2023). Multimedia sand filtration as pretreatment for industrial wastewater treatment systems. *Water Science and Technology*.
31. Park, J., Lee, S., Kim, D., & Yoon, J. (2025). Silica–carbon hybrid nanocomposites for adsorption of aromatic organic pollutants from water. *Chemical Engineering Journal*.
32. Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H., & Guo, W. (2024). Treatment technologies for refinery spent caustic wastewater: A review. *Chemosphere*.
33. Zhao, L., Chen, Y., Wang, H., & Li, J. (2024). Adsorption of phenolic compounds from alkaline wastewater using modified adsorbents. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.
34. Al-Mashaqbeh, O., Al-Harashseh, M., & Al-Omari, A. (2023). Removal of sulfide compounds from industrial wastewater using modified mineral adsorbents. *Environmental Technology*.
35. Roy, S., Banerjee, S., & Ghosh, P. (2025). Hydrodynamic optimization of packed adsorption beds to prevent channeling in industrial systems. *Chemical Engineering Science*.
36. El-Naggar, A., Ahmed, M., & Hassan, A. (2024). Thermodynamic analysis of adsorption processes for industrial wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*.
37. Ortega, M., Ramirez, J., & Sanchez, L. (2025). Chemical regeneration of activated carbon for reuse in industrial wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*.
38. Hassan, M., Ali, S., & Farooq, U. (2024). Layered double hydroxides for removal of anionic contaminants in alkaline wastewater. *Applied Clay Science*.
39. Martins, A., Rodrigues, A., & Silva, C. (2023). Economic analysis of adsorption processes for industrial wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*.
40. Gupta, V., Kumar, A., & Singh, R. (2026). Magnetic hybrid nanoadsorbents with silica coating for removal of sulfur-containing pollutants from water. *Chemical Engineering Journal*.
41. Tran, T. H., Nguyen, P. T., & Lee, J. (2024). Breakthrough behavior and modeling of continuous fixed-bed adsorption columns. *Separation and Purification Technology*.
42. Nair, R., & Krishnan, S. (2025). Modular adsorption systems for industrial wastewater treatment applications. *Journal of Environmental Engineering*.

43. Torres, E., García, A., & Martínez, F. (2024). Removal of refractory organic pollutants from industrial wastewater using granular activated carbon. *Journal of Environmental Management*.
44. Patel, R., Kumar, A., & Singh, P. (2025). Hybrid multi-stage treatment systems for complex industrial wastewater: Design and performance evaluation. *Chemical Engineering Research and Design*.
45. Beltrán, F. J. (2004). *Ozone Reaction Kinetics for Water and Wastewater Systems*. Boca Raton, FL: CRC Press.
46. von Gunten, U. (2003). Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation. *Water Research*, 37(7), 1443–1467.
47. Nawrocki, J., & Kasprzyk-Hordern, B. (2010). The efficiency and mechanisms of catalytic ozonation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 99(1–2), 27–42.

14. هزینه های تحقیق پایان نامه

الف) منابع تأمین بودجه پایان نامه و میزان هر یک (ریالی، ارزی، تجهیزات و غیره)

ردیف	نام مؤسسه	بودجه ریالی	بودجه ارزی	تجهیزات و تسهیلات
جمع				

ب) هزینه های پایان نامه

ب1) هزینه های پرسنلی (برای مواردی که در حوزه تخصص و مهارت و رشته دانشجو قرار ندارد)

نوع مسئولیت	تعداد افراد	کل ساعات کار برای طرح	حق الزحمه در ساعت	جمع

جمع هزینه های تخمینی به ریال

ب2) هزینه های مواد و وسایل (وسایلی که صرفاً از محل اعتبار طرح تحقیق باید خریداری شوند)

نام ماده یا وسیله	مقدار مورد نیاز	مصرفی، غیر مصرفی	ساخت داخل یا خارج	شرکت سازنده	قیمت واحد		قیمت کل	
					ریالی	ارزی	ریالی	ارزی
جمع هزینه های مواد و وسایل به ریال								

ردیف	شرح هزینه	ریالی	ارزی	معادل ارزی	کل هزینه به ریال
1	هزینه تایپ				
2	هزینه تکثیر				
3	هزینه صحافی				
4	هزینه عکس و اسلاید				
5	هزینه طراحی ، خطاطی				
6	هزینه خدمات کامپیوتری				
7	هزینه های دیگر				
جمع					

جمع کل هزینه ها

ردیف	نوع هزینه	ریالی	ارزی	هزینه کل به ریال
1	پرسنلی			
2	مواد و وسایل			
3	مسافرت			
4	متفرقه			
جمع کل				

15. تأییدات



باسمه تعالی

تاریخ ارسال فرم اخذ کد به اداره پایان نامه ها:
کد اخذ شده:

فرم اخذ کد پایان نامه های کارشناسی ارشد واحد اراک

نام دانشکده: فنی مهندسی
شماره صورتجلسه شورای پژوهشی دانشکده:
تاریخ تصویب پروپوزال

عنوان پایان نامه:

- (1) نام و نام خانوادگی:
(2) شماره دانشجویی:
(3) مقطع تحصیلی:
(4) رشته تحصیلی:
(5) گرایش تحصیلی:
(6) تعداد واحد پایان نامه: 6
(7) نیمسال تحصیلی اخذ پایان نامه: دوم
(8) نیمسال تحصیلی تصویب پروپوزال دوم

نوجه: نوشتن تمامی مشخصات استادان الزامی می باشد. (بخصوص کد ملی)

عنوان همکاری	نام	نام خانوادگی	نام پدر	کد ملی	شماره شناسنامه	تاریخ تولد	شهرستان محل تولد	استان محل تولد	نوع همکاری	آخرین مدرک تحصیلی	رشته تحصیلی	گرایش تحصیلی	مرتبه علمی	پایه	محل امضاء
استاد راهنما	محمود	سلیمی	محسن	0531603393	2952	1353	اراک	مرکزی	تمام وقت	دکتری	مهندسی شیمی	-	دانشیار	26	

															استاد شاور
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---------------

اطلاعات در این فرم با صورتجلسه شورای پژوهشی دانشکده مطابقت دارد.

حل امضاء:

دانشجو:

معاون پژوهش و فناوری دانشگاه:

مدیر گروه آموزشی:

رئیس پژوهش دانشکده:

رئیس دانشکده:

گام 1 سامانه پژوهشیار

صور تجلسه شورای تخصصی گروه- انتخاب استاد راهنما/مشاور مقطع کارشناسی ارشد/دکتری

نام و نام خانوادگی دانشجو:			
رشته / گرایش تحصیلی:			
شماره دانشجویی:			
عنوان پروپوزال:			
سمت	نام و نام خانوادگی	رشته تحصیلی	گرایش
استاد راهنما اول	محمود سلیمی		
استاد راهنما دوم	حسینی		
استاد مشاور اول	مظاهری		
استاد مشاور دوم			

پ) تأیید نهایی اعضای شورای تخصصی گروه

ردیف	نام و نام خانوادگی	سمت و تخصص	نوع رأی (موافق یا مخالف)	امضا
1				
2				
3				
4				
5				
6				

انتخاب اساتید دانشجو در جلسه مورخ کمیته تخصصی گروه مطبوع شد و با ☐ تعداد رأی از رأی مورد ☐ ویب اعضا ☐ گرفت قرار نگرفت

نام و نام خانوادگی مدیر گروه تاریخ امضا

گام 1 سامانه پژوهشیار

صورتجلسه شورای تخصصی دانشکده- انتخاب استاد راهنما/مشاور مقطع کارشناسی ارشد/دکتری

نظریه شورای پژوهشی دانشکده:

موضوع انتخاب اساتید پایان نامه/رساله آقای/خانم دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد/دکتری رشته با عنوان پروپوزال

که به تصویب شورای تخصصی مربوط رسیده بود، در جلسه مورخ شورای پژوهشی دانشکده مطرح شد و پس از بحث و تبادل نظر مورد تصویب اکثریت اعضا (ت) (نفر) قرار گرفت نگرش

اطلاعات اساتید انتخابی

سمت	نام و نام خانوادگی	رشته تحصیلی	گرایش
استاد راهنما اول			
استاد راهنما دوم			
استاد مشاور اول			
استاد مشاور دوم			

تأیید نهایی اعضای شورای پژوهشی دانشکده

ردیف	نام و نام خانوادگی	سمت و تخصص	نوع رأی (موافق یا مخالف)	امضا
------	--------------------	------------	-----------------------------	------

1				
2				
3				
4				
5				
6				

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده تاریخ امضا

گام 2 سامانه پژوهشیار

صور تجلسه شورای تخصصی گروه- تایید پروپوزال مقطع کارشناسی ارشد/دکتری

تأییدیه راهنما و مشاور			
سمت	نام و نام خانوادگی	رشته تحصیلی-گرایش	امضا
استاد راهنما اول			
استاد راهنما دوم			
استاد مشاور اول			

نظریه کمیته تخصصی گروه	
1.ارتباط دادن موضوع تحقیق با رشته تحصیلی دانشجو:	ارتباط دارد ☐ ارتباط فرعی دارد ☐ ارتباط ندارد ☐
2.جدید بودن موضوع :	بله ☐ خیر ☐
3.اهداف بنیادی و کاربردی :	قابل دسترسی است ☐ قابل دسترسی نیست ☐ مطلوب ☐
4- تعریف مسأله :	رسا ☐ نامسا ☐
5- فرضیات :	درست تدوین شده است ☐ درست تدوین نشده و ناقص است ☐
6- روش تحقیق دانشجو :	مناسب ☐ نامناسب ☐
7- محتوا و چارچوب طرح :	از انسجام برخوردار است ☐ از انسجام برخوردار نیست ☐

تأیید نهایی اعضای شورای تخصصی گروه

ردیف	نام و نام خانوادگی	سمت و تخصص	نوع رأی (موافق یا امضا)
------	--------------------	------------	-------------------------

		مخالف)		
1				
2				
3				
4				
5				
6				

موضوع تحقیق پروپوزال خانم/آقای دانشجوی مقطع
 کارشناسی ارشد/دکتری رشته با عنوان :

در جلسه مورخ کمیته تخصصی گرر طرح ش با تعداد رأی از
 رأی مورد تصویب
 اعضا قرار گرفت قرار نگر
 نام و نام خانوادگی مدیر گروه تاریخ امضا

گام 2 سامانه پژوهشیار
 صورتجلسه شورای تخصصی دانشکده- تایید پروپوزال مقطع کارشناسی ارشد/دکتری

نظریه شورای پژوهشی دانشکده:

موضوع طرح و تحقیق پایان نامه آقای/خانم دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد/دک
 با

که به تصویب کمیته تخصصی مربوط رسیده بود، در جلسه مورخ شورای پژوهشی
 مطرح شد و پس از بحث و تبادل نظر مورد تصویب اکثریت اعضا (تعداد نفر) قرار گرفت نگر

تأیید نهایی اعضای شورای پژوهشی دانشکده

ردیف	نام و نام خانوادگی	سمت و تخصص	نوع رأی (موافق یا مخالف)	امضا
1				
2				
3				
4				
5				
6				

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده تاریخ امضا