Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
DOI: 10.22112/jwwse.2026.589801.1492

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب

بهینه‌سازی حذف COD از شیرابه لندفیل سراوان با استفاده از وتلند ترکیبی و جاذب‌های بیوچار پوسته برنج و زئولیت کلینوپتیلولایت مبتنی بر روش تاگوچی

آیلا مهروی[1]، فاطمه شریعتی[1*]، مهسا حکیمی[1]، فاتن دیوسر[2]
۱. گروه محیط‌زیست، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران
۲. گروه شیمی، دانشگاه پیام نور، رشت، ایران
ایمیل نویسنده مسئول* : f.shariati@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۱
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۵/۰۶/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۵

چکیده: شیرابه مکان دفن پسماند شهری به دلیل بار آلی بالا، تهدیدی جدی برای منابع آب است. هدف پژوهش حاضر، بهینه سازی حذف اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) از پساب وتلند مصنوعی با جاذب‌های ارزان قیمت زئولیت کلینوپتیلولایت اصلاح شده و بیوچار پوسته برنج به روش تاگوچی بود. آزمایش‌های جذب ناپیوسته (Batch) روی پساب وتلند با COD اولیه ۳۹۰۰ میلی‌گرم بر لیتر انجام شد. زئولیت با اسیدکلریدریک و کلسیناسیون، و بیوچار با پیرولیز سنتز شدند. بهینه‌سازی فرآیند با آرایه متعامد L_9 تاگوچی برای سه متغیر pH (۴، ۷ و ۱۱)، دوز جاذب (۳، ۷ و ۱۱ گرم بر لیتر) و زمان تماس (۱۲۰، ۱۸۰ و ۳۰۰ دقیقه) طراحی و تحلیل داده‌ها بر اساس نسبت (S/N) رویکرد (بزرگتر- بهتر) و آنالیز واریانس صورت گرفت. طبق نتایج، راندمان بهینه حذف COD برای زئولیت در pH=۴، دوز ۷ گرم بر لیتر و زمان ۳۰۰ دقیقه، ۷۶/۸۵ درصد و برای بیوچار در pH=۱۱، دوز ۱۱ گرم بر لیتر و زمان ۳۰۰ دقیقه، ۷۶/۸۳ درصد حاصل شد. زمان تماس و دوز جاذب به ترتیب مهم‌ترین فاکتورها برای زئولیت و بیوچار بودند. اگرچه هر دو جاذب راندمان حذف بالایی نشان دادند، زئولیت به دلیل نیاز به دوز مصرفی کمتر در شرایط بهینه، از پتانسیل مناسبی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: تصفیه شیرابه ، حذف COD، بیوچار، زئولیت، تاگوچی، مکان دفن سراوان

Optimization of COD Removal from Saravan Landfill Leachate Using a Hybrid Wetland and Rice Husk Biochar and Clinoptilolite Zeolite Adsorbents Based on the Taguchi Method

Aila Mehravi[1], Fatemeh Shariati[1]*, Mahsa Hakimi Abed[1], Faten Divsar[2]
[1]Department of Environment, La.C., Islamic Azad University, Lahijan, Iran.
[2]Department of Chemistry, Payame Noor University, Rasht, I.R. IRAN

پذیرفته شده / ویرایش نشده

Corresponding author: Dr. Fatemeh Shariati
Email: f.shariati@iau.ac.ir

Received: 12/07/2026
Revised: 06/09/2026
Accepted: 27/10/2026

Abstract
Municipal solid waste landfill leachate poses a significant threat to water resources due to its high organic load. This study aimed to optimize chemical oxygen demand (COD) removal from constructed wetland effluent using two low-cost adsorbents: modified clinoptilolite zeolite and rice-husk biochar. Batch adsorption experiments were conducted using effluent with an initial COD concentration of 3900 mg/L. Zeolite was modified through hydrochloric acid treatment and calcination, while biochar was produced by pyrolysis. Experimental optimization followed the Taguchi L9 orthogonal array, considering three factors at three levels: pH (4, 7, and 11), adsorbent dosage (3, 7, and 11 g/L), and contact time (120, 180, and 300 min). Results were evaluated using the signal-to-noise (S/N) ratio with the larger-is-better criterion and analysis of variance (ANOVA). The optimal COD removal efficiencies were 85.76% for zeolite at pH 4, 7 g/L, and 300 min, and 83.76% for biochar at pH 11, 11 g/L, and 300 min. Contact time and adsorbent dosage were the most influential factors for zeolite and biochar, respectively. Both materials demonstrated considerable potential for supplementary leachate treatment. However, zeolite was more economical because it achieved higher removal efficiency at a lower dosage, making it a promising alternative for improving effluent quality.
Keywords: Landfill leachate treatment; COD removal; Biochar; Zeolite; Taguchi method; Saravan landfill site

مقدمه

شیرابه مایع آلوده‌ای است که در نتیجه نفوذ آب به درون یک مرکز دفن تشکیل می‌شود. منشأ این مایع، علاوه بر محصولات فرعی تجزیه و بارندگی، رطوبت و دیگر مایعات موجود در پسماندهایی است که در مرکز دفن، مدیریت می شوند. خصوصیات شیمیایی و بیولوژیکی شیرابه به نوع پسماند دفن شده و میزان تجزیه آن بستگی دارد (غفاری و قنبرزاده، ۱۳۹۹). شیرابه پسماندهای جامد شهری[۱] به دلیل غلظت بالای مواد آلی، فلزات سنگین و ترکیبات محلول، تهدیدی جدی برای محیط‌زیست و سلامت انسان محسوب می‌شود. در صورت تخلیه بدون تصفیه به محیط زیست، ترکیبات پایدار موجود در آن می‌توانند منجر به کاهش اکسیژن محلول، ایجاد شرایط بی‌هوازی و تولید بو شوند؛ از این رو، تصفیه شیرابه‌های تازه به یک چالش مهم تبدیل شده است (سرخوش و همکاران، ۱۳۹۹)، شیرابه تازه به دلیل محتوای بالای اسیدهای چرب فرار، pH پایین و مقادیر بالای COD[۲] و BOD_5[3]، به‌رغم حضور برخی ترکیبات سمی، به طور کلی زیست تخریب پذیری بالایی از خود نشان می‌دهد. با این حال، با کهنه شدن شیرابه و کاهش نسبت BOD_5/COD میزان زیست تخریب پذیری آن کاهش یافته و سهم ترکیبات آلی مقاوم افزایش می‌یابد؛ بنابراین، تصفیه شیرابه‌های پایدار دشوارتر شده و نیازمند روش‌های پیشرفته است. شیرابه مکان دفن پسماند شهری را می‌توان از طریق روش‌های بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی نظیر رسوب‌دهی، اکسیداسیون، جذب

سطحی و اسمز معکوس تصفیه کرد (طهماسب زاده و همکاران، ۱۳۹۴). روش‌های بیولوژیکی، به ویژه برای شیرابه‌های تازه با نسبت بالای BOD_5/COD، از نظر هزینه بهره‌برداری مناسب هستند؛ با این حال، در حذف ترکیبات آلی مقاوم موجود در شیرابه‌های پایدار کارایی محدودی دارند. روش‌های فیزیکو شیمیایی، مانند اکسیداسیون و اسمز معکوس، می‌توانند راندمان حذف بالایی ایجاد کنند، اما معمولاً به مصرف انرژی و مواد شیمیایی بیشتر، هزینه بهره‌برداری بالاتر و مدیریت محصولات جانبی یا پساب تغلیظ شده نیاز دارند. در مقابل، جذب سطحی با استفاده از جاذب‌های طبیعی و کم هزینه، به دلیل سادگی طراحی و راهبری، هزینه نسبتاً پایین و کارایی مطلوب برای تصفیه تکمیلی شیرابه محسوب می‌شود. با این حال، اشباع جایگاه‌های فعال، گرفتگی منافذ، نیاز احتمالی به پیش‌تصفیه و مدیریت جاذب مستعمل از محدودیت‌های مهم این روش هستند (Wang& Peng 2010). تالاب‌های‌مصنوعی [۶] سامانه‌های مهندسی شده‌ای هستند که با تقلید از تالاب‌های طبیعی و با استفاده از روبات و میکروارگانیسم‌ها، کیفیت آب را بهبود می‌بخشند. این سیستم‌ها با به‌کارگیری فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در شرایط کم انرژی یا بدون مصرف انرژی، رویکردی پایدار و دوستدار محیط زیست برای حذف آلاینده‌ها ارائه می‌دهند (عمادی و موسوی، ۱۴۰۳). با این حال، پساب خروجی از این سیستم‌ها اغلب همچنان حاوی غلظت‌های بالایی از ترکیبات آلی مقاوم (دیرزیست) است و به همین دلیل برای رعایت استانداردهای سخت‌گیرانه سازمان حفاظت محیط زیست جهت تخلیه به آب‌های سطحی ناکافی می‌باشد. بر این اساس، استفاده از یک مرحله تکمیلی (پردازش نهایی یا پالایش) با جاذب‌های بومی برای دستیابی به راندمان حذف بالاتر و تصفیه نهایی شیرابه، امری ضروری است. در میان روش‌های تصفیه موجود، جذب سطحی به دلیل سادگی، هزینه نسبتاً پایین و عملکرد مطلوب، رویکردی مؤثر در حذف آلاینده‌های آلی از آب و فاضلاب محسوب می‌شود. افزون بر این، جذب سطحی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه بوده، طراحی و راهبری آن آسان است و حساسیت کمتری نسبت به ترکیبات سمی دارد؛ با این حال، اثر بخشی آن به توسعه جاذب‌های‌کارآمد بستگی دارد (Wang& Peng, 2010). در این مطالعه، زئولیت کلینوپتیلولایت [۴] و بیوچار پوست برنج [۳] به عنوان جاذب مورد استفاده قرار گرفتند. استفاده از زئولیت‌های طبیعی به علت فراوانی نسبی در کشور ایران و قیمت بسیار پایین آنها در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای را در حوزه راکتورهای‌کاتالیستی به خود جلب کرده‌اند. یکی از فراوانترین و ارزانترین زئولیت‌های‌طبیعی، کلینوپتیلولایت است (فرهادیان و همکاران ۱۳۹۶). زئولیت‌ها به دلیل چگالی پایین، حجم حفره بالا، کانال‌ها و منافذ کاملاً مشخص، ظرفیت هیدراتاسیون و بلورینگی بالا، ظرفیت تبادل یونی، توانایی جذب مولکول‌ها و یون‌ها و همچنین خواص کاتالیزوری، توجه زیادی را در تحقیقات به خود جلب کرده‌اند (جمشیدپور، ۱۴۰۲). استفاده از زئولیت‌های طبیعی و کامپوزیت‌های مبتنی بر زئولیت برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی به دلیل راندمان بالا، مقرون به صرفه بودن، توانایی حذف آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین، رنگ‌ها و سورفکتانت‌ها و پتانسیل کاهش هزینه‌های بهره‌برداری ضمن افزایش راندمان

تصفیه، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (اسفندیان، ۱۴۰۰). بیوچار یک ماده جامد، متخلخل و غنی از کربن است که از طریق پیرولیز مواد آلی در شرایط محدودیت اکسیژن تولید می شود. این ماده به دلیل سطح ویژه بالا، تخلخل زیاد، گروه‌های عاملی سطحی و پایداری شیمیایی، به عنوان یک جاذب دو ستدار محیط زیست برای‌حذف آلاینده‌ها از آب و فا ضلاب معرفی شده اســت. خواص بیوچار به نوع ماده اولیه، شــرایط پیرولیز و ویژگی‌های فیزیکی بســتگی دارد و این عوامل بر ترکیب عنصــری، محتوای کربن، توزیع منافذ، چگالی، pH و ظرفیت جذب آن تأثیر می‌گذارند (قنبری و همکاران، ۱۳۹۹). علاوه بر این، بیوچار با افزایش تخلخل خاک، حفظ رطوبت و تأمین مواد مغذی، سلامت خاک و تولید مح صولات ک شاورزی را بهبود می‌بخ شد. به دلیل ســطح ویژه بالا، ســاختار متخلخل، گروه‌های عاملی ســطحی و محتوای معدنی، این ماده به عنوان یک جاذب دوســتدار محیط زیســـت برای حذف آلاینده های هوا و آب از طریق جذب ســـطحی، پر کردن منافذ، تبادل یونی و برکنش های الکتروا ستاتیک در نظر گرفته می شود (Ghafghazi & Taghavi, 2022). در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی بر تو سعه و کارایی جاذب‌های زیســتی و معدنی در کاهش بار آلی شــیرابه اماکن دفن پســماند متمرکز شــده‌اند. زئولیت‌های طبیعی نظیر کلینوپتیلولایت به دلیل ســاختار بلوری متخلخل، در حذف آلاینده‌های بازدارنده و پیش تصــفیه شــیرابه عملکرد مؤثری دارند؛ به‌گونه‌ای که تلفیق جذب با کلینوپتیلولایت و فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته به حذف بیش از ۸۸ درصدی COD از شیرابه منجر شده ا ست (Masouleh et al, 2024). همچنین، بیوچارهای م شتق از ضایعات زیستی و لجن فا ضلاب به سبب سطح ویژه متخلخل و حفرات فعال سطحی، کارایی مناسبی در جذب کربن آلی محلول [8] و کاهش COD شیرابه‌های مسن لندفیل از خود نشــان داده‌اند (Zanona et al,2023). علاوه بر این، در ســیســتم‌های تالاب مصــنوعی، تلفیق بیوچار و زئولیت به عنوان ب سترهای جاذب متخلخل موجب ارتقای قابل توجه راندمان ت صفیه شیرابه و تثبیت آلاینده‌ها گردیده ا ست (Yang et al, 2023). با این وجود، بهینه سازی هم زمان پارامترهای مؤثر بر فرآیند جذب شامل pH ، مقدار جاذب و زمان تماس با ا ستفاده از روش‌های آماری دقیق نظیر طراحی تاگوچی بر روی پ ساب خروجی تالاب‌های م صنوعی کمترمورد ارزیابی جامع قرار گرفته است. روش تاگوچی از دهه ۱۹۸۰ میلادی در الکترونیک، مهندسی مکانیک و بعدها در مطالعات بیولوژیکی برای‌کنترل کیفیت و بهینه سازی فرآیندهای مهند سی مورد ا ستفاده قرار گرفته ا ست. این روش برای تعیین پارامترهای مؤثر و اثرات نسبی آن‌ها، کاهش تعداد آزمایش‌ها و بهبود دقت نتایج به کار می‌رود، در حالی که برای تحلیل داده‌ها از تحلیل واریانس (ANOVA) ا ستفاده می شود (Talaei Bejarbaneh et al, 2015). علیرغم تحقیقات گسترده در زمینه کاربرد جاذب‌های مختلف در ت صفیه فاضلاب، بهینه‌سازی جامع حذف COD از شیرابه‌های واقعی و پیچیده لندفیل به ویژه از طریق ارزیابی مقایسه‌ای مستقیم بین زئولیت کلینوپتیلولایت طبیعی فعال شده با اسید و بیوچار بومی پوست برنج مورد توجه محدود قرار گرفته است. علاوه بر این، د ستیابی به راهکارهای پایدار و مقرون به صرفه برای مرحله پالایش شیرابه مکان دفن پ سماند شهری که دارای بار آلودگی بالایی اســت، همچنان یک چالش زیســت محیطی عمده محســوب می‌شــود. از این رو، هدف اصــلی و نوآوری این مطالعه،

بهینه سازی و مقایسه سیستماتیک حذف اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) از پساب یک تالاب مصنوعی هیبریدی (که شیرابه مکان دفن پسماند شهری را تصفیه می‌کند) با استفاده از زئولیت طبیعی فعال شده با اسید و بیوچار بومی پوست برنج بود. در این راستا، از رویکرد طراحی مستحکم تاگوچی بر پایه آرایه متعامد L_9 برای‌بررسی اثرات pH محلول، مقدار جاذب و زمان تماس بر حذف COD استفاده شد. این مطالعه دیدگاه‌های‌کاربردی، مقیاس‌پذیر و مقرون به صرفه را در زمینه تصفیه تکمیلی شیرابه‌های واقعی پس از فرآیند تصفیه در تالاب‌های مصنوعی هیبریدی ارائه می‌دهد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه و نمونه‌برداری شیرابه

نمونه‌های شیرابه مورد استفاده در این پژوهش از مکان دفن پسماند شهری سراوان (جنوب رشت، استان گیلان، ایران) جمع‌آوری شد. این سایت، مرکز اصلی مدیریت پسماند شهر رشت است که با تولید روزانه بیش از ۵۳۰ تن پسماند، با چالش‌های مربوط به مدیریت حجم بالای زباله مواجه است. مکان دفن مذکور دارای قدمت بالای ۱۵ سال است که با توجه به pH بالای ۸ و نسبت BOD_5/COD پایین و کمتراز ۰/۱ نشان‌دهنده فاز متانوژنیک و مراحل تجزیه پسماند و احتمال تولید شیرابه با ترکیبات آلی مقاوم است. نمونه‌برداری از خروجی تالاب هیبریدی زیرسطحی انجام شد که وظیفه تصفیه اولیه شیرابه را بر عهده دارد. این مطالعه با هدف ارزیابی‌کارایی جاذب‌ها به عنوان یک مرحله تکمیلی طراحی شد. غلظت اولیه COD در نمونه پساب، مطابق با روش استاندارد ۵۲۲۰ (Standard Method, 2017)، ۳۹۰۰ میلی‌گرم بر لیتراندازه‌گیری شد و نمونه‌ها جهت حفظ پایداری شیمیایی در دمای۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند.

۲-۲. تهیه بیوچار پوست برنج

پوست برنج به عنوان ماده اولیه از یک کارخانه شالیکوبی جمع‌آوری شد. سپس، نمونه‌ها شست‌وشو شده و در آون در دمای۷۰ درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند. در ادامه، نمونه‌ها در یک کوره الکتریکی تحت فرآیند پیرولیز قرار گرفتند. این فرآیند در دمای۶۰۰ درجه سلسیوس، با سرعت گرمایش ۱۰ درجه سلسیوس بر دقیقه، به مدت ۳ ساعت و در شرایط محدودیت اکسیژن انجام شد. بیوچار حاصل تا سرد شدن تا دمای اتاق نگهداری شد و سپس برای استفاده در آزمایش‌های جذب سطحی ذخیره شد (نبی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷).

۲-۳. طراحی آزمایش بر اساس روش تاگوچی

به منظور بهینه‌سازی شرایط حذف COD و به حداقل رساندن تعداد آزمایش‌های‌مورد نیاز، از روش طراحی آزمایش تاگوچی با استفاده از نرم‌افزار Minitab 19 استفاده شد. در این مطالعه، سه پارامترعملیاتی شامل pH اولیه (۴، ۷ و ۱۱)، مقدار جاذب (۳، ۷ و ۱۱ گرم بر لیتر) و زمان تماس (۱۲۰، ۱۸۰ و ۳۰۰ دقیقه) در سه سطح (مطابق با جدول ۱) برای هر دو جاذب بیوچار پوست برنج و زئولیت مورد بررسی قرار گرفتند. انتخاب این بازه‌های آزمایشی بر اساس ملاحظات علمی و جهت اطمینان از جمع‌آوری داده‌های جامع انجام شد؛ به‌طوری که بازه pH (۴ تا ۱۱) با هدف بررسی تأثیر چگالی بار سطحی و یونیزاسیون گروه‌های عاملی در نظر گرفته شد. همچنین، دوز جاذب و زمان تماس (۱۲۰ تا ۳۰۰ دقیقه) برای مشاهده گذار از مرحله جذب اولیه به مرحله تعادل، مطابق با مطالعات تثبیت شده در فرآیندهای مشابه تصفیه پساب، انتخاب شدند. در تمامی آزمایش‌ها، غلظت اولیه COD در مقدار ثابت ۳۹۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نگه داشته شد. بر اساس سه عامل و سه سطح مورد بررسی در این تحقیق، آرایه متعامد $L_9(3^3)$[۷] جهت کاهش تعداد اجراهای آزمایشی انتخاب گردید. آرایه‌های متعامد L9 جداگانه‌ای برای بیوچار پوست برنج و زئولیت به‌کار گرفته شدند. تمامی آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شدند و میانگین راندمان حذف COD به عنوان متغیر پاسخ برای تحلیل تاگوچی مورد استفاده قرار گرفت. راندمان حذف COD (%) با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد:

$$R\% = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (۱)$$

که در آن، C_0 و C_e به ترتیب غلظت‌های اولیه و نهایی COD (میلی‌گرم بر لیتر) هستند. علاوه بر این، جهت تحلیل داده‌ها، از نسبت سیگنال به نویز (S/N) بر اساس رویکرد «هر چه بزرگ‌تر، بهتر» استفاده شد (Eidi-Zadeh & Azari, 2017).

۲-۴. آزمایش‌های جذب ناپیوسته (Batch)

pH اولیه نمونه‌ها با استفاده از محلول‌های اسید سولفوریک (H_2SO_4) و هیدروکسید سدیم (NaOH) با غلظت ۱ نرمال تنظیم گردید. سپس، مقدار مشخصی از جاذب به حجم معینی از شیرابه (۲۵۰ میلی‌لیتر) افزوده شد و نمونه‌ها در یک شیکر آزمایشگاهی با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه (rpm) و در دمای۲۵ درجه سانتی‌گراد تکان داده شدند. پس از سپری شدن زمان تماس، محلول‌ها جهت ته‌نشینی قرار داده شد و سپس توسط کاغذ صافی واتمن شماره ۴۰ فیلترشدند. تمامی آزمایش‌هادر سه تکرار انجام و میانگین نتایج گزارش شد (Teymourian et al, 2018).

جدول ۱. آزمایش‌های‌طراحی‌شده به روش تاگوچی برای‌جاذب‌ها (زئولیت و بیوچار پوست برنج)

Level	W (g/L)	pH	t (min)
۱	۳	۴	۱۲۰
۲	۷	۴	۱۸۰
۳	۱۱	۴	۳۰۰
۴	۳	۷	۱۸۰
۵	۷	۷	۳۰۰
۶	۱۱	۷	۱۲۰
۷	۳	۱۱	۳۰۰
۸	۷	۱۱	۱۲۰
۹	۱۱	۱۱	۱۸۰

پذیرفته شده / ویرایش نشده

۲-۵. اندازه‌گیری COD

اکسیژن مورد نیاز شیمیایی COD با استفاده از فوتومتر (مدل AL100) ساخت شرکت (Aqualytic)، آلمان و مطابق با روش رنگ‌سنجی برگشت بسته روش استاندارد (APHA et al., 2023 ۵۲۲۰ D)؛ تعیین شد. با توجه به بار آلی بالای شیرابه، نمونه‌هایی که فراتر از محدوده اندازه‌گیری دستگاه بودند، پیش از آنالیز با استفاده از آب دوبار تقطیر شده به‌طور مناسب رقیق شدند و غلظت‌های نهایی با اعمال فاکتورهای رقت مربوطه محاسبه گردیدند. در این مطالعه، pH اولیه، مقدار جاذب و زمان تماس به عنوان عوامل قابل کنترل در طراحی آزمایش تاگوچی انتخاب شدند. جهت شناسایی ترکیب بهینه سطوحِ عوامل برای بیشینه‌سازی راندمان حذف COD، از نسبت سیگنال به نویز (S/N) استفاده شد. با توجه به این که هدف این پژوهش بیشینه‌سازی راندمان حذف COD بود، معیار نسبت S/N از نوع (larger-is-better) به کار گرفته شد Teymourian et al, (2018).

$$\frac{S}{N} = -10\log_{10}\left(\frac{1}{n}\Sigma\frac{1}{yi}\right)$$

(۲)

که در آن:

Y_i: مقدار اندازه‌گیری شده متغیر پاسخ

n: تعداد تکرارهای آزمایشی

نسبت‌های بالاتر سیگنال به نویز (S/N) نشان‌دهنده عملکرد برتر و حساسیت کمتر (مقاومت بالاتر) در برابر عوامل نویز است. در این مطالعه، نسبت S/N بالاتر بیانگر راندمان حذف COD بیشتر و پایداری بیشتردر برابر تغییرات کنترل نشده آزمایشی است. علاوه بر این، به منظور برآورد خطای آزمایشی و تعیین معناداری آماری و سهم نسبی هر یک از عوامل عملیاتی، تحلیل واریانس (ANOVA) انجام شد.

۲-۶. تحلیل آماری

به منظور تحلیل داده‌ها، تعیین شرایط بهینه و ارزیابی تأثیر هر یک از عوامل عملیاتی، از نرم‌افزار Minitab 19 استفاده شد. تحلیل نسبت سیگنال به نویز (S/N) بر اساس معیار (larger-is-better) جهت بیشینه‌سازی راندمان حذف صورت گرفت. علاوه بر این، تحلیل واریانس (ANOVA) در سطح اطمینان ۹۵ درصد به منظور برآورد سهم خطا و ارزیابی معناداری آماری هر یک از عوامل انجام شد.

۳. نتایج و بحث

نتایج آزمایشگاهی نشان داد که راندمان حذف COD به نوع جاذب و شرایط عملیاتی بستگی دارد (جدول ۲). برای زئولیت کلینوپتیلولایت بیشترین راندمان حذف COD در میان نه اجرای آزمایشی (۸۰/۱۳ درصد) در pH برابر با ۴، مقدار جاذب ۱۱ گرم بر لیتر و زمان تماس ۳۰۰ دقیقه مشاهده شد. به‌طور کلی، افزایش مقدار جاذب و زمان تماس موجب بهبود راندمان حذف

COD شد. برای بیوچار پوست برنج، بیشترین مقدار (۷۶/۹۲ درصد) تحت همین شرایط (pH = 4، مقدار جاذب۱۱ گرم بر لیتر و زمان تماس ۳۰۰ دقیقه) به دست آمد.

جدول ۲. راندمان‌های‌حذف COD و نسبت‌های‌سیگنال به نویز حاصل از آزمایش‌های‌مجزای‌آرایه متعامد L_9 با استفاده از زئولیت و بیوچار پوست برنج.

Test No	Adsorbent	S/N (dB)	COD Removal (%)	Final COD (mg/L)	Initial COD (mg/L)	Contact time (min)	Adsorbent dose (g/l)	pH
۱	Clinoptilolite zeolite	۳۷/۳۵	۷۳/۷۲٪	۱۰۲۵	۳۹۰۰	۱۲۰	۳	۴
۲		۳۶/۷۴٪	۶۸/۶۹٪	۱۲۲۱	۳۹۰۰	۱۸۰	۷	۴
۳		۳۸/۰۸٪	۸۰/۱۳٪	۷۷۵	۳۹۰۰	۳۰۰	۱۱	۴
۴		۳۶/۸۴٪	۶۹/۵۱٪	۱۱۸۹	۳۹۰۰	۱۸۰	۳	۷
۵		۳۷/۳۰٪	۷۳/۲۳٪	۱۰۴۴	۳۹۰۰	۳۰۰	۷	۷
۶		۳۶/۸۹٪	۶۹/۸۷٪	۱۱۷۵	۳۹۰۰	۱۲۰	۱۱	۷
۷		۳۷/۱۴٪	۷۱/۹۵٪	۱۰۹۴	۳۹۰۰	۳۰۰	۳	۱۱
۸		۳۷/۹۷٪	۷۹/۱۸٪	۸۱۲	۳۹۰۰	۱۲۰	۷	۱۱
۹		۳۶/۹۹٪	۷۰/۷۴٪	۱۱۴۱	۳۹۰۰	۱۸۰	۱۱	۱۱
10	Rice-husk biochar	۳۷/۱۲٪	۷۱/۷۹٪	۱۱۰۰	۳۹۰۰	۱۲۰	۳	۴
۲۰		۳۶/۳۵٪	۶۵/۷۲٪	۱۳۳۷	۳۹۰۰	۱۸۰	۷	۴
۳۰		۳۷/۷۲٪	۷۶/۹۲٪	۹۰۰	۳۹۰۰	۳۰۰	۱۱	۴
۴۰		۳۶/۵۸٪	۶۷/۴۶٪	۱۲۶۹	۳۹۰۰	۱۸۰	۳	۷
۵۰		۳۷/۴۳٪	۷۴/۳۶٪	۱۰۰۰	۳۹۰۰	۳۰۰	۷	۷
۶۰		۳۷/۲۸٪	۷۳/۰۸٪	۱۰۵۰	۳۹۰۰	۱۲۰	۱۱	۷

پذیرفته شده / ویرایش نشده

۷	۳۷/۱۸٪	۷۲/۳۱٪	۱۰۸۰	۳۹۰۰	۳۰۰	۳	۱۱
۸	۳۷/۷۲٪	۷۶/۹۲٪	۹۰۰	۳۹۰۰	۱۲۰	۷	۱۱
۹	۳۶/۹۵٪	۷۰/۳۸٪	۱۱۵۵	۳۹۰۰	۱۸۰	۱۱	۱۱

یادداشت : برای‌هر جاذب از آرایه‌های متعامد L_9 مجزا استفاده شد. آزمایش‌ها در سه تکرار انجام و نسبت‌های سیگنال به نویز (S/N) بر اساس معیار «هر چه بزرگ‌تر، بهتر» محاسبه گردیدند.

۳-۱. تحلیل نسبت سیگنال به نویز (S/N) برای‌حذف COD

به منظور بررسی تأثیر عوامل مختلف بر حذف COD، از معیار نسبت سیگنال به نویز (S/N) با رویکرد «هر چه بزرگ‌تر، بهتر» استفاده شد. نتایج نشان داد که برای جاذب زئولیت، زمان تماس بیشترین تأثیر را بر حذف COD داشت (Δ=۰/۶۴۵) و پس از آن به ترتیب pH=0/381 و مقدار جاذب Δ=0/224 قرار داشتند. بر اساس بالاترین نسبت S/N، شرایط بهینه برای حذف COD با استفاده از زئولیت، شامل pH برابر با ۴، مقدار جاذب ۷ گرم بر لیتر و زمان تماس ۳۰۰ دقیقه تعیین گردید. در مورد جاذب بیوچار پوست برنج، تحلیل نسبت S/N آشکار ساخت که زمان تماس نیز بیشترین تأثیر را بر حذف COD داشته است (Δ=0/966) و پس از آن به ترتیب مقدار جاذب (Δ=0/424) و pH (Δ=0/230) قرار داشتند. بر این اساس، شرایط بهینه برای‌حذف COD شامل pH برابر با ۱۱، مقدار جاذب ۱۱ گرم بر لیتر و زمان تماس ۳۰۰ دقیقه تعیین شد. جدول ۳ مقادیر نسبت S/N را به ترتیب برای جاذب‌های زئولیت و بیوچار پوست برنج حذف (COD) نشان می‌دهد.

جدول ۳. مقادیر نسبت سیگنال به نویز (S/N) برای‌حذف COD با استفاده از جاذب‌های زئولیت و بیوچار پوست برنج.

Adsorbent	Factor	Level 1	Level 2	Level 3	Delta (Δ)	Rank
Clinoptilolite zeolite	pH	۳۷/۳۸	۳۷/۰۰	۳۷/۳۶	۰/۳۸	۲
	W(g/l)	۳۷/۱۱	۳۷/۳۳	۳۷/۳۱	۰/۲۲	۳

	Time (min)	۳۷/۰۴	۳۶/۸۵	۳۷/۵۰	۰/۶۴	۱
Rice-husk biochar	pH	۳۷/۱۷	۳۷/۰۹	۳۷/۳۲	۰/۲۳	۳
	W(g/l)	۳۷/۰۰	۳۷/۱۶	۳۷/۴۲	۰/۴۲	۲
	Time (min)	۳۷/۳۷	۳۶/۶۲	۳۷/۵۹	۰/۹۶	۱

۳-۲. *آزمایشات تائیدی*

بر اساس تحلیل نسبت سیگنال به نویز (S/N) با استفاده از روش تاگوچی، شرایط بهینه برای هر جاذب تعیین شد. لازم به ذکر است که در روش تاگوچی، سطح بهینه بر مبنای میانگین نسبت S/N برای هر عامل انتخاب می‌شود، نه صرفاً بر اساس بیشترین راندمان حذف مشاهده شده در یک اجرای آزمایشی منفرد. پس از تعیین شرایط بهینه توسط تاگوچی، آزمایش‌های تأییدی انجام شدند. برای زئولیت، شرایط بهینه شامل pH = ۴، مقدار جاذب ۷ گرم بر لیتر و زمان تماس ۳۰۰ دقیقه بود. تحت این شرایط، راندمان حذف پیش‌بینی شده ۷۶/۸۵ درصد بود، در حالی که مقدار تجربی (آزمایشگاهی) ۷۶/۵۳درصد با خطای نسبی ۰/۴۲ درصد به دست آمد. برای بیوچار پوست برنج، شرایط بهینه شامل pH = ۱۱، مقدار جاذب ۱۱ گرم بر لیتر و زمان تماس ۳۰۰ دقیقه بود. راندمان حذف پیش‌بینی‌شده ۷۶/۸۳ درصد بود، در حالی که مقدار تجربی۷۵/۰۳ درصد و متناظر با خطای نسبی۲/۳۴ درصد به دست آمد. تطابق نزدیک میان نتایج پیش‌بینی شده و تجربی، دقت و قابلیت اطمینان مدل تاگوچی را برای پیش‌بینی حذف COD تأیید می‌کند.

۳-۳. *تحلیل واریانس (ANOVA) برای جاذب بیوچار*

نتایج تحلیل واریانس نشان داد که مقدار P برای زمان تماس، مقدار بیوچار و pH به‌ترتیب برابر با ۰/۲۳۶، ۰/۵۰ و ۰/۷۶۳ بود. از آنجا که تمامی این مقادیر بزرگ‌تر از ۰۵ / ۰ هستند، هیچ یک از عوامل بررسی شده در سطح معناداری $\alpha=0/05$ اثر آماری معناداری بر راندمان حذف COD نشان ندادند. با این‌حال، عدم معناداری آماری نباید به عنوان اثبات نبود اثر عوامل تفسیر شود؛ زیرا آرایه متعامد L_9 و درجه آزادی محدود هر عامل ($df = 2$) می‌تواند توان آماری آزمون را کاهش دهد. در میان عوامل بررسی‌شده، زمان تماس با مقدار $F = 3/24$ بیشترین مقدار آماره F و با سهم ۵۸/۴۳٪ بیشترین سهم نسبی را در تغییرات کل

داشت. پس از آن، مقدار مصرف بیوچار با F=1/00 و سهم ۱۷/۹۹٪، pH با F=0/31 و سهم ۵/۵۶ قرار گرفتند. سهم خطا از تغییرات کل نیز ۱۸/۰۲٪ بود. این نتایج نشان می‌دهد که زمان تماس، در محدوده عوامل و سطوح بررسی شده، مهم‌ترین عامل نسبی برای تغییرات راندمان حذف COD بوده است؛ با این‌حال، به دلیل مقدار P بزرگ‌تر از ۰/۰۵، این اثر از نظر آماری معنادار نبود. با توجه به این محدودیت آماری، شرایط بهینه عملیاتی بر اساس بیشترین میانگین نسبت سیگنال به نویز S/N در سطوح مختلف عوامل تعیین شد. بنابراین، تحلیل S/N برای انتخاب سطوح بهینه به‌کار رفت، درحالی‌که نتایج ANOVA برای ارزیابی معناداری آماری عوامل استفاده شدند. اعتبار شرایط بهینه تعیین شده نیز با انجام آزمایش تأییدی بررسی شد.

جدول ۴. تحلیل واریانس (ANOVA) راندمان حذف COD در فرایند جذب با استفاده از بیوچار پوسته برنج

Source	Rank	Contribution (%)	P-value	F-value	Mean square	Sum of squares	DF
Contact time	۱	۵۸/۴۳	۰/۲۳۶	۳/۲۴	۳۹/۰۶	۷۸/۱۲	۲
Biochar dosage	۲	۱۷/۹۹	۰/۵۰۰	۱/۰۰	۱۲/۰۳	۲۴/۰۵	۲
pH	۳	۵/۵۶	۰/۷۶۳	۰/۳۱	۳/۷۲	۷/۴۴	۲
Error		۱۸/۰۲			۱۲/۰۵	۲۴/۰۹	۲
Total		۱۰۰/۰۰			-	۱۳۳/۷۰	۸

۳-۴. تحلیل واریانس (ANOVA) برای جاذب زئولیت

بر اساس جدول ۵، نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) برای راندمان حذف COD نشان داد که در سطح اطمینان ۹۵ درصد، هیچ یک از عوامل مورد بررسی (pH، مقدار جاذب و زمان تماس) اثر آماری معناداری نداشتند ($P>0.05$). با این حال، درصد سهم مشارکت نشان می‌دهد که pH با ۳۷ / ۹۷ درصد، بیشترین سهم را در فرایند حذف به خود اختصاص داده است و پس از آن زمان تماس (۱۵ / ۰۱ درصد) و مقدار مصرف زئولیت (۵ / ۳۷ درصد) در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

جدول ۵. تحلیل واریانس (ANOVA) راندمان حذف COD در فرایند جذب توسط زئولیت

Source	Rank	Contribution (%)	P-value	F-value	Mean square	Sum of squares	DF
Contact time	۲	۱۵/۰۱	۰/۷۳۵	۰/۳۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۲
Zeolite dosage (g)	۳	۵/۳۷	۰/۸۸۵	۰/۱۳	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۷	۲
pH	۱	۳۷/۹۷	۰/۵۲۳	۰/۹۱	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۵۱	۲
Error		۴۱/۶۵	–	–	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۵۶	۲
total		۱۰۰/۰۰	–	–	–	۰/۰۱۳	۸

تحلیل واریانس (ANOVA) با استفاده از راندمان حذف COD به عنوان متغیر پاسخ انجام شد. درصد سهم مشارکت از نسبت مجموع مربعات هر عامل به مجموع مربعات کل محاسبه گردید (جدول ۵). به منظور اعتبارسنجی نتایج بهینه‌سازی پیش‌بینی‌شده توسط روش تاگوچی، یک آزمایش تأییدی تحت شرایط عملیاتی بهینه انجام شد. راندمان تجربی (آزمایشگاهی) حذف COD به دست آمده در شرایط بهینه pH برابر با ۴، مقدار زئولیت ۷ گرم بر لیتر و زمان تماس ۳۰۰ دقیقه برابر با 76/53درصد بود که تطابق بسیار مناسبی با مقدار پیش‌بینی شده ۷۶/۸۵ درصد نشان می‌دهد. خطای نسبی ۰/۴۲ درصدی، دقت و قابلیت اطمینان بالای طراحی تاگوچی را در بهینه‌سازی فرایند حذف COD با استفاده از زئولیت تأیید می‌کند.

۴. بحث و نتیجه گیری

نتایج تحلیل تاگوچی نشان داد که pH، مقدار جاذب و زمان تماس، بسته به نوع جاذب، اثرات متفاوتی بر راندمان حذف COD دارند. در مورد زئولیت کلینوپتیلولیت، تحلیل نسبت سیگنال به نویز (S/N) نشان داد که زمان تماس بیشترین تأثیر را بر راندمان حذف COD داشته است. افزایش زمان تماس، فرصت بیشتری برای برقراری برهم‌کنش میان آلاینده‌ها و سطح جاذب فراهم می‌کند و در نتیجه، دستیابی به تعادل جذب را تسهیل می‌نماید (مرندی و همکاران، ۱۳۹۸). همچنین، زئولیت در شرایط اسیدی

پذیرفته شده / ویرایش نشده

عملکرد بهتری نشان داد. این موضوع را می‌توان به سطح ایجادشده در بار سطحی جاذب و به دنبال آن، تقویت برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی میان سطح جاذب و ترکیبات آلی موجود در شیرابه نسبت داد. ظرفیت جذب بالای زئولیت نیز به ساختار بلوری آلومینوسیلیکاتی آن مرتبط است؛ ساختاری که دارای‌کانال‌ها و منافذ منظم و ظرفیت تبادل یونی بالایی است (جمشیدی پور، ۱۴۰۲). شایان ذکر است که اگرچه در برخی مطالعات، شرایط قلیایی به عنوان شرایط بهینه برای‌حذف فلزات سنگین، ازجمله حذف جیوه با استفاده از زئولیت، گزارش شده است (اسفندیان، ۱۴۰۰)، نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که محیط اسیدی برای‌حذف COD کارایی بیشتری دارد. این تفاوت احتمالاً به ماهیت متفاوت آلاینده‌های آلی و تفاوت در سازوکارهای جذب آن‌ها در مقایسه با فلزات سنگین مربوط است. در مورد بیوچار پوست برنج، تحلیل نسبت سیگنال به نویز (S/N) نشان داد که زمان تماس مهم‌ترین عامل عملیاتی مؤثر است و پس از آن، مقدار مصرف جاذب و pH قرار گرفتند. ساختار متخلخل بیوچارکه با وجود گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن، از جمله گروه‌های‌کربوکسیل و هیدروکسیل، مشخص می‌شود، ظرفیت جذب را از طریق افزایش تعداد جایگاه‌های‌فعال در دسترس افزایش می‌دهد (Teymourian Motlagh et al, 2018). علاوه بر این, عملکرد مطلوب بیوچار در شرایط قلیایی به تغییرات ایجاد شده در ویژگی‌های سطحی و تقویت برهم‌کنش میان جاذب و آلاینده‌های آلی نسبت داده می‌شود(Shabani et al, 2020, Teymourian Motlagh et al, 2018) . تحلیل مقایسه‌ای نشان داد که اگرچه هر دو جاذب ظرفیت قابل توجهی برای‌حذف COD از شیرابه دارند، شرایط بهینه عملکرد آن‌ها به دلیل تفاوت در ساختار سطح و ساز وکارهای جذب با یکدیگر متفاوت است. زئولیت کلینوپتیلولیت در محیط اسیدی کارایی بالاتری نشان داد و تبادل یونی و جذب فیزیکی از سازوکارهای مهم حذف به شمار می‌روند (جمشیدی پور، ۱۴۰۲). در مقابل، بیوچار پوست برنج در شرایط قلیایی عملکرد بهتری داشت؛ در این شرایط، علاوه بر جذب فیزیکی، برهم‌کنش‌های شیمیایی و الکترواستاتیکی نیز در فرایند حذف مشارکت دارند(Shabani et al, 2020). نتایج همچنین نشان داد که میان پیش‌بینی‌های مدل تاگوچی و یافته‌های تجربی توافق خوبی وجود دارد و اختلاف میان مقادیر پیش‌بینی شده و تجربی اندک است. این یافته تأیید می‌کند که روش تاگوچی ابزار مؤثری برای بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی و پیش‌بینی عملکرد سیستم در حذف COD از شیرابه است. این نتایج با مطالعات پیشین همخوانی دارد که نشان داده‌اند مقدار مصرف جاذب و زمان تماس بر راندمان جذب اثر می‌گذارند (Teymourian Motlagh et al, 2018) و جذب به‌طور تدریجی و تا رسیدن به تعادل افزایش می‌یابد، زیرا جایگاه‌های فعال روی سطح جاذب به‌تدریج اشغال می‌شوند (نبی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷). افزون بر این، اگرچه نقش تعیین‌کننده پارامترهای عملیاتی در جذب فلزات سنگین، از جمله حذف جیوه، گزارش شده است (اسفندیان، ۱۴۰۰)، یافته‌های مطالعه حاضر نشان می‌دهد که این پارامترها در بهینه‌سازی حذف بار آلی از شیرابه نیز اهمیت دارند. در نهایت، عملکرد حذف به دست آمده در این مطالعه با نتایج سایر سامانه‌های تصفیه پساب قابل مقایسه است؛ از جمله حذف حدود ۸۸ درصد COD در تالاب‌های مصنوعی ترکیبی (هیبریدی) حاوی بستر پوکه

معدنی (Abedi-Koupai et al, 2022). همچنین گزارش شده است که بیوچارهای اصلاح شده در حذف آلاینده‌ها از محیط‌های آبی مؤثرند (Shabani et al, 2020).

۵ . نتیجه‌گیری

در مجموع، یافته‌های این مطالعه نشان داد که هر دو جاذب زئولیت کلینوپتیلولیت و بیوچار پوست برنج در کاهش COD شیرابه مؤثر هستند. با این‌حال، هر دو جاذب در شرایط بهینه، کارایی بسیار مشابه و نزدیکی در حذف COD از خود نشان دادند (راندمان آزمایشگاهی ۷۶/۵۳ درصد برای زئولیت در برابر ۷۵/۰۳ درصد برای بیوچار، با اختلاف کمتر از ۱/۵ درصد). برای انتخاب جاذب در کاربردهای‌صنعتی، باید علاوه بر راندمان حذف، ملاحظات عملیاتی متعددی ازجمله هزینه مواد شیمیایی مورد نیاز برای تنظیم pH به ویژه هنگام استفاده از بیوچار در شرایط قلیایی، پیچیدگی فرایند، قابلیت احیا یا تعویض جاذب و الزامات مدیریت پسماند نیز مدنظر قرار گیرند. مزیت مهم بیوچار در مطالعه حاضر، افزون بر عملکرد رقابتی آن، منشأ پایدار آن به‌عنوان محصول حاصل از پسماند کشاورزی (پوست برنج) است. این ویژگی با اصول اقتصاد چرخشی و بازیافت منابع همخوانی دارد. بنابراین، انتخاب میان این دو جاذب باید بر اساس ارزیابی‌جامع معیارهای‌فنی، اقتصادی و محیط زیستی انجام شود. همچنین تفاوت در شرایط عملیاتی بهینه آن‌ها نشان می‌دهد که انتخاب نهایی جاذب باید بر پایه ویژگی‌های شیمیایی محیط تصفیه و ترکیب شیرابه صورت گیرد. علاوه بر این، به‌کارگیری این جاذب‌ها در ترکیب با سیستم‌های بیولوژیکی مانند تالاب‌های مصنوعی می‌تواند راهکاری تکمیلی برای ارتقای تصفیه شیرابه مکان دفن پسماند شهری باشد. در چنین سیستم‌هایی، زئولیت و بیوچار با فراهم کردن سطوح فعال و بسترمتخلخل می‌توانند بخشی از ترکیبات آلی و سایر آلاینده‌ها را از طریق فرایندهای جذب و تبادل یونی حذف کنند. در همین حال، ریشه گیاهان، ریزوسفر و جوامع میکروبی در بسترتالاب، با انجام فرایندهای بیولوژیکی و افزایش تماس میان شیرابه و بستر تصفیه، به حذف بیشتر آلاینده‌ها کمک می‌کنند. بر این اساس، این جاذب‌ها می‌توانند به عنوان مرحله پیش‌تصفیه، مرحله تصفیه نهایی (تکمیلی) یا بخش میانی بستر تالاب مصنوعی به کار روند. تلفیق این جاذب‌ها با سازوکارهای مبتنی بر گیاهان و میکروب‌ها می‌تواند عملکرد کلی سیستم تصفیه را بهبود بخشد. با این‌حال، تعیین نقش مناسب برای هر جاذب و ارزیابی عملکرد تلفیقی آن‌ها مستلزم انجام مطالعات در مقیاس نیمه صنعتی (پایلوت) و بررسی پارامترهایی نظیر زمان ماند هیدرولیکی، بارگذاری آلی، پایداری جاذب و ظرفیت واقعی تصفیه در سیستم است. در مجموع، بهینه‌سازی شرایط عملیاتی با استفاده از روش تاگوچی می‌تواند به بهبود راندمان حذف COD و ارتقای عملکرد فرایند جذب کمک کند. با این‌حال، دستیابی به یک سیستم تصفیه پایدار و قابل مقیاس‌پذیری برای‌کاربردهای صنعتی، نیازمند تلفیق جذب با فناوری‌های بیولوژیکی به ویژه تالاب‌های مصنوعی است. چنین رویکرد تلفیقی می‌تواند کارآمدتر از به‌کارگیری مجزای هر یک از این فرایندها باشد.

پی نوشت ها

۱- Landfill leachate

2- COD (Chemical Oxygen Demand)

3 - BOD_5 (Biological Oxygen Demand)

۳- Rice-husk biochar

۴ - Clinoptilolite zeolite

۵ - Taguchi method

۶ - Constructed wetland

7 - L_9 Taguchi Orthogonal Array

8 - DOC (Dissolved Organic Carbon)

اظهارنامه مالی

این مقاله هیچگونه حمایت مالی از سازمانهای‌دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

قدردانی:

این مقاله بخشی از رساله دکتری خانم ایلا مهروی در رشته علوم و مهندسی محیط زیست است. نویسندگان بدین وسیله از حمایت‌های‌شهرداری رشت و دانشگاه پیام نور مرکز رشت صمیمانه قدردانی می‌نمایند.

ملاحظات اخلاقی:

این پژوهش شامل هیچ‌گونه آزمایش روی نمونه‌های‌انسانی یا حیوانی نبوده است. تمامی‌مراحل و دستورالعمل‌های‌آزمایشگاهی طبق ضوابط و مقررات ایمنی محیط زیست و مدیریت پسماند انجام شده است.

استفاده از هوش مصنوعی:

پذیرفته شده / ویرایش شده

از مدل هوش مصنوعی (Chat GPT) محصول (Open AI) صرفاً جهت ویراستاری زبانی و ترجمه متن استفاده شده است. نویسندگان مسئولیت کامل تمام محتوای علمی ارائه شده در این مقاله را بر عهده می‌گیرند.

مراجع

اسفندیان، ح.، (۱۴۰۰)، بهینه‌سازی فرآیند جذب جیوه از محلول آبی با استفاده از کامپوزیت پویریول/کلینوپتیلولیت به روش تاگوچی، مجله مهندسی آب و محیط زیست، ۷(۲)، ۱۹۲-۲۰۶

https://doi.org/10.22034/jewe.2020.260842.1480

جمشیدی‌پور، ع.، (۱۴۰۲)، زئولیت‌های طبیعی و مصنوعی. نشریه نخبگان علوم و مهندسی، ۸(۱)، ۱۰۳-۱۰۹

https://civilica.com/doc/1661694

سرخوش، م، نجف‌پور، ع، تبریزی آزاد، م.، (۱۳۹۹)، کاربرد مواد جاذب در تصفیه شیرابه پسماند جامد شهری: یک مطالعه مروری. فصلنامه پژوهش در سلامت محیط، ۶(۲)، ۱۹۴-۱۹۷

https://doi.org/10.34172/jrrh.2020.25.

طهماسب‌زاده، م، عمویی، م، گل‌باز، س، فرزادکیا، م، کرمانی، م، غلامی، م، اصغرنیا، ه.، (۱۳۹۴)، حذف آمونیوم از شیرابه لندفیل با استفاده از هاضم های بی هوازی. مجله دانشگاه علوم پزشکی بابل، ۱۷(۱۲)، ۳۳-۳۹

https://doi.org/10.22088/jbums.17.12.33.

عابدی کوپایی، ج، عرب‌نسب آبادی، شیخان، ع.، (۱۴۰۱)، بررسی کارایی تالاب مصنوعی ترکیبی با بستر پومیس و گیاه وتیور در تصفیه پساب شهری، مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۶(۱)، ۱-۱۲

https://doi.org/10.47176/jwss.26.1.49829

عمادی بالادهی، م، موسوی‌الیردی، ع.، (۱۴۰۳)، مروری بر تصفیه شیرابه لندفیل در تالاب مصنوعی، مطالعات علوم محیط زیست، ۹(۱)، ۸۰۷۲-۸۰۹۱

https://doi.org/10.22034/JESS.2023.396606.2028.

پذیرفته شده / ویرایش نشده

غفاری راد، م، قنبر زاده، م.، (۱۳۹۹)، بررسی میزان تاثیر بارش بر تولید شیرابه در زمان بهره برداری و پس از بستن مرکز دفن پسماند شهری با استفاده از مدلHELP(۱۳۹۹)، نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۵(۴)، ۵۳-۶۴

DOI: 10.22112/jwwse.2020.225253.1200

قنبری ادیوی، ع، مهرابنیا، پ، کرمانژاد، ج.، (۱۳۹۹)، بررسی روشهای جذب نیترات از آبهای آلوده با استفاده از بیوچار. مجله آب و توسعه پایدار، ۷(۱)، ۷۹-۹۰

https://doi.org/10.22067/jwsd.v7i1.81367

مرندی، ر، شعبانپور، م، حسین زاده، م.، (۱۳۸۹)، حذف فلزات سنگین از پساب صنعتی با استفاده از زئولیت طبیعی، اولین همایش ملی مدیریت پساب و پسماند در صنایع نفت و انرژی، تهران، ایران.

https://civilica.com/doc/107058

نبیزاده، س، صادقزاده، ف، جلیلی، ب، عمادی، س.م.، (۱۳۹۷)، جذب متیلن بلو از محلولهای آبی توسط بیوچار کاه برنج، تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۹(۱)، ۷۱-۷۷

https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.212516.667511.

فرهادیان، م، سالکی، آ، و داوری، ن.،(۱۳۹۶)، بررسی عوامل مؤثر فرآیندی در تخریب علفکش بنتازون در آبهای آلوده توسط نانو اکسیدهای فلزی تیتانیوم و آهن بر پایه زئولیت طبیعی، نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۲(۳)، ۲۱-۳۲

DOI: 10.22112/jwwse.2018.92536.1037

American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation (WEF), (2023). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 24th ed. Washington, D.C.: American Public Health Association. https://doi.org/10.2105/SMWW.2882

Eidi-Zadeh, M., and Azari, A., (2017). Optimization of simultaneous adsorption parameters of chromium (III) and copper (II) from wastewater by chitosan using Taguchi experimental design. *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 36(3), 115–124. https://doi.org/10.22034/IJCE.2019.38794

Ghafghazi, L., and Taghavi, L., (2022). A review on the application of biochar (biocharcoal) as a biosorbent in environmental sustainability with emphasis on energy, water, and agriculture. *Journal of Environmental Sustainability*, 13(1), 67–82. https://doi.org/10.22034/jrnr.2022.1158602

Shabani, H., Delavar, M., and Taqavi-Fardood, S., (2020), Sorption of Cd (II) ions by chitosan-modified peanut shell biochar from aqueous solution. *Advances in Environmental Technology*, (4), 203–211.

https://doi.org/10.22104/AET.2020.4332.1220

Talei Bejarbaneh, F., Amrollahi Biuki, N., and Mortazavi, M.S., (2015), Removal of heavy metal (copper) using microalgae (Spirulina platensis) by Taguchi method. *Journal of Aquatic Ecology*, 5(2), 124–134.

https://jae.hormozgan.ac.ir/article-1-177-fa.html

Teymourian, S., Azimzadeh, H., Ghasemi, S., Mosleh Arani, A., and Sodaeizadeh, H., (2018), Adsorption of cationic dye from aqueous solutions using grapefruit peel activated carbon and Taguchi optimization method. *Journal of Civil Engineering*, 17(1), 55–66.

https://doi.org/10.22034/mcej.2016.5179

Wang, S., and Peng, Y., (2010). Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 11–24. Available at: https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.08.039

Masouleh, S.F., Mozaffarian, M., and Dabir, B., (2024) 'Sequential landfill leachate treatment by natural zeolite adsorption and UV/PMS/Fe^{2+} oxidation process', *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(5), 113457. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113457

Yang, Y., Wang, Y., Wang, X., and Liu, B., (2023), 'Enhanced treatment of landfill leachate using biochar and zeolite modified constructed wetlands: Performance and mechanism', *Ecological Engineering*, 190, 106950. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106990

Zanona, L.S., Santos, M.O., Belli, T.J., and Castilhos Junior, A.B., (2023) ‘Biochar derived from sewage sludge: A low-cost alternative for the treatment of mature landfill leachate’, *Journal of Environmental Management*, 344, 118387.

https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118387

پذیرفته شده / ویرایش نشده