

Systematic Review on the Application of Biomass-Derived Biochars for the Removal of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid from Agricultural Water Sources

Received: 18 September 2025, Accepted: 05 January 2026

Mozhdeh Keramatzadeh¹, Afshin Takdastan^{2*}, Majid Ehteshami³

¹ Department of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

² Environmental Technologies Research Center, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran

³ Department of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

*Corresponding Author:
afshin_ir@yahoo.com

How to Cite This Article:

Keramatzadeh M, Takdastan A, Ehteshami M. Systematic Review on the Application of Biomass-Derived Biochars for the Removal of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid from Agricultural Water Sources. Journal of Environmental Health Engineering. 2025;13(4):412-36.

DOI:

ABSTRACT

Background: Water contamination with the herbicide 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) poses a serious environmental challenge, as its residues not only degrade drinking water quality but also threaten aquatic ecosystems and the food chain. The aim of this systematic review was to summarize and critically evaluate existing research on the performance of various biochars in removing this persistent compound from aqueous environments.

Materials and Methods: A systematic literature review was conducted following the PRISMA guidelines by searching major scientific databases including Web of Science, Scopus, ScienceDirect, and Google Scholar. The search covered studies published between 2008 and 2025 that investigated the adsorption of 2,4-D onto biochars. Articles were analyzed based on feedstock type, pyrolysis conditions, chemical or physical activation methods, and operational parameters affecting adsorption efficiency.

Results: Reported adsorption capacities of biochars varied widely (from below 10 mg g⁻¹ to over 300 mg g⁻¹), mainly depending on the feedstock source, pyrolysis temperature, and surface modification technique. The Langmuir isotherm and pseudo-second-order kinetic models were most frequently identified as the best-fitting, indicating chemisorption and monolayer adsorption behavior. Acidic conditions (pH = 2–3) consistently yielded the highest removal efficiency. Nonetheless, several challenges remain, including limited data on regeneration performance, real-water applications, and the influence of coexisting ions and organic compounds.

Conclusion: This review highlights the potential of biochars derived from agricultural residues as cost-effective and sustainable adsorbents for 2,4-D removal. Improving surface chemistry and structural properties through optimized activation methods could enhance adsorption efficiency and facilitate large-scale and environmentally sound applications in water and wastewater treatment.

Keywords: 2,4-D herbicide; biochar; adsorption; biomass; water and wastewater

مرور نظام‌مند بر کاربرد بایوچارهای مشتق‌شده از زیست‌توده در حذف علف‌کش ۲-۴-دی کلروفنوکسی استیک اسید از منابع آبی کشاورزی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

مژده کرامت زاده^۱، افشین تکدستان^{۲*}، مجید احتشامی^۳

^۱ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

^۲ مرکز تحقیقات فناوری‌های زیست‌محیطی، دانشگاه علوم پزشکی جندی‌شاپور اهواز، اهواز، ایران

^۳ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

زمینه و هدف: آلودگی منابع آب با علف‌کش ۲-۴-دی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی به شمار می‌رود، زیرا بقایای آن علاوه بر تأثیر بر کیفیت آب آشامیدنی، سلامت اکوسیستم‌های آبی و زنجیره غذایی را تهدید می‌کند. هدف این مطالعه، مرور نظام‌مند پژوهش‌های انجام‌شده درباره کارایی انواع بایوچار در حذف این ترکیب مقاوم از محیط‌های آبی است.

مواد و روش‌ها: این مطالعه با جستجو و تحلیل نظام‌مند منابع علمی منتشرشده در زمینه استفاده از بایوچار برای جذب سطحی ۲-۴-دی در پایگاه‌های ScienceDirect, Scopus, Web of Science و Google Scholar بر اساس دستورالعمل PRISMA انجام شد. بازه زمانی جستجو سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۵ بود و مقالات بر اساس نوع پیش‌ماده، شرایط پیرولیز، روش اصلاح و فعال‌سازی و پارامترهای مؤثر بر فرآیند جذب ارزیابی شدند.

یافته‌ها: مرور مطالعات نشان داد ظرفیت جذب بایوچارها دامنه وسیعی دارد و تحت تأثیر نوع زیست‌توده، شرایط پیرولیز و روش‌های اصلاح قرار گرفته است. بیشتر پژوهش‌ها بهترین برازش ایزوترمی و سینتیکی را با مدل‌های لانگمویر و شبه‌مرتبه دوم گزارش کرده‌اند. همچنین شرایط اسیدی ($\text{pH} = 2-3$) بالاترین راندمان حذف را ایجاد کرده است. با این حال، چالش‌هایی مانند بازیابی جاذب، ارزیابی عملکرد در شرایط واقعی و تأثیر ترکیبات هم‌زمان باقی است.

نتیجه‌گیری: این مطالعه مروری بر لزوم توسعه بایوچارهای حاصل از ضایعات کشاورزی و بهبود ویژگی‌های سطحی آن‌ها تأکید دارد تا زمینه کاربرد صنعتی و پایدار این جاذب‌ها در حذف علف‌کش‌ها، به‌ویژه ۲-۴-دی، از منابع آب و پساب فراهم شود.

واژه‌های کلیدی: علف‌کش ۲-۴-دی، بایوچار، جذب سطحی، زیست‌توده، آب و پساب

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول:

afshin_ir@yahoo.com

نحوه استناد به این مقاله:

Keramatzadeh M, Takdastan A, Ehteshami M. Systematic Review on the Application of Biomass-Derived of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid from Agricultural Water Sources. Journal of Environmental Health Engineering. 2025;13(4):412-36.

DOI:

مقدمه

(EPA) و سازمان بهداشت جهانی (WHO) این ترکیب را در فهرست آلاینده‌های خطرناک قرار داده‌اند و پایش و حذف آن را از اولویت‌های مهم زیست‌محیطی معرفی کرده‌اند^{۲۶-۲۸}.

روش‌های متنوعی برای حذف ۲ و ۴-دی از آب پیشنهاد شده‌اند که شامل فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (مانند UV/PS، فنتون و فتوکاتالیست‌ها)، تصفیه بیولوژیکی، فرآیندهای غشایی و جذب سطحی می‌باشند. اگرچه برخی از این روش‌ها راندمان بالایی در شرایط آزمایشگاهی نشان داده‌اند، اما محدودیت‌هایی همچون هزینه‌های بالا، تولید محصولات جانبی سمی، پیچیدگی فرآیند و دشواری در مقیاس‌پذیری صنعتی موجب شده است که استفاده عملی آن‌ها با چالش‌های جدی همراه باشد^{۲۹، ۳۰}. در این میان، جذب سطحی به دلیل سادگی، هزینه کمتر و قابلیت کاربرد در مقیاس‌های مختلف، به‌عنوان یکی از مؤثرترین و پرکاربردترین راهکارها برای حذف آلاینده‌های آلی و به‌ویژه علف‌کش‌ها مطرح شده است^{۳۱-۳۳}.

در میان جاذب‌های گوناگون، بایوچار به‌عنوان یک ماده‌ی کربنی سبز و پایدار، توجه زیادی را به خود جلب کرده است^{۳۱، ۳۳}. بایوچار از پیرولیز پسماندهای زیستی و کشاورزی به‌دست می‌آید و دارای ویژگی‌هایی مانند سطح ویژه نسبتاً بالا، تخلخل مناسب، وجود گروه‌های عاملی فعال و پایداری شیمیایی است^{۳۴}. همچنین امکان اصلاح بایوچار با روش‌های شیمیایی (اسیدی، قلیایی، بارگذاری فلزات) و فیزیکی (فعال‌سازی حرارتی، نانوساختاری) موجب افزایش چشمگیر ظرفیت جذب و انتخاب‌پذیری آن برای ترکیبات آلی مقاوم شده است^{۳۵-۳۷}. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که بایوچار می‌تواند به‌عنوان جایگزینی مقرون‌به‌صرفه و دوستدار محیط‌زیست در حذف انواع آفت‌کش‌ها از جمله علف‌کش ۲ و ۴-دی از محیط‌های آبی مطرح شود^{۳۸-۴۰}. با وجود افزایش تعداد پژوهش‌ها در زمینه حذف علف‌کش ۲ و ۴-دی، چالش‌ها و شکاف‌های علمی مهمی همچنان

رشد فزاینده‌ی جمعیت، نیاز روزافزون به تولید محصولات کشاورزی و استفاده گسترده از سموم دفع آفات، به‌ویژه علف‌کش‌ها، موجب ورود حجم قابل‌توجهی از آلاینده‌های آلی به محیط‌های آبی شده است. علف‌کش ۲، ۴-دی (2,4-dichlorophenoxyacetic acid) به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین علف‌کش‌های کلردار در جهان، بیش از هفت دهه است که در کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد^۱. بر اساس گزارش‌ها، علف‌کش ۲ و ۴-دی بعد از گلیفوسیت و آترازین، سومین علف‌کش پرمصرف در ایالات متحده است و در آمریکای شمالی نیز در همین جایگاه قرار دارد^{۲، ۳}. همچنین برخی منابع آن را در سطح جهانی به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین علف‌کش‌ها معرفی کرده‌اند^{۳، ۴}. در ایران نیز، به‌ویژه در استان‌های کشاورزی محور نظیر خوزستان، مصرف وسیع این علف‌کش در مزارع گندم، نیشکر و سایر محصولات زراعی، باعث ورود مقادیر قابل‌توجهی از آن به زهکش‌ها و منابع آبی سطحی شده است.^{۵-۸} این موضوع تهدیدی جدی نه‌تنها برای کیفیت منابع آب آشامیدنی، بلکه برای سلامت اکوسیستم‌های آبی و پایداری محیط زیست محسوب می‌شود؛ چراکه بقایای این ترکیبات می‌توانند در محیط باقی بمانند و حتی وارد زنجیره غذایی شوند. از این رو، بررسی و توسعه فناوری‌های کارآمد برای حذف آن‌ها از آب اهمیت ویژه‌ای دارد^{۹-۱۲}.

علف‌کش ۲ و ۴-دی به دلیل ویژگی‌هایی همچون انحلال‌پذیری بالا در آب، پایداری شیمیایی و تحرک زیاد در خاک، به‌سرعت وارد محیط‌های آبی می‌شود^{۱۳-۱۶}. حضور این ترکیب حتی در غلظت‌های پایین می‌تواند آثار زیان‌باری بر سلامت انسان (از جمله اختلالات غدد درون‌ریز، مشکلات کبدی و کلیوی و اثرات سرطان‌زایی احتمالی) بگذارد^{۱۷-۲۱}. همچنین بر محیط زیست و اکوسیستم‌های آبی (کاهش تنوع زیستی و سمیت برای موجودات آبی) نیز، اثرات مخربی بر جای می‌گذارد^{۲۲}. بر همین اساس، سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا

و تفسیر نتایج مدل‌های ایزوترمی و سینتیکی پرداخته باشد، منتشر نشده است.

از این رو، مرور حاضر می‌کوشد ضمن پر کردن این خلأ علمی، مبنایی کاربردی برای توسعه جاذب‌های پایدار و کم هزینه بر پایه ضایعات کشاورزی فراهم آورد.

بر این اساس، هدف این مرور نظام‌مند، جمع‌آوری، سازمان‌دهی و تحلیل نقادانه‌ی پژوهش‌های انجام شده درباره حذف علفکش ۴۲-دی با استفاده از بایوچارهای مشتق شده از زیست توده است. این مقاله با تمرکز بر مقایسه روش‌های اصلاح بایوچار، بررسی اثر پارامترهای عملیاتی بر راندمان جذب، تشریح مکانیسم‌های غالب، و تبیین مدل‌های سینتیکی و ایزوترمی، تلاش می‌کند خلأهای موجود در ادبیات را پر کرده و چشم‌انداز پژوهش‌های آینده را ترسیم کند. نوآوری این مطالعه در اتخاذ رویکردی نظام‌مند بر اساس دستورالعمل PRISMA و تحلیل انتقادی مطالعات منتخب است، تا بتواند مبنایی علمی برای توسعه فناوری‌های جذب پایدار و قابل کاربرد در شرایط واقعی فراهم سازد.

معرفی علفکش ۴۲-دی کلروفنوکسی استیک اسید (۴۲-دی)

انواع ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی ۴۲-دی:

2,4-dichlorophenoxyacetic acid علفکش (2,4-D) از خانواده‌ی فنوکسی‌اسیدها بوده و یکی از قدیمی‌ترین و پرمصرف‌ترین علفکش‌های سیستمیک در جهان محسوب می‌شود. این ترکیب به صورت اسید آزاد، نمک‌های آمینی و استرهای مختلف فرموله شده و هر یک بسته به نوع گروه جانشین، رفتار زیست‌محیطی متفاوتی دارند (۴۱، ۴۲). فرم اسیدی این علفکش (7-75-94 CAS) به دلیل پایداری شیمیایی و هزینه‌ی پایین تولید، بیشترین کاربرد را دارد.

از نظر ساختار شیمیایی، ۴۲-دی یک حلقه‌ی آروماتیک پایدار با دو اتم کلر در موقعیت‌های ارتو (۲ و ۴) و یک

وجود دارد. نخست آنکه بیشتر مطالعات به بررسی شرایط خاص آزمایشگاهی محدود بوده و کمتر به مقایسه نظام‌مند کارایی جاذب‌های مختلف، به‌ویژه انواع بایوچارهای اصلاح شده، پرداخته‌اند. دوم آنکه مکانیسم‌های دقیق جذب ۴۲-دی بر روی بایوچارها (مانند برهم‌کنش‌های $\pi-\pi$ ، پیوند هیدروژنی، نیروهای الکترواستاتیک و تبادل یونی) در بسیاری از مطالعات به‌طور جامع تحلیل نشده و نتایج موجود، در برخی مواقع متناقض هستند. سوم آنکه تأثیر عوامل محیطی (نظیر pH، حضور یون‌های مزاحم، دما و ترکیبات آلی دیگر) بر راندمان جذب بیشتر در شرایط آزمایشگاهی مدنظر بوده و کمتر در شرایط واقعی بررسی شده است. همچنین موضوعات مهمی مانند پایداری عملکرد بایوچار، قابلیت باززایی، هزینه‌های اقتصادی و امکان مقیاس‌پذیری صنعتی هنوز به‌طور کامل مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند.

با وجود افزایش مطالعات در زمینه حذف علفکش ۴۲-دی از محیط‌های آبی، بررسی‌ها نشان می‌دهد که هنوز یک مرور جامع و نظام‌مند که عملکرد انواع بایوچارهای خام و اصلاح شده را از منظر نوع منبع زیست توده، روش فعال‌سازی، پارامترهای عملیاتی و مکانیسم‌های جذب تحلیل کند، ارائه نشده است. در بیشتر پژوهش‌های پیشین، نتایج بر اساس شرایط آزمایشگاهی گزارش شده و مقایسه‌ای منسجم میان کارایی جاذب‌ها در شرایط مشابه صورت نگرفته است. علاوه بر این، تحلیل‌های ترمودینامیکی، مدل‌های ایزوترمی و سینتیکی، و قابلیت باززایی جاذب‌ها در بسیاری از مطالعات به‌صورت محدود بررسی شده‌اند.

با توجه به گسترش روزافزون مصرف علفکش‌ها و اهمیت کنترل آلودگی‌های ناشی از آن‌ها در منابع آب، انجام مرور نظام‌مند حاضر از ضرورت ویژه‌ای برخوردار است. اگرچه پژوهش‌های متعددی درباره استفاده از بایوچار در حذف علفکش ۴۲-دی انجام شده است، اما تاکنون مطالعه‌ای جامع که به‌صورت نظام‌مند به مقایسه روش‌های اصلاح بایوچار، تحلیل مکانیسم‌های جذب، ارزیابی شرایط عملیاتی

این ویژگی‌ها سبب شده‌اند که ۴۲-دی به راحتی در محیط‌های آبی حل شده و از لایه‌های سطحی خاک عبور کند، در حالی که تجزیه‌ی آن ممکن است بسته به شرایط محیطی، از چند روز تا چندین هفته طول بکشد. به همین دلیل است که در بسیاری از گزارش‌ها، این ترکیب به‌عنوان یک آلاینده‌ی آلی خطرناک و با ریسک انتقال بالا به منابع آبی معرفی شده است. خصوصیات فیزیکوشیمیایی کلیدی ۴۲-دی در جدول ۱ خلاصه شده‌اند. داده‌ها از منابع مرجع شامل PPDB، ATSDR و FAO گردآوری شده‌اند.^{۲۶}

- گروه کربوکسیلیک اسیدی متصل به زنجیره‌ی اتری است^{۴۲}. این ساختار موجب ایجاد ویژگی‌های زیر می‌شود:
- پایداری نسبی در برابر فرآیندهای طبیعی نظیر هیدرولیز و فتولیز.
- یونیزاسیون بالا در pH خنثی ($pK_a \approx 3.4$) که منجر به افزایش حلالیت در آب می‌شود.
- تحرک بالا در محیط خاک به دلیل ضریب جذب پایین به کربن آلی ($K_{oc} < 100$).
- تمایل متوسط به چربی ($\text{LogKow} \approx 2.8$) در فرم خنثی، خطر انباشت زیستی را محدود اما امکان نفوذ به غشاهای سلولی را فراهم می‌کند.

جدول ۱. انواع ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی علفکش ۴۲-دی^{۲۶، ۴۷-۴۴}

| ویژگی | مقدار / بازه | توضیحات |
|---------------------------------|---|--|
| شکل ملکول |  | حلقه ای فنولی که در موقعیت ۲ و ۴ دو اتم کلر (Cl) نشسته اند |
| فرمول شیمیایی | $C_8H_6Cl_2O_3$ | - |
| شماره CAS | 94-75-7 | فرم اسیدی |
| جرم ملکولی | 221.04 g/mol | - |
| نقطه ذوب | 137-141 °C | $\approx 138^\circ C$ |
| نقطه جوش / تجزیه | در $273^\circ C$ تجزیه می شود | در فشار کاهش یافته: $160^\circ C$ |
| pK_a (25 °C) | 3.40 | یونیزاسیون بالا در pH خنثی |
| فشار بخار (20 °C) | 1.4×10^{-7} mmHg | بسیار کم فرار |
| حلالیت در آب (20-25 °C) | 540-677 mg/L (محیط اسیدی) | به شدت وابسته به pH |
| حلالیت در آب ($pH \approx 7$) | ≈ 900 g/L | ناشی از یونیزاسیون |
| LogKow | 2.81 (گونه خنثی) | تمایل متوسط به چربی |
| LogD (pH ≈ 7) | -0.82 | کاهش چربی دوستی به دلیل یونیزاسیون |

- سرنوشت علفکش ۴و۲-دی در محیط زیست
سرنوشت علفکش ۴و۲-دی در محیط زیست تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن و شرایط اکولوژیکی محیط قرار دارد. این ترکیب عمدتاً از طریق تجزیه زیستی، فوتولیز و در موارد محدودتر از طریق فرآیندهای شیمیایی حذف می‌شود. مسیر غالب حذف در خاک و آب، تجزیه‌ی میکروبی است که معمولاً منجر به تولید ۴و۲-دی کلروفلوکل به‌عنوان متابولیت واسطه می‌گردد. علاوه بر آن، فتواکسیداسیون در اتمسفر می‌تواند موجب تجزیه سریع این ترکیب با نیمه‌عمری کمتر از یک روز شود (۴۸،۴۵-۵۲).
نیمه‌عمر ۴و۲-دی در محیط بسیار متغیر است:
 - در خاک، از ۴ تا ۷ روز در شرایط معمول تا بیش از ۶ هفته در خاک‌های اسیدی گزارش شده است.
 - در آب‌های سطحی، نیمه‌عمر تحت شرایط هوایی بین ۱ تا چند هفته متغیر بوده، در حالی که در شرایط بی‌هوایی می‌تواند به بیش از ۱۲۰ روز برسد.
 - در اتمسفر، به دلیل فتواکسیداسیون، نیمه‌عمر معمولاً کوتاه و کمتر از یک روز است.
- این ویژگی‌ها نشان می‌دهند که ۴و۲-دی در شرایط مساعد (مانند محیط‌های اسیدی یا بی‌هوایی) پایداری بیشتری داشته و در نتیجه احتمال آلودگی پایدار منابع آبی و رسوبات افزایش می‌یابد (جدول ۲).

جدول ۲. سرنوشت علفکش ۴و۲-دی در محیط ۵۵-۵۳،۴۵

| ویژگی | مقدار/ بازه معتبر | توضیحات |
|------------------------------------|----------------------------------|--|
| نیمه عمر در خاک آزمایشگاهی (هوایی) | حدود ۶.۲ روز | نوع خاک معدنی هوایی در فرم اسید/نمک ۴و۲-دی |
| نیمه عمر در خاک میدانی | بین ۱ تا ۱۴ روز | برای فرم نمک ۴و۲-دی |
| نیمه عمر در آب هوایی | حدود ۱۵ روز | تجزیه به صورت میکروبی در آب شیرین |
| نیمه عمر در هیدرولیز | حدود ۳۹ روز | pH برابر ۷ و دمای ۲۵ درجه سانتیگراد آب |
| نیمه عمر در فوتولیز سطحی | حدود ۱۳ روز | تجزیه نوری در آب سطحی |
| نیمه عمر در آب و رسوب بی هوایی | ۴۱ تا ۳۳۳ روز | پایداری بالاتر در شرایط کم اکسیژن تر |
| ضریب جذب در خاک-کربن آلی (Koc) | ۵۹-۱۱۷ mg/lit | تحرك متوسطی، بسته به نوع خاک دارد |
| تحرك در خاک | متوسط تا زیاد | پتانسیل لیچینگ بالا بخصوص در خاک های شنی |
| ضریب انباشت زیستی (BCF) | بسیار پایین (تقریباً ۱ lit/kg) | برای فرم های اسید/نمک ۴و۲-دی (برای فرم استر تا ۱۰ lit/kg هم می رسد.) |

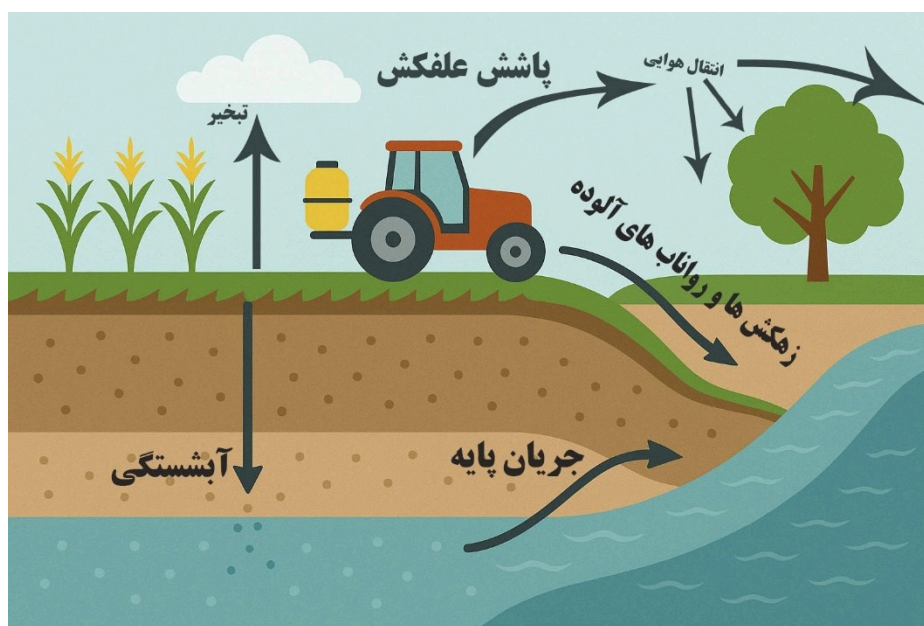
۲- انتقال از طریق زهکش‌ها و رواناب‌های سطحی آلوده، که موجب ورود ترکیب به آب‌های سطحی مانند کانال‌ها و رودخانه‌ها می‌گردد؛

۳- انتشار در جو از طریق تبخیر و انتقال هوایی، به‌ویژه در شرایط دمایی بالا و وزش باد.

سهم هر یک از این مسیرها تحت تأثیر عواملی مانند نوع و بافت خاک، میزان رطوبت، پوشش گیاهی و اقلیم منطقه قرار دارد و این عوامل تعیین‌کننده میزان و سرعت جابجایی ۴و۲-دی در محیط خواهند بود. (شکل ۱).^{۵۸،۳}

علاوه بر پایداری نسبی، ترکیب ۴و۲-دی به دلیل انحلال‌پذیری بالا در آب (تقریباً ۹۰۰ mg/L در دمای ۲۵°C)^{۵۷،۵۶} و ضریب جذب پایین به کربن آلی خاک (Koc معمولاً کمتر از ۱۰۰ در بیشتر خاک‌های سبک) دارای تحرک بالایی در محیط است.^{۴۵} این خصوصیات موجب می‌شود که این علفکش به‌سرعت از لایه‌های سطحی خاک عبور کرده و وارد آب‌های زیرزمینی یا زه‌آب‌های کشاورزی شود. به طور کلی، سه مسیر اصلی انتقال ۴و۲-دی در محیط زیست عبارتند از:

۱- نفوذ عمقی در اثر آبشستگی، که به‌دنبال بارش یا آبیاری رخ داده و به حرکت عمودی آلاینده در پروفیل خاک منجر می‌شود؛



شکل ۱. مسیر حرکت علفکش در محیط^{۵۹-۶۱}

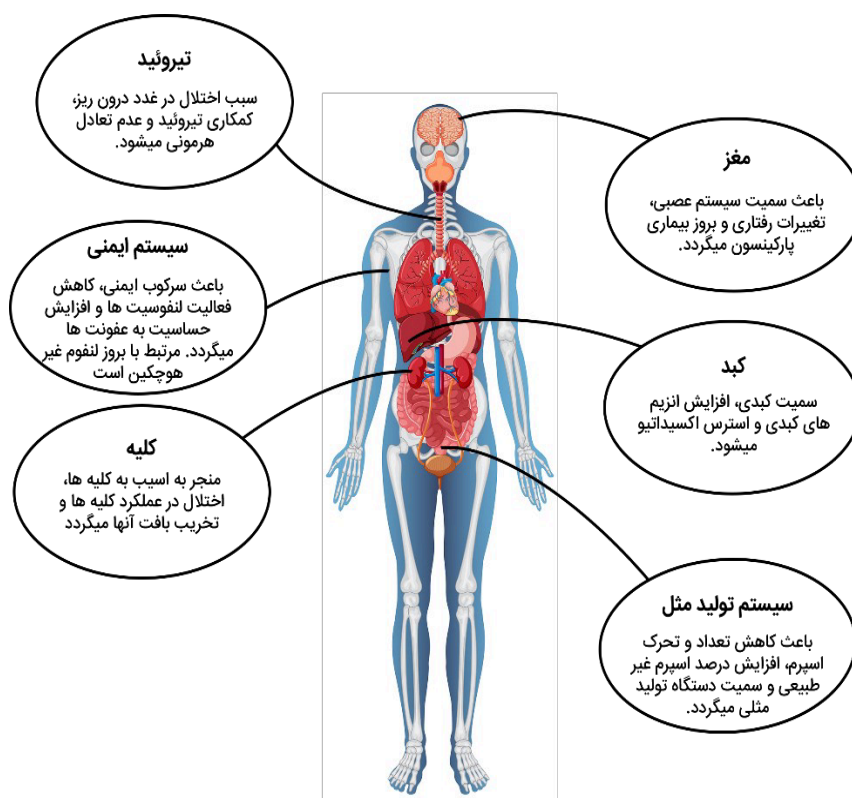
پایش مستمر و ارزیابی ریسک اکولوژیک و انسانی را برجسته می‌سازد.^{۶۱-۵۹}

اثرات بهداشتی علفکش ۴و۲-دی بر سلامت انسان
 قرارگیری در معرض علفکش ۴و۲-دی می‌تواند پیامدهای متعددی بر سلامت انسان داشته باشد. مسیرهای اصلی ورود این ترکیب به بدن شامل تماس پوستی، بلع و در موارد کمتر

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که حضور پایدار ۴و۲-دی در محیط زیست، علاوه بر آلودگی منابع آب شیرین، می‌تواند سبب انتقال آن در زنجیره غذایی شود. تجمع در بافت‌های ماهی و آبزیان گزارش شده و به‌ویژه در مناطق کشاورزی محور نظیر مزارع نیشکر، خطر انتقال این ترکیب به تالاب‌ها و منابع شیلاتی افزایش می‌یابد. این امر ضرورت

غیرهوچکین و سارکوم بافت نرم مطرح کرده اند، هرچند برخی نتایج موجود متناقض و غیرقطعی است.^۱ بر اساس گزارش آژانس بین المللی تحقیقات سرطان (IARC)، این علفکش در گروه 2B به معنای احتمالاً سرطانزا برای انسان طبقه بندی می شود. در شکل زیر، نمای شماتیک اندام های هدف انسانی تحت تأثیر علفکش ۴و۲-دی نشان داده شده است (شکل ۲) ۳، ۴۷، ۶۲، ۶۳.

استنشاق است، که در این میان تماس پوستی بیشترین سهم (حدود ۹۰٪) را دارد. مطالعات نشان داده اند که ۴و۲-دی می تواند موجب اختلالات عصبی از جمله ضعف عضلانی، تغییرات رفتاری و افزایش خطر بیماری پارکینسون، اختلال در غدد درون ریز (به ویژه تیروئید و هورمون های جنسی)، سمیت کبدی و کلیوی و کاهش باروری شود. همچنین برخی مطالعات اپیدمیولوژیک ارتباط آن را با بروز لنفوم



شکل ۲. نمای شماتیک اندام های هدف انسانی تحت تأثیر علفکش ۴و۲-دی ۳، ۴۷، ۶۲، ۶۳

محدودیت های خاص خود را دارند. به عنوان نمونه، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته قادر به تجزیه کامل آلاینده های آلی هستند، اما معمولاً هزینه بر بوده و با تولید محصولات جانبی سمی همراه اند^{۶۵}. روش های بیولوژیکی از نظر زیست محیطی پایدار و کم هزینه اند، ولی وابستگی زیادی به شرایط محیطی دارند و به دلیل سرعت پایین و

انواع روش های حذف علفکش ۴و۲-دی

برای حذف علفکش های مقاوم به ویژه ۴و۲-دی از محیط های آبی، روش های گوناگونی توسعه یافته اند که شامل فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs)، تصفیه های بیولوژیکی، فرآیندهای غشایی و جذب سطحی می باشند^{۶۴}. هر یک از این رویکردها مزایا و

این فرآیند شامل چند مرحله‌ی کلیدی است: انتقال جرم از فاز محلول به سطح جاذب، نفوذ در خلل و فرج، و اتصال نهایی به مکان‌های فعال سطح. سرعت و بازدهی هر یک از این مراحل به عواملی مانند اندازه ذرات جاذب، سطح ویژه، ویژگی‌های شیمی سطح، و شرایط عملیاتی (pH، دما، غلظت اولیه و غیره) بستگی دارد (۷۶-۷۴).

جاذب‌های مورد استفاده برای تصفیه آب تنوع زیادی دارند:

- معدنی (مانند خاک رس، زئولیت، سرباره‌های صنعتی) که ارزان و پایدارند ولی ظرفیت محدودی برای ترکیبات آلی دارند.

- زیستی و طبیعی (مانند کیتوسان، ضایعات کشاورزی) که در دسترس و سازگار با محیط زیست‌اند، اما پایداری و ظرفیت کمتری دارند.

- کربنی تجاری (مانند کربن فعال) که سطح ویژه بالایی داشته و کارایی بسیار خوبی در حذف آلاینده‌ها دارند، ولی هزینه بالای تولید و دشواری باززایی کاربرد وسیع آن‌ها را محدود کرده است.

در سال‌های اخیر، بایوچار به‌عنوان یک جاذب سبز و نوظهور مورد توجه ویژه قرار گرفته است. این ماده از پیرولیز زیست‌توده تولید می‌شود و با ترکیب ویژگی‌هایی همچون تخلخل بالا، گروه‌های عاملی متنوع و هزینه تولید پایین، چشم‌انداز امیدبخشی در حذف آلاینده‌های آلی مقاوم نظیر علف‌کش ۲-۴ دی ارائه می‌دهد (۳۱، ۷۷، ۷۸).

بایوچار

بایوچار یک ماده کربنی پایدار است که از تجزیه حرارتی زیست‌توده‌های آلی تحت شرایط محدود اکسیژن (پیرولیز) تولید می‌شود. منابع اولیه تولید بایوچار شامل طیف وسیعی از مواد خام مانند ضایعات کشاورزی (از جمله: پوسته برنج، هسته خرما، کاه گندم، نیشکر و غیره)، ضایعات جنگلی، لجن فاضلاب و حتی زباله‌های شهری است. این تنوع در منابع زیستی سبب می‌شود ویژگی‌های بایوچار به شدت وابسته به نوع ماده اولیه و شرایط پیرولیز (دما، زمان ماند، سرعت

ناکارآمدی در برابر ترکیبات پایدار، کاربرد محدودی دارند. ۶۶، ۶۷ فرآیندهای غشایی نیز می‌توانند جداسازی مؤثر و انتخاب‌پذیری بالایی ارائه دهند، اما مشکلاتی همچون گرفتگی غشا، نیاز به انرژی بالا و هزینه‌های عملیاتی زیاد، استفاده گسترده از آن‌ها را محدود می‌کند (۶۸، ۶۹).

در این میان، فرآیند جذب سطحی به دلیل سادگی طراحی و بهره‌برداری، هزینه کمتر، قابلیت باززایی جاذب‌ها و بازده بالای حذف، به‌عنوان یکی از کارآمدترین و پرکاربردترین گزینه‌ها برای حذف آلاینده‌های آلی و به‌ویژه علف‌کش‌ها شناخته می‌شود. این روش نه تنها در مقیاس آزمایشگاهی، بلکه در کاربردهای صنعتی و میدانی نیز عملکرد قابل قبولی از خود نشان داده است (۶۵، ۷۰).

شایان ذکر است که نتایج مطالعات متعددی نشان می‌دهد، اگرچه راندمان حذف در اکسیداسیون پیشرفته ممکن است اندکی بالاتر از سایر روش‌ها باشد، اما با توجه به هزینه پایین، دسترس‌پذیری، و بازده مطلوب بایوچار، این جاذب زیستی در مجموع گزینه‌ای کارآمدتر و مقرون‌به‌صرفه‌تر برای حذف علف‌کش ۲-۴ دی از محیط‌های آبی به شمار می‌رود (۷۱-۷۳).

بر همین اساس، در ادامه ابتدا فرآیند جذب سطحی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های تصفیه آب معرفی شده و سپس ویژگی‌ها و قابلیت‌های بایوچار به‌عنوان یک جاذب نوظهور مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فرآیند جذب سطحی

فرآیند جذب سطحی یکی از مهم‌ترین روش‌های تصفیه آب است که طی آن آلاینده‌ها بر سطح یک جاذب جامد تجمع می‌یابند. این پدیده می‌تواند به دو صورت رخ دهد:

- جذب فیزیکی که در آن نیروهای واندروالسی باعث نگهداشت مولکول‌ها می‌شوند و معمولاً برگشت‌پذیر است.
- جذب شیمیایی که طی آن پیوندهای قوی‌تر و اختصاصی میان سطح جاذب و آلاینده شکل می‌گیرد و ظرفیت حذف بالاتری ایجاد می‌کند.

بهبود کیفیت خاک، تثبیت کربن و افزایش حاصلخیزی نیز نقش آفرینی کند.

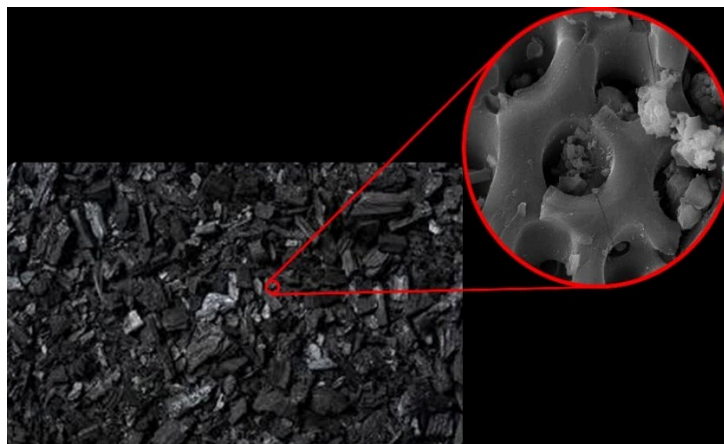
در مقایسه با جاذب‌های متداولی مانند کربن فعال، بایوچار اگرچه ممکن است سطح ویژه پایین تری داشته باشد، اما به دلیل قیمت پایین، دسترس پذیری بالا، و قابلیت اصلاح و فعال سازی، به عنوان جایگزینی مقرون به صرفه مطرح شده است. طی سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای نشان داده‌اند که اصلاح بایوچار از طریق روش‌های شیمیایی (اسیدی، قلیایی، بارگذاری فلزات و اکسیدهای فلزی) و فیزیکی (فعال سازی حرارتی یا تولید نانو ساختارها) می‌تواند ظرفیت جذب آن را به طور چشمگیری افزایش دهد ^{۷۵، ۸۴-۸۲}.

بنابراین، بایوچار به عنوان یک جاذب نوظهور و کارآمد، قابلیت بالایی برای حذف آلاینده‌های آلی مقاوم نظیر علفکش ۲ و ۴-دی دارد. در شکل ۳، نمای ماکروسکوپی و تصویر SEM از یک بایوچار حاصل از هسته خرما نشان داده شده است. در بخش بعدی، روش‌های مختلف اصلاح و بهبود عملکرد بایوچار و نیز مکانیسم‌های جذب آلاینده‌های آلی توسط این جاذب مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

گرمایش و محیط گازی) باشد. به طور معمول، افزایش دمای پیرولیز موجب کاهش محتوای اکسیژن و هیدروژن، افزایش درصد کربن و در نتیجه بهبود پایداری شیمیایی و سطح ویژه بایوچار می‌شود ^{۷۹}.

از نظر ساختاری، بایوچار دارای سطح ویژه قابل توجه، ساختار متخلخل و گروه‌های عاملی فعال بر روی سطح خود است. گروه‌های اکسیژنی نظیر $-OH$ ، $-COOH$ و $C=O$ نقش کلیدی در برهم‌کنش با آلاینده‌های آلی و معدنی ایفا می‌کنند. علاوه بر این، ترکیب عنصری بایوچار (کربن، هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن و خاکستر) و شاخص‌هایی همچون pH_{pzc} (pH نقطه بار صفر)، ویژگی‌های سطحی و رفتار جذب آن را تعیین می‌کنند ^{۸۰}.

از منظر زیست محیطی، بایوچار به عنوان یک جاذب سبز و پایدار مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از ضایعات کشاورزی و منابع تجدیدپذیر برای تولید بایوچار نه تنها هزینه تولید را کاهش می‌دهد، بلکه موجب کاهش مشکلات ناشی از مدیریت پسماند و انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز می‌شود. همچنین، پایداری بالای بایوچار در محیط باعث می‌شود که این ماده نه تنها در تصفیه آب و پساب، بلکه در



شکل ۳. نمای ماکروسکوپی و تصویر SEM بایوچار ^{۸۵، ۸۶}

برای آلاینده‌ها دارد، اما به تنهایی در حذف ترکیبات آلی مقاوم مانند علفکش‌ها همواره کارایی بالایی نشان

بایوچار خام، اگرچه به دلیل ساختار متخلخل و گروه‌های عاملی سطحی، ظرفیت جذب قابل توجهی

- اصلاح با عوامل اکسیدکننده: موادی مانند $KMnO_4$ ، H_2O_2 یا O_3 می‌توانند گروه‌های اکسیژنی فعال را به سطح بایوچار اضافه کنند و قابلیت جذب از طریق برهم‌کنش‌های شیمیایی را ارتقا دهند.
- بارگذاری فلزات و اکسیدهای فلزی: بارگذاری یون‌ها یا نانوذرات فلزی (مانند Zn ، Mn ، Fe) اکسیدهای آن‌ها) بر سطح بایوچار، علاوه بر بهبود ظرفیت جذب، می‌تواند خاصیت کاتالیستی ایجاد کند و بایوچار را به جاذب-کاتالیست برای فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (مانند فعال‌سازی پرسولفات یا پراکسید هیدروژن) تبدیل نماید.

اصلاح فیزیکی

اصلاح فیزیکی شامل روش‌هایی است که با استفاده از تغییرات حرارتی یا گازی، ساختار بایوچار را بهبود می‌بخشند.

- فعال‌سازی حرارتی: حرارت دادن بایوچار در دماهای بالاتر یا در حضور گازهایی مانند CO_2 و بخار آب موجب توسعه تخلخل و افزایش سطح ویژه می‌شود.
- پیش‌تیمار مکانیکی: آسیاب کردن یا استفاده از تکنیک‌هایی مانند $ball\ milling$ می‌تواند اندازه ذرات را کاهش داده، سطح ویژه را افزایش داده و گروه‌های فعال سطحی را نمایان کند.
- پلاسما یا امواج میکروویو: این روش‌ها باعث تغییرات سریع سطحی و ایجاد گروه‌های فعال جدید می‌شوند که به بهبود ظرفیت جذب کمک می‌کنند.

اصلاح فیزیکوشیمیایی (ترکیبی)

در برخی موارد، ترکیب روش‌های شیمیایی و فیزیکی به‌کار می‌رود تا همزمان چند ویژگی ارتقا یابد. برای

نمی‌دهد. به همین دلیل، پژوهشگران در سال‌های اخیر تمرکز ویژه‌ای بر اصلاح (**modification**) و فعال‌سازی (**activation**) بایوچار داشته‌اند تا ویژگی‌های سطحی و شیمیایی آن ارتقا یابد. اصلاح بایوچار معمولاً با هدف افزایش سطح ویژه، توسعه تخلخل، تغییر بار سطحی، افزودن گروه‌های عاملی فعال و افزایش برهم‌کنش‌های اختصاصی با آلاینده‌ها انجام می‌شود. به طور کلی، این اصلاحات در چهار دسته اصلی قابل طبقه‌بندی هستند: اصلاح شیمیایی، اصلاح فیزیکی، اصلاح فیزیکوشیمیایی و اصلاح بیولوژیکی

۸۹-۸۷، ۷۹

اصلاح شیمیایی

متداول‌ترین روش ارتقای بایوچار است. این رویکرد شامل استفاده از اسیدها، بازها، عوامل اکسیدکننده یا بارگذاری فلزات و اکسیدهای فلزی می‌شود.

- اصلاح اسیدی: استفاده از اسیدهایی مانند HCl ، H_2SO_4 یا HNO_3 موجب حذف خاکستر معدنی، افزایش تخلخل و معرفی گروه‌های عاملی اکسیژنی ($-COOH$)، ($-OH$) می‌شود. این اصلاح باعث بهبود برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک و پیوند هیدروژنی با ترکیبات قطبی می‌گردد.
- اصلاح قلیایی: استفاده از $NaOH$ یا KOH موجب توسعه شدید تخلخل و افزایش سطح ویژه (حتی تا چند صد متر مربع بر گرم) می‌شود. بایوچار اصلاح‌شده قلیایی ظرفیت جذب بالایی برای آلاینده‌های آلی آب‌گریز دارد، زیرا علاوه بر افزایش سطح، محیط قلیایی به بار منفی سطح و افزایش برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک منجر می‌شود.

مثال، بایوچار پس از تیمار قلیایی می‌تواند تحت فعال‌سازی حرارتی نیز قرار گیرد تا هم گروه‌های فعال شیمیایی و هم سطح ویژه افزایش یابند. همچنین ترکیب بارگذاری فلزات با اصلاح حرارتی، بایوچار با خاصیت دوگانه (جذب-کاتالیستی) ایجاد می‌کند.

جستجو ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۵ در نظر گرفته شد. کلیدواژه‌های اصلی مورد استفاده شامل ترکیب‌های زیر بودند:

“2,4-D” OR “2,4-dichlorophenoxyacetic acid”) AND (“biochar” OR “activated carbon” OR “carbonaceous adsorbent”) AND (“adsorption” OR “removal” OR “herbicide” OR “organic pollutant”)

همچنین از واژه‌های تکمیلی مانند “Activated carbon” و “Adsorbent” برای شناسایی مطالعات مقایسه‌ای استفاده شد.

جستجو به مقالات منتشرشده در مجلات معتبر ISI و به زبان انگلیسی محدود گردید.

معیارهای ورود و خروج مطالعات

مطالعاتی در این مرور وارد شدند که:

- به حذف یا جذب علف‌کش ۴۲-دی از محیط‌های آبی پرداخته بودند.
- از بایوچار خام یا اصلاح‌شده به‌عنوان جاذب استفاده کرده بودند.
- داده‌های تجربی کافی شامل ظرفیت جذب، مدل‌های ایزوترمی و سینتیکی یا مکانیسم‌های جذب ارائه کرده بودند.

مطالعاتی که صرفاً مدل‌سازی تئوریک انجام داده یا به آلاینده‌های دیگر پرداخته بودند، مرورها، مقالات کنفرانسی و پایان‌نامه‌ها از بررسی حذف شدند.

غربالگری و انتخاب مطالعات

فرآیند انتخاب و غربالگری مقالات مطابق با دستورالعمل PRISMA 2020 انجام گرفت و مراحل شناسایی، حذف موارد تکراری، غربالگری و ورود

اصلاح بیولوژیکی بایوچار شامل پوشش‌دهی سطح آن با میکروارگانیسیم‌ها یا آنزیم‌ها است. این روش کمتر متداول است، اما می‌تواند باعث افزایش انتخاب‌پذیری و زیست‌سازگاری بایوچار شود. برای مثال، اتصال باکتری‌های تجزیه‌کننده علف‌کش‌ها بر سطح بایوچار می‌تواند ترکیبی از فرآیند جذب و تجزیه زیستی ایجاد کند.

اصلاح بیولوژیکی

به طور کلی، اصلاح بایوچار رویکردی کلیدی برای ارتقای کارایی آن در حذف آلاینده‌های آلی مقاوم به‌ویژه ۴۲-دی است. با وجود پیشرفت‌های اخیر، همچنان نیاز به مطالعات جامع برای مقایسه نظام‌مند انواع روش‌های اصلاح، بررسی پایداری و باززایی بایوچار اصلاح‌شده، و امکان‌سنجی اقتصادی و مقیاس صنعتی آن وجود دارد (۶۷، ۷۴، ۸۷، ۹۰).

به طور کلی، اصلاح بایوچار رویکردی کلیدی برای ارتقای کارایی آن در حذف آلاینده‌های آلی مقاوم به‌ویژه ۴۲-دی است. با وجود پیشرفت‌های اخیر، همچنان نیاز به مطالعات جامع برای مقایسه نظام‌مند انواع روش‌های اصلاح، بررسی پایداری و باززایی بایوچار اصلاح‌شده، و امکان‌سنجی اقتصادی و مقیاس صنعتی آن وجود دارد (۶۷، ۷۴، ۸۷، ۹۰).

مواد و روش‌ها

این مطالعه به‌صورت یک مرور نظام‌مند (Systematic Review) بر اساس دستورالعمل PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) انجام شد تا پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه‌ی حذف علف‌کش ۴۲-دی با استفاده از بایوچار و سایر جاذب‌های کربنی گردآوری و تحلیل شوند.

راهبرد جستجو

جستجوی نظام‌مند در پایگاه‌های داده‌ی معتبر شامل ScienceDirect، Scopus، Web of Science و

نهایی مطالعات در جدول ۳ نشان داده شده است. در ۱۱۱ مقاله واجد شرایط برای تحلیل نهایی انتخاب مجموع از میان ۲۰۰ مقاله شناسایی شده، پس از حذف موارد تکراری و بررسی عنوان، چکیده و متن کامل، شدند.

جدول ۳. خلاصه مراحل غربالگری مطالعات بر اساس الگوی PRISMA

| ردیف | مرحله | توضیح | تعداد |
|------|---|---|-------|
| ۱ | شناسایی | مقالات شناسایی شده از پایگاه‌های داده Web of Science، Scopus، Science Direct و Google Scholar | ۲۰۰ |
| ۲ | حذف موارد تکراری | مقالات تکراری که بیش از یکبار در پایگاه‌های مختلف فهرست شده بودند | ۳۷ |
| ۳ | غربالگری | مقالات باقی‌مانده پس از حذف موارد تکراری | ۱۶۳ |
| ۴ | حذف در مرحله بررسی عنوان و چکیده | مطالعاتی که ارتباط مستقیم با حذف ۲ و ۴-دی یا بایوچار نداشتند | ۴۲ |
| ۵ | حذف در مرحله بررسی متن کامل | مطالعاتی که فاقد داده‌های کافی یا شرایط ورود بودند | ۱۰ |
| ۶ | مطالعات نهایی وارد شده به مرور نظام مند | مطالعات منتخب واجد شرایط برای تحلیل نهایی | ۱۱۱ |

تنها مطالعاتی با کیفیت روش‌شناختی مناسب در تحلیل نهایی لحاظ شدند.

یافته‌ها

بررسی مطالعات گردآوری شده در جدول ۴ نشان می‌دهد که کارایی بایوچار در حذف علف‌کش ۲ و ۴-دی به شدت تحت تأثیر نوع پیش‌ماده، شرایط پیرولیز و روش‌های اصلاح و فعال‌سازی قرار دارد. دامنه ظرفیت‌های جذب گزارش شده بسیار گسترده بوده و از کمتر از 10 mg/g تا بیش از 300 mg/g متغیر است، که این تنوع بیانگر اهمیت انتخاب صحیح ماده خام و فرآیند آماده‌سازی برای دستیابی به جذب‌های کارآمد می‌باشد. به‌عنوان مثال، بیوچارهای ساده‌ی حاصل از پیرولیز (مانند مطالعه Kearns et al., 2014)^{۹۱} ظرفیت‌هایی در حدود 11 mg/g نشان داده‌اند، در حالی که فعال‌سازی شیمیایی با موادی چون KOH یا ZnCl_2 منجر به توسعه چشمگیر تخلخل و افزایش سطح

استخراج و تجلیل داده‌ها

از هر مقاله‌ی منتخب، داده‌هایی شامل منبع زیست‌توده، روش و شرایط فعال‌سازی بایوچار، ویژگی‌های ساختاری (سطح ویژه، تخلخل، گروه‌های عاملی)، پارامترهای عملیاتی (pH، دما، دوز جذب، غلظت اولیه)، ظرفیت جذب (q_{max})، مدل‌های سینتیکی و ایزوترمی، مکانیسم‌های جذب و کارایی باززایی استخراج گردید. داده‌ها در قالب جداول مقایسه‌ای سازمان‌دهی و تحلیل شدند تا روندها، مکانیسم‌های غالب و شکاف‌های پژوهشی شناسایی شوند.

ارزیابی کیفیت مطالعات

برای اطمینان از دقت و اعتبار داده‌ها، کیفیت هر مطالعه بر اساس معیارهایی مانند شفافیت طراحی آزمایش، ارائه جزئیات پارامترهای جذب، وجود مقایسه یا کنترل، و تحلیل آماری داده‌ها ارزیابی شد.

ویژه شده و ظرفیت جذب را به بیش از 200 mg/g رسانده است ۸۳، ۹۲. و نسبت های متفاوت کربن/اکسیژن در بایوچارهای حاصل دانست که هر کدام نقش تعیین کننده ای در مکانیسم های جذب دارند. این اختلاف عملکرد را می توان ناشی از تفاوت در ساختار متخلخل، وجود گروه های عاملی فعال (به ویژه OH^- و COOH)،

جدول ۴. مطالعات انجام شده در زمینه حذف ۲ و ۴-دی با استفاده از جاذب طبیعی

| ردیف | نوع بایوچار | فعال سازی | سطح ویژه (m^2/g) | غلظت اولیه (mg/L) | دوز جاذب (g/L) | pH بهینه | ظرفیت جذب (q_{max} , mg/g) | مدل ایزوترم | مدل سینتیکی | منبع | رفرنس |
|------|-------------------------------|---|------------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------|--|-------------|---------------|---------------------------|-------|
| 1 | هسته خرما | NaOH | ۲۳۶/۴۲ | ۵۰-۱۰ | ۲/۰ | ۳ | ۶۲/۱۱ | لانگمویر | شبه مرتبه دوم | Keramatzadeh et al., 2025 | 86 |
| 2 | ذرت | HF | ۲۹۸/۰۱ | ۶۰ | ۲/۰ | ۲ | ۳۷/۴ | لانگمویر | شبه مرتبه دوم | Binh & Nguyen (2020) | 93 |
| 3 | برگ جینکو | ZnCl ₂ | ۵۳۶/۰ | ۲۰۰-۱۰ | ۱/۰ | ۳ | ۲۸۱/۸ | لانگمویر | شبه مرتبه دوم | Ma et al. (2024) | 83 |
| 4 | پوست بادام زمینی | H ₂ SO ₄ | - | ۲۰۰-۲۰ | ۱/۵ | ۳ | ۲۴۶/۷۲ | لانگمویر | General-order | Georgin et al. (2021) | 94 |
| 5 | ذرت | پیرولیز | ۶۰۰/۰ | ۱ | ۲/۰ | ۵ | ۱۱/۴ | فروندلیچ | - | Kearns et al. (2014) | 91 |
| 6 | لجن هضم بی هوازی | پیرولیز | ۴۱/۸۳ | ۵۰-۱۰ | ۳/۰ | ۶ | ۷/۸۹ | فروندلیچ | شبه مرتبه دوم | Wang & Hou (2024) | 74 |
| 7 | ضایعات قهوه | حرارتی | ۴۲۲/۴ | ۸۰-۱۰ | ۱/۰ | ۳ | ۲۷۶/۳ | لانگمویر | شبه مرتبه دوم | Ma et al. (2022) | 95 |
| 8 | ضایعات چای | بخاردهی | ۵۷۶/۱ | ۵۰۰-۱۰۰ | ۲/۵ | ۴ | ۵۸/۸۵ | فروندلیچ | شبه مرتبه دوم | Mandal et al. (2017) | 96 |
| 9 | پوسته برنج | حرارتی (800°C, N ₂) | ۳۲۰/۰ | ۱۰۰ | ۱/۰ | ۴ | ۲۷/۱۶ | توماس | شبه مرتبه دوم | Bahrami et al. (2018) | 97 |
| 10 | آکاسیا نیلو (Acacia nilotica) | H ₂ SO ₄ | ۱۱۹/۸ | - | ۲/۰ | ۳ | ۶۶/۶۶ | لانگمویر | شبه مرتبه دوم | Khan et al. (2021) | 98 |
| 11 | پوست بادام زمینی | H ₂ SO ₄ | - | ۵۰ | ۱/۰ | ۳ | ۲۴۴/۳۳ | HDL MIE | - | Knani et al. (2025) | 99 |
| 12 | میوه واتریا ایندیکا | HCL | ۲۵ | ۲۵ | ۰/۳ | ۲ | ۱۳۱/۳۹ | Hill | شبه مرتبه دوم | Vinayam et al. (2024) | 100 |
| 13 | ساقه موز | KOH و حرارتی تا 700°C تحت CO ₂ | - | ۳۰-۵۰ | ۱/۵ | ۳ | ۱۹۶/۳۳ | فروندلیچ | شبه مرتبه دوم | Salman et al., (2011) | 101 |
| 14 | هسته خرما | KOH و حرارتی تا 700°C تحت N ₂ | ۷۶۳/۴ | ۴۰۰ | - | ۲ | ۲۱۸/۳۳ | لانگمویر | شبه مرتبه اول | Hameed et al., (2009) | 92 |

مژده كرامت زاده وهمكاران

| | | | | | | | | | | | |
|-----|------------------------------|----------------------------|--------------------|---|--------------------|------|-------|-----------------|---|---------------------------------|----|
| 102 | Essandoh, M., et al., (2017) | شبه مرتبه دوم | فروندلیج | ۱۳۴ | ۲ | ۲ | ۴۰-۲۵ | ۱/۱ | پیرولیز سریع | گیاه Switchgrass | 15 |
| 103 | Sellaoui, L., et al., (2023) | شبه مرتبه اول | لانگمویر | ۱۰۰/۹ μg/g | ۷ | ۱ | ۰/۰۲۵ | ۳۰۴/۲ | پیرولیز در دمای ۷۰۰°C با نیتروژن | چوب کاج | 16 |
| 104 | Zhu et al., (2018) | - | لانگمویر | ۱۹/۸ | - | ۰/۶۷ | ۵۰-۵ | ۶۸۰ | پتاسیم کربنات (K ₂ CO ₃) | کاه ذرت | 17 |
| 105 | Evy et al., (2019) | شبه مرتبه دوم | فروندلیج | ۹۰/۹ | - | ۵۰ | ۱۵۰ | - | HCl | پوسته برنج | 18 |
| 106 | Tang et al., (2025) | شبه مرتبه دوم | لانگمویر | ۷۰-۶۷ | ۳-۴ | ۱ | ۵۰-۱۰ | -۱۱۵۳ ۱۲۰۹ | اسید فسفریک، سیس آمونیاک | خاکاره کاج | 19 |
| 107 | Wang et al., (2022) | شبه مرتبه دوم | لانگمویر | ۸۵/۱۳ | - | - | - | - | KOH | cetyltrimethyl ammonium bromide | 20 |
| 108 | Amiri et al., (2020) | Particle Diffusion Model | لانگمویر | ۱۳۵/۸ | ۲ | ۰/۰۵ | ۱۵۰ | ۵۵۶/۷۸ | فعال سازی با بخار آب (600°C) | ساقه کلزا | 21 |
| 78 | Samanth et al., (2025) | شبه مرتبه دوم | فروندلیج | ۳۰۲/۶۶ | ۲ | ۰/۲۵ | - | ۱۱۴۷/۷۱ | H ₃ PO ₄ | غلاف درخت Pterocarpus | 22 |
| 109 | Hernandes et al., (2022) | Linear Driving Force (LDF) | Koble - Corrigan | اصلاح فیزیکی: ۳۴۴ اصلاح با ZnCl ₂ : ۲۷ | حذف ناکام ۴ و ۲ دی | - | - | -۴۷/۳۱ ۹۸/۱۲ | اصلاح فیزیکی و ZnCl ₂ | پوست درخت Cedrela fissilis | 23 |
| 110 | Zhu et al., (2018) | شبه مرتبه دوم | لانگمویر | ۸/۵۴ | ۷ | ۰/۶۷ | ۵۰-۵ | ۵۲۳ | پیرولیز در دمای ۶۰۰ °C | ساقه ذرت | 24 |
| 110 | Zhu et al., (2018) | شبه مرتبه دوم | لانگمویر | ۱۹/۸۰ | ۷ | ۰/۶۷ | ۵۰-۵ | ۶۸۰ | فعال سازی با K ₂ CO ₃ | ساقه ذرت | 25 |
| 110 | Zhu et al., (2018) | شبه مرتبه دوم | لانگمویر | ۲۲/۸۴ | ۷ | ۰/۶۷ | ۵۰-۵ | ۶۹۱ | آمیندهار شده با گروه های نیتروژنی | ساقه ذرت | 26 |
| 110 | Zhu et al., (2018) | شبه مرتبه دوم | لانگمویر | ۱۲/۸۷ | ۷ | ۰/۶۷ | ۵۰-۵ | ۲۹۰ | اصلاح سطحی با HNO ₃ (اکسیداسیون) | ساقه ذرت | 27 |
| 111 | Brito et al., (2020) | شبه مرتبه دوم | Redlich - Peterson | ۱۵۳/۹ | ۶.۹ | ۰/۴ | ۲۵۰-۵ | ۵۴۷ | فعال سازی فیزیکی (بخار ۸۰۰°C) | باگاس نیشکر | 28 |
| 111 | Brito et al., (2020) | شبه مرتبه دوم | Redlich - Peterson | ۲۳۳/۰ | ۶.۹ | ۰/۴ | ۲۵۰-۵ | ۹۹۱ | فعال سازی فیزیکی (بخار ۸۰۰°C) | پوسته نارگیل | 29 |
| 111 | Brito et al., (2020) | شبه مرتبه دوم | Redlich - Peterson | ۲۳۵/۵ | ۶.۹ | ۰/۴ | ۲۵۰-۵ | ۱۰۶۸ | فعال سازی فیزیکی (بخار ۸۰۰°C) | اندوکارپ باباسو | 30 |

تمام مقادیر ظرفیت جذب (q_{max}) بر حسب mg/g گزارش شده است) به جز ردیف ۱۶ که بر حسب $\mu g/g$ است. (علامت "-" نشان دهنده عدم گزارش داده در منبع اصلی است. مدل ایزوترم در ردیف های ۲۸ تا ۳۰ مربوط به مطالعه Brito et al. (2020) بر اساس مدل Redlich-Peterson با بهترین برازش گزارش شده است (مدل لانگمویر نیز برازش مناسبی نشان داده است).

قابلیت استفاده مجدد را با کاهش کمتر از ۲۰٪ در راندمان حفظ می کنند، اما پس از آن کاهش قابل توجهی در ظرفیت جذب مشاهده می شود. این مسئله لزوم بهینه سازی فرآیند شستشو و بازفعال سازی جاذب را نشان می دهد.

بررسی پیش ماده های مورد استفاده برای تولید بایوچار نشان می دهد که طیف وسیعی از ضایعات زیستی مانند هسته خرما، پوسته برنج، ساقه موز، ضایعات قهوه و چای به کار گرفته شده اند. استفاده از این منابع علاوه بر کاهش هزینه تولید و وابستگی به مواد تجاری گران قیمت، راهکاری پایدار برای مدیریت پسماندهای کشاورزی و کاهش آلودگی محیط زیست فراهم می کند. این ویژگی دوگانه، بایوچار را به جاذبی نویدبخش در حوزه های مختلف زیست محیطی تبدیل کرده است. از منظر مکانیزم جذب، علاوه بر نیروهای فیزیکی (هیدروفوب و واندروالس)، برهم کنش های $\pi-\pi$ بین ساختارهای آروماتیک بایوچار و حلقه های بنزنی ۴۲-دی، و همچنین تشکیل پیوندهای هیدروژنی بین گروه های عاملی سطحی ($-OH$ و $-COOH$) و گروه های قطبی ۴۲-دی، نقش مهمی ایفا می کنند. این مکانیسم ها در کنار بار سطحی بایوچار و شرایط عملیاتی، تعیین کننده کارایی نهایی فرایند هستند.

از دیگر عوامل مهم در ارزیابی کارایی جاذب های زیست توده ای، نحوه آماده سازی و فعال سازی آنها است. در مطالعات بررسی شده، روش های متفاوتی مانند پیرولیز ساده، فعال سازی فیزیکی، و فعال سازی شیمیایی با مواد قلیایی یا اسیدی به کار رفته اند. فعال سازی شیمیایی با $NaOH$ ، به ویژه برای بقایای کشاورزی مانند هسته خرما، توانسته است ساختاری بسیار متخلخل و غنی از گروه های عاملی ایجاد کند که ظرفیت جذب ۴۲-دی را به طور چشمگیری افزایش می دهد. در حالی که روش هایی نظیر فعال سازی با $ZnCl_2$ نیز عملکرد جذبی مناسبی نشان داده اند، اما به دلیل هزینه بالاتر و مسائل زیست محیطی، استفاده از $NaOH$ ، از نظر اقتصادی و عملی ترجیح داده شده است. مجموع یافته ها

مشخصات محلول نیز عامل کلیدی در راندمان حذف است. اکثر مطالعات محدوده اسیدی ($pH = 2-3$) را به عنوان شرایط بهینه گزارش کرده اند، زیرا در این بازه، علفکش ۴۲-دی عمدتاً به شکل خنثی وجود دارد و جذب از طریق برهم کنش های هیدروفوب، پیوندهای هیدروژنی و نیروهای واندروالس تقویت می شود. در مقابل، با افزایش pH و یونیزه شدن مولکول، بار منفی سطح بایوچار باعث دفعه الکترواستاتیکی می گردد و راندمان حذف کاهش می یابد.

افزون بر pH ، پارامترهایی مانند غلظت اولیه آلاینده، دوز جاذب، و زمان تماس نیز نقش تعیین کننده ای دارند. نتایج اکثر مطالعات نشان داده اند که با افزایش غلظت اولیه، نیروی محرکه انتشار جرم بیشتر شده و ظرفیت جذب تا حد اشباع افزایش می یابد، اما درصد حذف به تدریج کاهش می یابد. در مقابل، افزایش دوز جاذب موجب افزایش تعداد سایت های فعال و بهبود راندمان حذف می شود. زمان تماس نیز معمولاً در محدوده ۶۰ تا ۱۲۰ دقیقه به حالت تعادل می رسد که با مدل شبه مرتبه دوم تطابق دارد.

از نظر مدل سازی ایزوترمی و سینتیکی، بیشترین برازش داده ها با مدل لانگمویر و مدل شبه مرتبه دوم گزارش شده است، که بیانگر غالب بودن جذب شیمیایی و تشکیل لایه یکنواخت از ۴۲-دی بر سطح جاذب می باشد. با این حال، در برخی مطالعات برازش بهتر با مدل های فروندلیچ یا توماس نیز گزارش شده است، که نشان دهنده ناهمگنی سطح جاذب و پیچیدگی انتقال جرم است.

علاوه بر این، یافته های ترمودینامیکی در مطالعات منتخب حاکی از آن است که فرآیند جذب ۴۲-دی بر روی بایوچارها اندوترمیک و خودبه خودی است، زیرا مقادیر ΔH° مثبت و ΔG° منفی گزارش شده اند. این نتایج نشان می دهد که افزایش دما، حرکت مولکولی و نفوذ ۴۲-دی را در منافذ میکرو و مزو تقویت می کند.

از دیدگاه پایداری، باززایی بایوچار یکی از چالش های اساسی است. نتایج مرور نشان می دهد که بایوچارهای اصلاح شده با $NaOH$ یا $ZnCl_2$ معمولاً تا سه چرخه

و شیمیایی جاذب، مانند ساختار میکرو و مزوپور، حضور گروه‌های عاملی سطحی، و تعاملات کمی با آلاینده وابسته است. تحلیل داده‌های جدول ۴ نشان می‌دهد که ظرفیت جذب گزارش شده در مطالعات مختلف از کمتر از 10 mg/g (در بیوجار خام) تا بیش از 300 mg/g (در نمونه‌های فعال‌شده با مواد قلیایی) متغیر است. این تنوع بیانگر نقش اساسی انتخاب صحیح ماده اولیه و روش سنتز در عملکرد فرایند جذب می‌باشد. ^{۸۳،۹۱،۹۴}

مکانیزم جذب

مکانیزم جذب $4\text{و}2$ -دی روی بیوجار شامل مجموعه‌ای از برهم‌کنش‌های فیزیکی و شیمیایی است. از جمله مهم‌ترین مسیرهای جذب می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- برهم‌کنش‌های $\pi-\pi$ بین حلقه‌های آروماتیک بیوجار و $4\text{و}2$ -دی، که در دماهای پیرولیز بالا تقویت می‌شوند؛
- جذب الکترواستاتیک در pH کمتر از pKa (حدود 3.4)، که باعث تقویت برهم‌کنش‌های جاذب-جاذب در حالت غیرباردار علف‌کش می‌شود؛
- پیوندهای هیدروژنی بین گروه‌های $\text{OH}-$ و $\text{COOH}-$ موجود در بیوجارهای فعال‌شده و گروه‌های قطبی $4\text{و}2$ -دی؛

- پیوندهای کمپلکسی میان کاتیون‌های فلزی باقی‌مانده در ساختار بیوجار و مولکول‌های آلاینده. ^{۱۰۳،۹۴،۷۸}

مدل‌های سینتیکی و ایزوترمی

بیشتر مطالعات گزارش کرده‌اند که مدل شبه‌مرتبه دوم (PSO) بهترین برازش را برای داده‌های سینتیکی نشان می‌دهد که دلالت بر غالب بودن جذب شیمیایی دارد. مدل شبه‌مرتبه اول در زمان‌های کوتاه‌تر و سطوح فعالیت کمتر ممکن است مناسب باشد اما در اغلب موارد، دقت مدل PSO بیشتر است. در محیط‌های ناهمگن، مدل Elovich نیز کاربرد داشته است.

از نظر مدل‌های ایزوترمی، مدل لانگمویر به دلیل فرض تک‌لایه بودن و سطح یکنواخت جاذب، بیشترین انطباق را

بیانگر این است که انتخاب روش سنتز باید بر مبنای توازن بین راندمان جذب، هزینه فرآیند و مسائل زیست‌محیطی صورت گیرد.

یافته‌های پژوهش‌های خاک نیز بر اهمیت این مکانیزم‌ها تأکید دارند. به‌عنوان مثال، Liu و همکاران (۲۰۱۸) ^{۸۲} نشان دادند که افزودن بیوجار به خاک می‌تواند سمیت $4\text{و}2$ -دی را برای گیاه برنج کاهش دهد. همچنین Ying و همکاران (۲۰۱۵) ^{۱۱۲} گزارش کردند که بیوجار بارگذاری‌شده با نانوذرات Fe^0 قادر است بیش از 80% از $4\text{و}2$ -دی را در خاک اسپایک‌شده طی ۷۲ ساعت حذف کند. این نتایج بیانگر آن است که عملکرد بیوجار در کنترل فراهمی زیستی علف‌کش‌ها صرفاً محدود به محیط‌های آبی نبوده و در ماتریس‌های خاکی نیز نقش مهمی دارد. بنابراین، مطالعات در آب و خاک مکمل یکدیگرند و مکانیزم‌های مشابهی را برجسته می‌سازند.

با وجود این پیشرفت‌ها، چالش‌های مهمی همچنان پابرجاست. اغلب مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده‌اند و داده‌های محدودی از کارایی بیوجار در شرایط واقعی منابع آبی وجود دارد. علاوه بر این، موضوعاتی نظیر بازایی بیوجار، تأثیر یون‌های مزاحم و ترکیبات آلی دیگر در محلول‌های پیچیده، و هزینه-فایده کاربرد در مقیاس صنعتی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. از این رو، پژوهش‌های آینده باید بر مقایسه نظام‌مند روش‌های اصلاح، ارزیابی در شرایط واقعی، و ترکیب جذب سطحی با فرآیندهای پیشرفته اکسیداسیون (AOPs) تمرکز داشته باشند تا چشم‌انداز کاربرد صنعتی و پایدار بیوجار در حذف علف‌کش‌ها محقق شود.

بحث

نتایج مرور نظام‌مند نشان داد که بیوجار حاصل از ضایعات زیست‌توده‌ای، به‌ویژه هسته خرما، در صورت استفاده از روش‌های اصلاح و فعال‌سازی شیمیایی مانند NaOH و KOH، ظرفیت جذبی بالایی برای حذف علف‌کش $4\text{و}2$ -دی دارد. ^{۹۲،۸۶،۸۵،۸۳} این کارایی بسیار به ویژگی‌های فیزیکی

با داده های تجربی داشته و پارامتر q_{max} را به خوبی پیش بینی کرده است. با این وجود، در بایوچارهایی با سطح ناهمگن یا چندلایه، مدل فروندلیچ بهتر سازگار بوده است. ۹۲-۹۴

پارامترهای عملیاتی

بر اساس تحلیل مطالعات منتخب، پارامترهای عملیاتی زیر تأثیر قابل توجهی بر راندمان حذف ۲ و ۴-دی توسط بایوچار داشته اند:

pH محلول: جذب غلف کش در محدوده ی اسیدی (کمتر از $pKa=3/4$) مطلوب تر است، زیرا ۲ و ۴-دی در حالت غیر یونیزه قرار می گیرد و برهم کنش مؤثرتری با سطح بایوچار دارد. اکثر مطالعات pH بهینه را بین ۲ تا ۳ گزارش کرده اند ۸۵، ۹۳.

دوز جذب: افزایش دوز جذب منجر به افزایش راندمان حذف می شود، اما معمولاً کاهش ظرفیت ویژه جذب (mg/g) را به دنبال دارد، زیرا نسبت تعداد سایت های فعال نسبت به غلظت آلاینده افزایش یافته و اشباع سطح سریع تر صورت می گیرد ۷۸، ۹۳، ۱۰۰.

غلظت اولیه آلاینده: افزایش غلظت اولیه سبب افزایش نیروی محرکه انتقال جرم و ظرفیت جذب می شود، ولی درصد حذف به دلیل محدودیت سایت های فعال کاهش می یابد ۹۲، ۱۰۶.

زمان تماس: اکثر مطالعات نشان داده اند که تعادل جذب در بازه زمانی ۳۰ تا ۱۲۰ دقیقه حاصل می شود.

دمای محلول: فرآیند جذب در اغلب موارد گرماگیر گزارش شده است؛ بنابراین افزایش دما موجب افزایش راندمان جذب در بیشتر بایوچارها می شود.

ترمودینامیک جذب

تحلیل پارامترهای ترمودینامیکی فرآیند جذب، درک عمیق تری از ماهیت و خودبه خودی بودن فرآیند ارائه می دهد. در اکثر مطالعات مرور شده، ثابت شده که جذب ۲ و ۴-دی توسط بایوچار دارای ویژگی های زیر است:

ΔG° منفی: مقدار منفی انرژی آزاد گیبس بیانگر خودبه خودی بودن فرآیند جذب در شرایط عملیاتی است. هرچه مقدار ΔG° منفی تر باشد، فرآیند از نظر ترمودینامیکی مطلوب تر است.

ΔH° مثبت: مقدار مثبت آنتالپی نشان دهنده گرماگیر بودن فرآیند جذب است؛ به این معنا که افزایش دما موجب بهبود راندمان جذب می شود. این ویژگی معمولاً با مکانیزم های جذب شیمیایی همراه است.

ΔS° مثبت: افزایش آنتروپی بیانگر افزایش بی نظمی در سیستم -جذب و آلاینده- در طول جذب است. این پارامتر نشان می دهد که جذب با آزاد شدن مولکول های آب و تغییر ساختار سطحی جاذب همراه است.

این ویژگی ها در مجموع مؤید آن هستند که فرآیند جذب به طور غالب ماهیت شیمیایی دارد و به شدت به پارامترهایی مانند دما و ویژگی سطح جاذب وابسته است. علاوه بر این، وابستگی به دما نشان می دهد که در کاربردهای عملی، کنترل شرایط حرارتی می تواند نقشی حیاتی در بهینه سازی عملکرد جذب داشته باشد. ۷۸، ۹۳، ۱۰۰، ۱۰۳.

باززایی و پایداری جاذب

قابلیت باززایی، از جمله مهم ترین معیارها برای ارزیابی امکان پذیری صنعتی جاذب هاست. نتایج مطالعات مرور شده نشان می دهند که بایوچارهای فعال شده با NaOH یا $ZnCl_2$ عموماً تا ۳ تا ۵ چرخه جذب-واجذب را با کاهش راندمان کمتر از ۲۰٪ تحمل می کنند. به عنوان مثال، در برخی مطالعات، پس از ۳ سیکل باززایی، ظرفیت جذب بایوچار تنها ۱۰-۱۵٪ کاهش یافت که این امر بیانگر پایداری قابل قبول ساختار جاذب است.

روش های رایج باززایی شامل استفاده از محلول های قلیایی ملایم (مانند NaOH)، حلال های آلی (مانند اتانول یا متانول) و یا ترکیبی از این ها بوده است. با این حال، کاهش تدریجی ظرفیت جذب پس از هر سیکل نشان دهنده تخریب سایت های فعال سطحی، کاهش گروه های عاملی و احتمال گرفتگی منافذ است.

مسائل زیست محیطی: تولید زباله یا آلاینده ثانویه باید حداقل باشد.

بر اساس تحلیل مطالعات مرور شده و با توجه به معیارهای فوق، فعال سازی شیمیایی با NaOH به عنوان روشی با تعادل مطلوب بین ظرفیت جذب بالا، پایداری ساختار، سهولت اجرا، هزینه منطقی و بی خطری مواد شیمیایی انتخاب شده است. اگرچه روش های ترکیبی راندمان بالاتری ارائه می دهند، مزایای اقتصادی و ساده بودن اجرای NaOH آن را به گزینه ای مناسب برای تولید جاذب های زیست توده ای با عملکرد قابل قبول تبدیل کرده است.
۹۲۷۸۰۵۶۴۵

نقاط قوت و ضعف مطالعات مرور شده و پیشنهادهای پژوهشی آینده

بررسی مطالعات نشان می دهد که بایوچار، به ویژه انواع اصلاح شده ای، پتانسیل بالایی در حذف علف کش ۲ و ۴-دی از محیط های آبی دارد. از نقاط قوت پژوهش های انجام شده می توان به تنوع بالای مواد اولیه زیست توده، به کارگیری روش های مختلف فعال سازی و اصلاح سطحی، و استفاده از مدل های ایزوترمی و سینتیکی دقیق برای تبیین مکانیزم جذب اشاره کرد. همچنین توجه روزافزون به استفاده از پسماندهای کشاورزی به عنوان پیش ماده، نشان دهنده جهت گیری مناسب مطالعات به سوی راهکارهای پایدار و کم هزینه است.

با این حال، محدودیت هایی نیز وجود دارد. بیشتر پژوهش ها در شرایط آزمایشگاهی کنترل شده و با محلول های مصنوعی انجام شده اند که نمی توانند پیچیدگی واقعی پساب های کشاورزی را به خوبی نشان دهند. روش های آزمایش، واحدهای اندازه گیری و نحوه گزارش دهی داده ها در میان مطالعات متفاوت بوده و مقایسه ی نظام مند نتایج را دشوار کرده است. علاوه بر این، مطالعات اندکی به ارزیابی ترمودینامیکی، پایداری در چرخه های باززایی و تحلیل اقتصادی پرداخته اند. همچنین اثر ترکیبات هم زمان، یون های

چالش های اصلی در این زمینه عبارتند از:

تخریب ساختار سطحی و کاهش بازده جذب در هر سیکل باززایی؛

وابستگی باززایی به مواد شیمیایی و اثرات زیست محیطی ناشی از آن؛

نبود مطالعات جامع درباره باززایی در شرایط واقعی و صنعتی؛

با توجه به اهمیت پایداری جاذب ها، پیشنهاد می شود پژوهش های آینده روی توسعه روش های باززایی سبزتر (مانند استفاده از فناوری های اکسیداسیون پیشرفته یا فرآیندهای زیستی) و ارزیابی چرخه عمر بایوچار در کاربردهای واقعی متمرکز شوند.
۹۴،۹۲،۷۸

مقایسه روش های آماده سازی جاذب های زیست توده ای و معیار انتخاب بهترین روش

روش های مختلف آماده سازی جاذب های زیست توده ای شامل فعال سازی شیمیایی (با NaOH، H_3PO_4 ، $ZnCl_2$ و KOH)، فعال سازی فیزیکی و پیرولیز ساده بوده و هر یک دارای مزایا و محدودیت های خاص خود هستند. برخی مطالعات همچنین از روش های ترکیبی بهره گرفته اند که منجر به ظرفیت جذب بالاتر و عملکرد بهینه تر شده است. با این حال، پیچیدگی فرآیند، نیاز به مواد شیمیایی بیشتر و هزینه بالاتر، اجرای این روش ها را در مقیاس عملیاتی محدود می کند.

معیارهای اصلی انتخاب بهترین روش شامل:

بازده جذب نهایی: جاذب باید ظرفیت مناسبی برای حذف آلاینده ها داشته باشد.

پایداری ساختار: ساختار جاذب باید در چرخه های متعدد جذب و جاذب حفظ شود.

هزینه و پیچیدگی عملیاتی: فرآیند باید از نظر اقتصادی و اجرایی قابل انجام باشد.

مصرف انرژی و مواد شیمیایی: استفاده کمتر از انرژی و مواد شیمیایی خطرناک ترجیح داده می شود.

برای انجام این مطالعه مروری و مقایسه‌ای صمیمانه
قردانی می‌شود.

تعارض منافع

نویسندگان اذعان می‌دارند که در اجرای پژوهش و نگارش
این مقاله هیچ گونه تعارض منافی نداشته‌اند.

حمایت مالی

در اجرای این پژوهش، نویسندگان از هیچ گونه حمایت
مالی از سوی سازمان‌ها، نهادها یا دانشگاه‌ها بهره‌مند
نشده‌اند.

ملاحظات اخلاقی

این مطالعه از نوع مطالعه مروری و مقایسه‌ای بر
پژوهش‌های پیشین است و شامل مداخله بر انسان یا
حیوانات و گردآوری داده‌های اولیه از شرکت‌کنندگان
نمی‌باشد؛ بنابراین اخذ کد اخلاق ضرورت نداشته است.

مشارکت نویسندگان

ارائه ایده پژوهش: مژده کرامت‌زاده، افشین تکدستان

جمع‌آوری اطلاعات: مژده کرامت‌زاده، افشین تکدستان

آماده‌سازی نسخه‌های مختلف مقاله: مژده کرامت‌زاده

نگارش و ویرایش نسخه‌های مختلف مقاله: افشین

تكدستان

ارائه مشاوره در اجرای پژوهش: مجید احتشامی

نظارت بر آماده‌سازی نسخه نهایی مقاله: مجید احتشامی

مزام و تغییرات pH در محیط‌های واقعی کمتر بررسی
شده است.

بر این اساس، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده بر موارد
زیر تمرکز داشته باشند:

- استانداردسازی روش‌های آزمایشگاهی برای امکان
مقایسه‌ی دقیق‌تر بین نتایج مطالعات مختلف؛

- بررسی عملکرد بایوچار در شرایط واقعی منابع آب و
پساب‌های کشاورزی به‌جای محیط‌های مصنوعی؛

- ترکیب فرآیند جذب سطحی با روش‌های اکسیداسیون
پیشرفته یا زیستی به منظور افزایش کارایی حذف؛

- توسعه‌ی روش‌های مؤثر باززایی به‌گونه‌ای که پایداری
بایوچار در چرخه‌های متعدد حفظ شود؛

- انجام ارزیابی‌های اقتصادی و تحلیل چرخه‌ی عمر (LCA)
جهت بررسی امکان‌پذیری صنعتی و زیست‌محیطی فناوری
بایوچار.

پرداختن به این موضوعات می‌تواند به توسعه‌ی کاربرد
بایوچارهای حاصل از پسماندهای کشاورزی به‌عنوان
جاذب‌هایی مقرون‌به‌صرفه، پایدار و مؤثر در مدیریت آلودگی
منابع آبی آلوده به علف‌کش‌ها کمک شایانی کند.

سپاسگزاری

بدین وسیله از بخش پژوهش و همچنین کتابخانه دانشکده
بهداشت دانشگاه علوم پزشکی جندی‌شاپور اهواز به‌دلیل
فراهم‌سازی دسترسی به منابع علمی و حمایت‌های لازم

References

- Islam F, Wang J, Farooq MA, Khan MS, Xu L, Zhu J, Zhao M, Muños S, Li QX, Zhou W. Potential impact of the herbicide 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid on human and ecosystems. *Environment international*. 2018;111:332-351 .
- Benbrook CM. Trends in glyphosate herbicide use in the United States and globally. *Environmental Sciences Europe*. 2016;28:3 .
- Gervais J, Luukinen B, Buhl K, Stone D. 2, 4-D technical fact sheet. National Pesticide Information Center, Oregon State University Extension Services. 2008 .
- Ambrus A, Hamilton DJ. Food safety assessment of pesticide residues. World Scientific; 2017.
- Ehteshami M, Keramatzadeh M, Takdastan A. Analysis and Monitoring of the Herbicide 2, 4-D in Agricultural Drainage Systems and Karun River Using HPLC Method. *Pollution*. 2025;11:889-900 .
- Orooji N, Takdastan A, Jalilzadeh Yengejeh R, Jorfi S, Davami AH. Monitoring of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid concentration in Karun River and effluents of water treatment plants. *Toxin Reviews*. 2022;41:785-794 .
- Jorfi S, Almasi H, Takdastan A, Jaafarzadeh N, Tahmasebi Y, Babaei A. Spatiotemporal variations of 2, 4-dichlorophenoxy acetic acid with the role of sugarcane industry and related human health risk assessments in the Shadegan International Wetland. *Environmental Geochemistry and Health*. 2023;45:5279-5291 .
- Shahsavari AA, Khodaei K, Asadian F, Ahmadi F, Zamanzadeh SM. Groundwater pesticides residue in the southwest of Iran-Shushtar plain. *Environmental Earth Sciences*. 2012;65:231-239 .
- Organization WH. Guidelines for drinking-water quality: incorporating the first and second addenda. World Health Organization; 2022.
- Jorfi S, Poormohammadi A, Maraghi E, Almasi H. Monitoring and health risk assessment of organochlorine pesticides in Karun River and drinking water Ahvaz city, South West of Iran. *Toxin Reviews*. 2022;41:361-369 .
- Rezaeigolestani M, Hashemi M. A review of pesticide residues in agricultural and food products of Iran. *Journal of nutrition, fasting and health*. 2018;6:1-6 .
- Samarghandi MR, Jaafarzadeh Haghighi Fard N, Jorfi S, Yari AR, Panahi Fard M. Pollution status of pesticide residues in food products in Iran: A mini-review within 2008-2018. *Archives of Hygiene Sciences*. 2020;9:214-223 .
- Meftaul IM, Venkateswarlu K, Dharmarajan R, Annamalai P, Megharaj M. Movement and fate of 2, 4-D in urban soils: A potential environmental health concern. *ACS omega*. 2020;5:13287-13295 .
- Buerge IJ, Pavlova P, Hanke I, Bächli A, Poiger T. Degradation and sorption of the herbicides 2, 4-D and quizalofop-P-ethyl and their metabolites in soils from railway tracks. *Environmental Sciences Europe*. 2020;32:150 .
- Parven A, Md Meftaul I, Venkateswarlu K, Gopalan S, Megharaj M. Pre-emergence herbicides widely used in urban and farmland soils: fate, and potential human and environmental health risks. *Environmental Geochemistry and Health*. 2024;46:132 .
- Wozniak-Karczewska M, Parus A, Ciesielski T, Trzebny A, Szumski R, Wilms W, Homa J, Framski G, Baranowski D, Frankowski R. Effect of cation sorption on 2, 4-D mobility of herbicidal ionic liquids in agricultural soil combined with diversity of the bacterial community. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2022;10:12559-12568 .
- Freisthler MS, Robbins CR, Benbrook CM, Young HA, Haas DM, Winchester PD, Perry MJ. Association between increasing agricultural use of 2, 4-D and population biomarkers of exposure: findings from the National Health and Nutrition Examination Survey, 2001–2014. *Environmental Health*. 2022;21:23 .
- Parven A, Meftaul IM, Venkateswarlu K, Megharaj M. Herbicides in modern sustainable agriculture: environmental fate, ecological implications, and human health concerns. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2025;22:1181-1202 .
- Mekonen S, Argaw R, Simaneseaw A, Houbraken M, Senaeve D, Ambelu A, Spanoghe P. Pesticide residues in drinking water and associated risk to consumers in Ethiopia. *Chemosphere*. 2016;162:252-260 .
- Burns C, Bodner K, Swaen G, Collins J, Beard K, Lee M. Cancer incidence of 2, 4-D production workers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2011;8:3579-3590 .
- Burns CJ, Swaen GM. Review of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid (2, 4-D) biomonitoring and epidemiology. *Critical Reviews in Toxicology*. 2012;768:42-786.
- Dann AB. The effects of triclosan, 2, 4-D, and their by-products on the adrenocortical cells of rainbow trout. In: Lethbridge, Alta.: University of Lethbridge, Dept. of Biological Sciences, c2011; 2011.
- Curi LM, Peltzer P, Sandoval MT, Lajmanovich RC. Acute toxicity and sublethal effects caused by a commercial herbicide formulated with 2, 4-D on *Physalaemus albonotatus* tadpoles. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2019;230:22 .
- Gaaied S, Oliveira M, Domingues I, Banni M. 2, 4-Dichlorophenoxyacetic acid herbicide effects on zebrafish larvae: development, neurotransmission and behavior as sensitive endpoints. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27:3686-3696 .
- Viriato C, Franca FM, Santos DS, Marcantonio AS, Badaro-Pedroso C, Ferreira CM. Evaluation of the potential teratogenic and toxic effect of the herbicide 2,4-D (DMA® 806) in bullfrog embryos and tadpoles (*Lithobates catesbeianus*). *Chemosphere*. 2021;266:129018 .

26. Organization WH. Pesticide residues in food—Evaluation 2019: Part II, Toxicological. Food & Agriculture Org.; 2021.
27. Pest HTIY, Pesticides L-R, Poisonings H, Land IOT. 2, 4-D Fact Sheet .
28. National Family Farm Coalition v. US EPA. In: F. 3d. Court of Appeals, 9th Circuit; 2020:893.
29. Girón-Navarro R, Linares-Hernández I, Teutli-Sequeira EA, Martínez-Miranda V, Santoyo-Tepole F. Evaluation and comparison of advanced oxidation processes for the degradation of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D): a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28:26325-26358 .
30. Khader EH, Muslim SA, Saady NMC, Ali NS, Salih IK, Mohammed TJ, Albayati TM, Zendeheboudi S. Recent advances in photocatalytic advanced oxidation processes for organic compound degradation: A review. *Desalination and Water Treatment*. 2024;318:100384 .
31. de Souza TF, Dias Ferreira GM. Biochars as Adsorbents of Pesticides: Laboratory-Scale Performances and Real-World Contexts, Challenges, and Prospects. *ACS ES&T Water*. 2024;4:4264-4282 .
32. Satyam S, Patra S. Innovations and challenges in adsorption-based wastewater remediation: A comprehensive review. *Heliyon*. 2024;10 .
33. Ighalo JO, Ojukwu VE, Umeh CT, Aniagor CO, Chinyelu CE, Ajala OJ, Dulta K, Adeola AO, Rangabhashiyam S. Recent advances in the adsorptive removal of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid from water. *Journal of Water Process Engineering*. 2023;56:104514 .
34. Gao Y, Zhang Y, Li A, Zhang L. Facile synthesis of high-surface area mesoporous biochar for energy storage via in-situ template strategy. *Materials Letters*. 2018;230:183-186 .
35. Flafel HM, Rafatullah M, Lalung J, Kapoor RT, Siddiqui MR, Qutob M. Enhancing the efficiency of phytoremediation using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for 2,4-dichlorophenoxyacetic acid removal with modified biochar as an assisted agent. *Chemosphere*. 2024;367:143591. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143591>
36. Zhong Y, Deng Q, Zhang P, Wang J, Wang R, Zeng Z, Deng S. Sulfonic acid functionalized hydrophobic mesoporous biochar: Design, preparation and acid-catalytic properties. *Fuel*. 2019;240:270-277 .
37. Yang H, Chen P, Chen W, Li K, Xia M, Xiao H, Chen X, Chen Y, Wang X, Chen H. Insight into the formation mechanism of N, P co-doped mesoporous biochar from H₃PO₄ activation and NH₃ modification of biomass. *Fuel Processing Technology*. 2022;230:107215 .
38. Reguyal F, Praneeth S, Sarmah AK. Modelling and spectroscopic investigation of 2, 4-D adsorption in soil amended with pine sawdust, paunch grass and sewage sludge biochars. *Water Emerging Contaminants & Nanoplastics*. 2023;2:N/A-N/A .
39. Dong X, Chu Y, Tong Z, Sun M, Meng D, Yi X, Gao T, Wang M, Duan J. Mechanisms of adsorption and functionalization of biochar for pesticides: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2024;272:116019 .
40. Fernandez ME, del Rosario Morel M, Clebot AC, Zalazar CS, de los Milagros Ballari M. Effectiveness of a simple biomixture for the adsorption and elimination of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid (2, 4-D) herbicide and its metabolite, 2, 4-dichlorophenol (2,4-DCP), for a biobed system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022;10:106877 .
41. Tuzimski T. Pesticide Classification and Properties. In: *High Performance Liquid Chromatography in Pesticide Residue Analysis*. CRC Press; 2015:11-75.
42. Peterson MA, McMaster SA, Riechers DE, Skelton J, Stahlman PW. 2, 4-D past, present, and future: a review. *Weed Technology*. 2016;30:303-345 .
43. Qurratu A, Reehan A. A review of 2, 4-Dichlorophenoxyacetic acid (2, 4-D) derivatives: 2,4-D dimethylamine salt and 2, 4-D butyl ester. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016;11:9946-9955 .
44. University of Hertfordshire AERUA. PPDB: Pesticide Properties Database – 2,4-D. <https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/Reports/4.htm?utm. 2025 .>
45. (ATSDR) AftSaDR. Toxicological profile for 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D). In; 2020.
46. (FAO) FaAOotUN. Physico-chemical properties of pure 2,4-D. In; 2021.
47. Canada H. Guidelines for Canadian Drinking Water Quality: Guideline Technical Document 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D). In; 2022.
48. Tayeb W, Chaieb I, Hammami M. Environmental fate and effects of 2, 4-dichlorophenoxyacetic herbicide. In: *Nova Sciences Publisher: New York*; 2011:161-187.
49. Magnoli K, Carranza CS, Aluffi ME, Magnoli CE, Barberis CL. Herbicides based on 2,4-D: its behavior in agricultural environments and microbial biodegradation aspects. A review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27:38501-38512 .
50. Wang Y, Tian Y-S, Gao J-J, Xu J, Li Z-J, Fu X-Y, Han H-J, Wang L-J, Zhang W-H, Deng Y-D. Complete biodegradation of the oldest organic herbicide 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid by engineering *Escherichia coli*. *Journal of Hazardous Materials*. 2023;451:131099 .
51. Barros do Nascimento AC, Nhampossa NA, Félix TsP, Itabaiana Jr I, Nascimento RPd. Exploring Fungal Biodegradation Pathways of 2,4-D: Enzymatic Mechanisms, Synergistic Actions, and Environmental Applications. *ACS Omega*. 2025 .
52. Vázquez AEG, Chou MY, Hockemeyer KR, Vang M, Koch PL. Seasonal Environmental Variation Impacts 2,4-D Fate and Metabolism in Urban Landscapes. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2025;vgaf205 .

53. Jote CA. A review of 2, 4-D environmental fate, persistence and toxicity effects on living organisms. *Org Med Chem Int J*. 2019;9:22-32 .
54. Authority EFS, Álvarez F, Arena M, Auteri D, Leite SB, Binaglia M, Castoldi AF, Chiusolo A, Colagiorgi A, Colas M. Updated peer review of the pesticide risk assessment of the active substance dichlorprop-P and variant dichlorprop-P-2-ethylhexyl. *EFSA Journal*. 2024;22:e8658 .
55. Mount CRMR. Herbicide systemb .
56. Dehghani M, Nasser S, Karamimanes M. Removal of 2, 4-Dichlorophenoxyacetic acid (2, 4-D) herbicide in the aqueous phase using modified granular activated carbon. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2014;12:28 .
57. Coelho ERC, Brito GMd, Frasson Loureiro L, Schettino Jr MA, Freitas JCCd. 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid (2, 4-D) micropollutant herbicide removing from water using granular and powdered activated carbons: a comparison applied for water treatment and health safety. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*. 2020;55:361-375 .
58. Sarker A, Kim D, Jeong W-T. Environmental fate and sustainable management of pesticides in soils: a critical review focusing on sustainable agriculture. *Sustainability*. 2024;16:10741 .
59. Ray S, Shaju ST. Bioaccumulation of pesticides in fish resulting toxicities in humans through food chain and forensic aspects. *Environmental Analysis, Health and Toxicology*. 2023;38:e2023017 .
60. Tyohemba RL, Pillay L, Humphries MS. Bioaccumulation of current-use herbicides in fish from a global biodiversity hotspot: Lake St Lucia, South Africa. *Chemosphere*. 2021;284:131407 .
61. Banae M. Toxicological interaction effects of herbicides and the environmental pollutants on aquatic organisms. In: *New Insights in Herbicide Science*. IntechOpen; 2022.
62. Hongoeb J, Tantimongcolwat T, Ayimbila F, Ruankham W, Phopin K. Herbicide-related health risks: key mechanisms and a guide to mitigation strategies. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*. 2025;20:6 .
63. (IARC) IAfRoC. IARC Monographs evaluate DDT, lindane, and 2,4-D (Press Release No 236). In; 2015.
64. Mohd Ghazi R, Nik Yusoff NR, Abdul Halim NS, Wahab IRA, Ab Latif N, Hasmoni SH, Ahmad Zaini MA, Zakaria ZA. Health effects of herbicides and its current removal strategies. *Bioengineered*. 2023;14:2259526 .
65. Gurav R, Mandal S, Smith LM, Shi SQ, Hwang S. The potential of self-activated carbon for adsorptive removal of toxic phenoxyacetic acid herbicide from water. *Chemosphere*. 2023;339:139715 .
66. Chen S-F, Chen W-J, Song H, Liu M, Mishra S, Ghorab MA, Chen S, Chang C. Microorganism-driven 2, 4-D biodegradation: Current status and emerging opportunities. *Molecules*. 2024;29:3869 .
67. Wu X, Wang W, Liu J, Pan D, Tu X, Lv P, Wang Y, Cao H, Wang Y, Hua R. Rapid biodegradation of the herbicide 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid by *Cupriavidus gilardii* T-1. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2017;65:3711-3720.
68. Hosseini N, Toosi MR. Removal of 2,4-D, glyphosate, trifluralin, and butachlor herbicides from water by polysulfone membranes mixed by graphene oxide/TiO₂ nanocomposite: study of filtration and batch adsorption. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2019;17:247-258 .
69. Gong W, Bai L, Liang H. Membrane-based technologies for removing emerging contaminants in urban water systems: Limitations, successes, and future improvements. *Desalination*. 2024;590:117974 .
70. Blachnio M, Kusmierek K, Swiatkowski A, Derylo-Marczewska A. Adsorption of phenoxyacetic herbicides from water on carbonaceous and non-carbonaceous adsorbents. *Molecules*. 2023;28:5404 .
71. Gallego-Ramírez C, Chica E, Rubio-Clemente A. Combination of Biochar and Advanced Oxidation Processes for the Sustainable Elimination of Pharmaceuticals in Water. *Sustainability*. 2024;16:10761 .
72. Ahmed MB, Zhou JL, Ngo HH, Guo W. Adsorptive removal of antibiotics from water and wastewater: progress and challenges. *Science of the Total Environment*. 2015;532:112-126 .
73. Alluhaybi AA, Alharbi A, Alshammari KF, El-Desouky MG. Efficient adsorption and removal of the herbicide 2,4-dichlorophenylacetic acid from aqueous solutions using MIL-88 (Fe)-NH₂. *ACS omega*. 2023;8:40775-40784.
74. Wang Y, Chen L, Zhu Y, Fang W, Tan Y, He Z, Liao H. Research status, trends, and mechanisms of biochar adsorption for wastewater treatment: a scientometric review. *Environmental Sciences Europe*. 2024;36:25 .
75. Jha S, Gaur R, Shahabuddin S, Tyagi I. Biochar as sustainable alternative and green adsorbent for the remediation of noxious pollutants: a comprehensive review. *Toxics*. 2023;11:117 .
76. Al-Ghouti MA, Al-Absi RS. Mechanistic understanding of the adsorption and thermodynamic aspects of cationic methylene blue dye onto cellulosic olive stones biomass from wastewater. *Scientific Reports*. 2020;10:15928 .
77. Jagadeesh N, Sundaram B. Adsorption of pollutants from wastewater by biochar: a review. *Journal of Hazardous Materials Advances*. 2023;9:100-226.
78. Samanth A, Chandrasekar R, Vinayagam R, Selvaraj R. Density Functional Theory Insights into the Adsorption of 2, 4-Dichlorophenoxyacetic Acid by Mesoporous

- Biochar. South African Journal of Chemical Engineering. 2025 .
79. Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: science and technology. Routledge; 2012.
80. Ahmad M, Rajapaksha AU, Lim JE, Zhang M, Bolan N, Mohan D, Vithanage M, Lee SS, Ok YS. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. Chemosphere. 2014;99:19-33 .
81. Braghiroli FL, Bouafif H, Neculita CM, Koubaa A. Activated biochar as an effective sorbent for organic and inorganic contaminants in water. Water, Air, & Soil Pollution. 2018;229:230 .
82. Liu K, He Y, Xu S, Hu L, Luo K, Liu X, Liu M, Zhou X, Bai L. Mechanism of the effect of pH and biochar on the phytotoxicity of the weak acid herbicides imazethapyr and 2,4-D in soil to rice (*Oryza sativa*) and estimation by chemical methods. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2018;161:602-609.
83. Ma W, Song R, Wang Y, Cui X, Yan Y, Liu Z, Wang X, Gao H, Lua R, Zhou W. Optimized Ginkgo leaf biochar: An efficient adsorbent for 2,4-D herbicide removal from wastewater. Water Environment Research. 2024;96:e11124 .
84. Qiu M, Liu L, Ling Q, Cai Y, Yu S, Wang S, Fu D, Hu B, Wang X. Biochar for the removal of contaminants from soil and water: a review. Biochar. 2022;4:19 .
85. Keramatzadeh M, Ehteshami M, Takdastan A. Removal of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid Using Activated Dates Seed Biochar: Adsorption Characteristics and Optimization. 2025.
86. Keramatzadeh M, Ehteshami M, Takdastan A. Efficient removal of 2,4-D using NaOH-activated date seed Biochar with adsorption behavior, kinetic and isotherm modeling, and process optimization. Scientific Reports. 2025 .
87. Tan X, Liu Y, Zeng G, Wang X, Hu X, Gu Y, Yang Z. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. Chemosphere. 2015;125:70-85 .
88. Mia S, Dijkstra FA, Singh B. Aging induced changes in biochar's functionality and adsorption behavior for phosphate and ammonium. Environmental science & technology. 2017;51:8359-8367 .
89. Zhang H, Chen C, Gray EM, Boyd SE. Effect of feedstock and pyrolysis temperature on properties of biochar governing end use efficacy. Biomass and Bioenergy. 2017;105:136-146 .
90. Ok YS, Palansooriya KN, Yuan X, Rinklebe J. Special issue on biochar technologies, production, and environmental applications in Critical Reviews in Environmental Science & Technology during 2017–2021. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2022;52:3375-3383 .
91. Kearns JP, Wellborn L, Summers R, Knappe D. 2,4-D adsorption to biochars: Effect of preparation conditions on equilibrium adsorption capacity and comparison with commercial activated carbon literature data. Water research. 2014;62:20-28 .
92. Hameed B, Salman J, Ahmad A. Adsorption isotherm and kinetic modeling of 2, 4-D pesticide on activated carbon derived from date stones. Journal of hazardous materials. 2009;163:121-126 .
93. Binh QA, Nguyen H-H. Investigation the isotherm and kinetics of adsorption mechanism of herbicide 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid (2, 4-D) on corn cob biochar. Bioresource Technology Reports. 2020;11:100520 .
94. Georjin J, Franco DSP, Netto MS, Piccilli DGA, Foletto EL, Dotto GL. Adsorption investigation of 2,4-D herbicide on acid-treated peanut (*Arachis hypogaea*) skins. Environ Sci Pollut Res Int. 2021;28:36453-36463.
95. Ma W, Fan J, Cui X, Wang Y, Yan Y, Meng Z, Gao H, Lu R, Zhou W. Pyrolyzing spent coffee ground to biochar treated with H3PO4 for the efficient removal of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid herbicide: adsorptive behaviors and mechanism. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2023;11:109165 .
96. Mandal S, Sarkar B, Igalavithana AD, Ok YS, Yang X, Lombi E, Bolan N. Mechanistic insights of 2, 4-D sorption onto biochar: Influence of feedstock materials and biochar properties. Bioresource technology. 2017;246:160-167 .
97. Bahrami M, Amiri MJ, Beigzadeh B. Adsorption of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid using rice husk biochar, granular activated carbon, and multi-walled carbon nanotubes in a fixed bed column system. Water Science and Technology. 2018;78:1812-1821 .
98. Khan MM, Khan A, Bhatti HN, Zahid M, Alissa S, El-Badry YA, Hussein EE, Iqbal M. Composite of polypyrrole with sugarcane bagasse cellulosic biomass and adsorption efficiency for 2, 4-dichlorophenoxy acetic acid in column mode. Journal of Materials Research and Technology. 2021;15:2016-2025 .
99. Knani S, Khemis IB, Fuhr ACFP, Lefi N, Mahmoud SA, Dotto GL, Alenazi A, Selmi R. Theoretical modeling of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid on acid-treated peanut skin: microscopic analysis via statistical physics treatment. Scientific Reports. 2025;15:14238.
100. Vinayagam R, Nagendran V, Goveas LC, Narasimhan MK, Varadavenkatesan T, Samanth A, Selvaraj R. Machine learning, conventional and statistical physics modeling of 2, 4-Dichlorophenoxyacetic acid (2, 4-D) herbicide removal using biochar prepared from *Vateria indica* fruit biomass. Chemosphere. 2024;350:141130 .
101. Salman JM, Njoku V, Hameed BH. Adsorption of pesticides from aqueous solution onto banana stalk activated carbon. Chemical engineering journal. 2011;174:41-48 .
102. Essandoh M, Wolgemuth D, Pittman CU, Mohan D, MIsna T. Phenoxy herbicide removal from aqueous solutions using fast pyrolysis switchgrass biochar. Chemosphere. 2017;174:49-57. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.105>

103. Sellaoui L, Dotto GL, Pereira HA, Vieira Y, dos Reis GS, Oliveira ML, Silva LF, Khan MR, Manoharadas S, Godinho M. Adsorptive properties of the pesticides 2, 4-D, mecoprop, and dicamba on a pinus-based biochar: conventional and statistical physics evaluation. *Chemical Engineering Journal*. 2023;474:145564.
104. Zhu L, Zhao N, Tong L, Lv Y, Li G. Characterization and evaluation of surface modified materials based on porous biochar and its adsorption properties for 2,4-dichlorophenoxyacetic acid. *Chemosphere*. 2018;210:734-744. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.090>
105. Evy Alice Abigail M. Biochar-based nanocarriers: fabrication, characterization, and application as 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid nanoformulation for sustained release. *3 Biotech*. 2019;9:317
106. .
107. Tang L, Chen S, Wang N, Jiang X. Comparative study of adsorption and slow-release performance and mechanism of phosphoric acid and ammonia-modified biochars on 2,4-dichlorophenoxyacetic acid. *Separation and Purification Technology*. 2025;358:130470 .
108. Wang Z, Ren D, Wu J, Jiang S, Yu H, Cheng Y, Zhang S, Zhang X. Study on adsorption-degradation of 2,4-dichlorophenol by modified biochar immobilized laccase. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2022;19:1393-1406 .
109. Amiri MJ, Roohi R, Arshadi M, Abbaspourrad A. 2, 4-D adsorption from agricultural subsurface drainage by canola stalk-derived activated carbon: insight into the adsorption kinetics models under batch and column conditions. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27:16983-16997.
110. Hernandez PT, Franco DS, Georjina J, Salau NP, Dotto GL. Adsorption of atrazine and 2, 4-D pesticides on alternative biochars from cedar bark sawdust (*Cedrella fissilis*). *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29:22566-22575.
111. Zhu L, Zhao N, Tong L, Lv Y, Li G. Characterization and evaluation of surface modified materials based on porous biochar and its adsorption properties for 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid. *Chemosphere*. 2018;210:734-744 .
112. Brito GM, Roldi LL, Schetino Jr MÂ, Checon Freitas JC, Cabral Coelho ER. High-performance of activated biocarbon based on agricultural biomass waste applied for 2, 4-D herbicide removing from water: adsorption, kinetic and thermodynamic assessments. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*. 2020;55:767-782 .
113. Ying B, Lin G, Jin L, Zhao Y, Zhang T, Tang J. Adsorption and degradation of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid in spiked soil with Fe0 nanoparticles supported by biochar. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*. 2015;65:215-221 .