JEHE Alborz University of Medical Sciences Journal of Environmental Health Engineering , 2026; 13(4):412-436 Systematic Review Article

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 Keramatzadeh[1], Afshin Takdastan[2*], Majid Ehteshami[3]

[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. 2026;13(4):412-36.

DOI:
10.66224/jehe.13.4.412

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

Copyright © 2026 The Authors.
Published by Alborz University of Medical Sciences
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International License. (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).Non-commercial uses of the work are permitted,provided the original work is properly cited.

JEHE Alborz University of Medical Sciences
مجله مهندسی بهداشت محیط، دوره ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، صفحات ۴۱۲ تا ۴۳۶
مقاله مرور ساختاریافته

مرور نظام‌مند بر کاربرد بایوچارهای مشتق‌شده از زیست‌توده در حذف علف‌کش ۲و۴–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

***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. 2026;13(4):412-36.

DOI:
10.66224/jehe.13.4.412

چکیده

زمینه و هدف: آلودگی منابع آب با علف‌کش ۲و۴–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 روش ها: این مطالعه با جستجو و تحلیل نظام‌مند منابع علمی منتشرشده در زمینه استفاده از بایوچار برای جذب سطحی ۲و۴–دی در پایگاه‌های Web of Science، Scopus، ScienceDirect 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.

یافته ها: 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 (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.

نتیجه گیری: 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 ۲و۴–دی، از منابع آب و پساب فراهم شود.

واژه های کلیدی: علف‌کش۲و۴–دی، بایوچار، جذب سطحی، زیست‌توده، آب و پسآب

مقدمه

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 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین علف‌کش‌های کلردار در جهان، بیش از هفت دهه است که در کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد [1]. بر اساس گزارش‌ها، علفکش ۲و۴-دی بعد از گلیفوسیت و آترازین، سومین علف‌کش پرمصرف در ایالات متحده است و در آمریکای شمالی نیز در همین جایگاه قرار دارد [2،3]. همچنین برخی منابع آن را در سطح جهانی به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین علف‌کش‌ها معرفی کرده‌اند [3،4]. در ایران نیز، به‌ویژه در استان‌های کشاورزی‌محور 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. [5-8] 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 [9-12].

علفکش ۲و۴-دی به دلیل ویژگی‌هایی همچون انحلال‌پذیری بالا در آب، پایداری شیمیایی و تحرک زیاد در خاک، به‌سرعت وارد محیط‌های آبی می‌شود [13-16].

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 [17-21]. همچنین بر محیط زیست و اکوسیستم‌های آبی (کاهش تنوع زیستی و سمیت برای موجودات آبزی) نیز، اثرات مخربی بر جای می گذارد [22-25]. بر همین اساس، سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (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 [26-28].

روش‌های متنوعی برای حذف ۲و۴-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 [29، 30]. 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 [31-33].

در میان جاذب‌های گوناگون، **بایوچار** به‌عنوان یک ماده‌ی کربنی سبز و پایدار، توجه زیادی را به خود جلب کرده است [31، 33]. 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 [34]. 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 [35-37]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که بایوچار می‌تواند به‌عنوان جایگزینی مقرون‌به‌صرفه و دوستدار محیط‌زیست در حذف انواع آفت کش ها از جمله علفکش ۲و۴-دی از محیط‌های آبی مطرح شود [38-40].

با وجود افزایش تعداد پژوهش‌ها در زمینه حذف علفکش ۲و۴-دی، چالش‌ها و شکاف‌های علمی مهمی همچنان

وجود دارد. نخست آنکه بیشتر مطالعات به بررسی شرایط خاص آزمایشگاهی محدود بوده و کمتر به مقایسه نظام‌مند کارایی جاذب‌های مختلف، به‌ویژه انواع بایوچارهای اصلاح‌شده، پرداخته‌اند. دوم آنکه مکانیسم‌های دقیق جذب ۲و۴-دی بر روی بایوچارها (مانند برهم‌کنش‌های π–π، 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 ۲و۴-دی از محیط‌های آبی، بررسی‌ها نشان می‌دهد که هنوز یک مرور جامع و نظام‌مند که عملکرد انواع بایوچارهای خام و اصلاح‌شده را از منظر نوع منبع زیست‌توده، 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. علاوه‌براین، 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 ۲و۴-دی انجام شده است، اما تاکنون مطالعه‌ای جامع که به‌صورت نظام‌مند به مقایسه روش‌های اصلاح بایوچار، تحلیل مکانیسم‌های جذب، ارزیابی شرایط عملیاتی و تفسیر نتایج مدل‌های ایزوترمی و سینتیکی پرداخته باشد، منتشر نشده است.

ازاین‌رو، 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 انجام‌شده درباره حذف علفکش ۲و۴-دی با استفاده از بایوچارهای مشتق‌شده از زیست‌توده 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 قابل‌کاربرد در شرایط واقعی فراهم سازد.

معرفی علفکش ۲و۴-دی کلروفنوکسی استیک اسید (۲و۴-دی)

انواع ویژگی های فیزیکوشیمیایی ۲و۴-دی:

علف‌کش **2,4-dichlorophenoxyacetic acid (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(CAS 94-75-7) به دلیل پایداری شیمیایی و هزینه‌ی پایین تولید، بیشترین کاربرد را دارد.

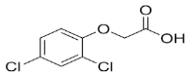
از نظر ساختار شیمیایی، ۲و۴-دی یک حلقه‌ی آروماتیک پایدار با دو اتم کلر در موقعیت‌های ارتو (۲ و ۴) و یک

گروه کربوکسیلیک اسیدی متصل به زنجیره‌ی اتری است [۴۲، ۴۳]. این ساختار موجب ایجاد ویژگی‌های زیر می‌شود:

- پایداری نسبی در برابر فرآیندهای طبیعی نظیر هیدرولیز و فتولیز.
- یونیزاسیون بالا در pH خنثی (pKa≈3.4) که منجر به افزایش حلالیت در آب می‌شود.
- تحرک بالا در محیط خاک به دلیل ضریب جذب پایین به کربن آلی(Koc<100).
- تمایل متوسط به چربی (LogKow≈2.8) در فرم خنثی، خطر انباشت زیستی را محدود اما امکان نفوذ به غشاهای سلولی را فراهم می‌کند.

این ویژگی‌ها سبب شده‌اند که ۲و۴–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 ۲و۴–دی در جدول ۱ خلاصه شده‌اند. داده‌ها از منابع مرجع شامل PPDB ، ATSDR و FAO گردآوری شده‌اند [۲۶، ۴۴-۴۷].

جدول ۱. انواع ویژگی های فیزیکوشیمیایی علفکش ۲و۴–دی [۲۶، ۴۴-۴۷]

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	**≈138°C**
نقطه جوش / تجزیه	در 273 °C تجذیه می شود	**در فشار کاهش‌یافته: 160 °C**
pKa (25 °C)	3.40	**یونیزاسیون بالا در pH خنثی**
فشار بخار(20 °C)	1.4×10^{-7} mmHg	**بسیار کم‌فرّار**
حلالیت در آب(20–25 °C)	540–677 mg/L(محیط اسیدی)	**به شدت وابسته به pH**
حلالیت در آب(pH≈7)	≈900 g/L	**ناشی از یونیزاسیون**
LogKow	2.81(گونه خنثی)	**تمایل متوسط به چربی**
LogD (pH≈7)	−0.82	**کاهش چربی‌دوستی به دلیل یونیزاسیون**

سرنوشت علفکش ۲و۴-دی در محیط زیست

سرنوشت علف‌کش ۲و۴-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 ۲و۴-دی‌کلروفنول 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 ۲و۴-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 هوازی بین ۱ تا چند هفته متغیر بوده، در حالی که در شرایط بی‌هوازی 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 ۲و۴-دی در شرایط مساعد (مانند محیط‌های اسیدی یا بی‌هوازی) پایداری بیشتری داشته و در نتیجه احتمال آلودگی پایدار منابع آبی و رسوبات افزایش می‌یابد (جدول ۲).

جدول ۲. سرنوشت علفکش ۲و۴- دی در محیط [۵۳،۴۵-۵۵]

توضیحات	مقدار/ بازه معتبر	ویژگی
نوع خاک معدنی هوازی در فرم اسید/نمک ۲و۴-دی	حدود ۶.۲ روز	نیمه عمر در خاک آزمایشگاهی (هوازی)
برای فرم نمک ۲و۴-دی	بین ۱ تا ۱۴ روز	نیمه عمر در خاک میدانی
تجذیه به صورت میکروبی در آب شیرین	حدود ۱۵ روز	نیمه عمر در آب هوازی
pHبرابر ۷ و دمای ۲۵ درجه سانتیگراد آب	حدود ۳۹ روز	نیمه عمر در هیدرولیز
تجذیه نوری در آب سطحی	حدود ۱۳ روز	نیمه عمر در فوتولیز سطحی
پایداری بالاتر در شرایط کم اکسیژن تر	۴۱ تا ۳۳۳ روز	نیمه عمر در آب و رسوب بی هوازی
تحرک متوسطی، بسته به نوع خاک دارد	۵۹-۱۱۷ $mg/_{lit}$	ضریب جذب در خاک-کربن آلی (Koc)
پتانسیل لیچینگ بالا بخصوص در خاک های شنی	متوسط تا زیاد	تحرک در خاک
برای فرم های اسید/نمک ۲و۴-دی (برای فرم استر تا ۱۰ $lit/_{kg}$ هم می رسد.)	بسیار پایین (تقریبا ۱ $lit/_{kg}$)	ضریب انباشت زیستی (BCF)

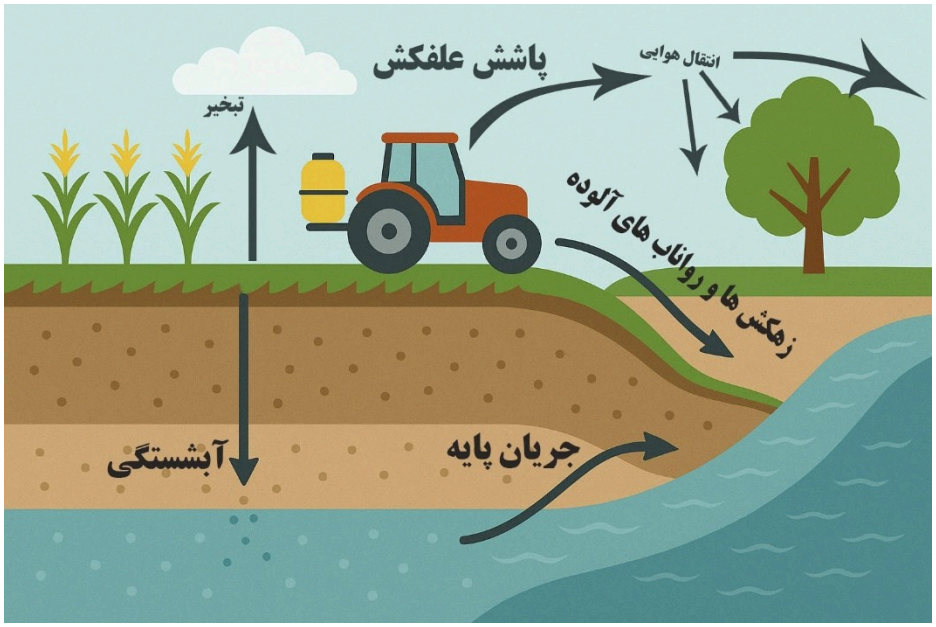
علاوه بر پایداری نسبی، ترکیب ۲و۴-دی به دلیل انحلال‌پذیری بالا در آب (تقریباً ۹۰۰ mg/L در دمای ۲۵ C°) [۵۶، ۵۷] و ضریب جذب پایین به کربن آلی خاک (Koc معمولاً کمتر از ۱۰۰ در بیشتر خاک‌های سبک) دارای تحرک بالایی در محیط است [۴۵]. این خصوصیات موجب می‌شود که این علف‌کش به‌سرعت از لایه‌های سطحی خاک عبور کرده و وارد آب‌های زیرزمینی یا زه‌آب‌های کشاورزی شود. به طور کلی، سه مسیر اصلی انتقال ۲و۴-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؛

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 ۲و۴-دی در محیط خواهند بود. (شکل ۱). [۵۸،۳]



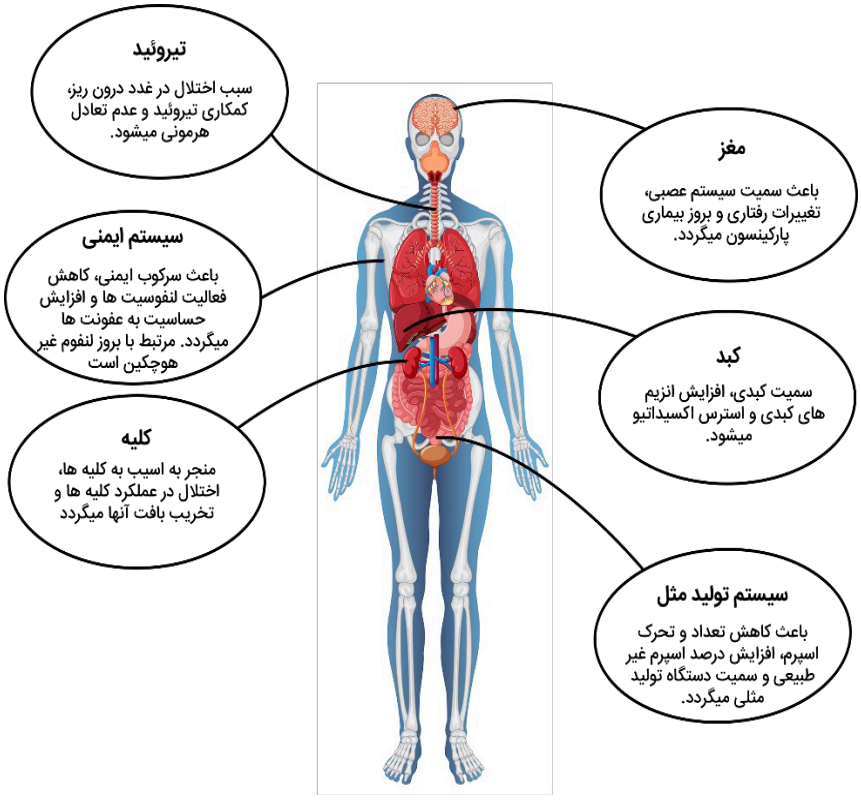
شکل ۱. مسیر حرکت علفکش در محیط [۵۹-۶۱]

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که حضور پایدار ۲و۴-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 کشاورزی‌محور نظیر مزارع نیشکر، خطر انتقال این ترکیب به تالاب‌ها و منابع شیلاتی افزایش می‌یابد. این امر ضرورت پایش مستمر و ارزیابی ریسک اکولوژیک و انسانی را برجسته می‌سازد [۵۹-۶۱].

اثرات بهداشتی علفکش ۲و۴-دی بر سلامت انسان

قرارگیری در معرض علف‌کش ۲و۴-دی می‌تواند پیامدهای متعددی بر سلامت انسان داشته باشد. مسیرهای اصلی ورود این ترکیب به بدن شامل تماس پوستی، بلع و در موارد کمتر

استنشاق است، که در این میان تماس پوستی بیشترین سهم (حدود ۹۰٪) را دارد. مطالعات نشان داده‌اند که ۲و۴-دی می‌تواند موجب اختلالات عصبی از جمله ضعف عضلانی، تغییرات رفتاری و افزایش خطر بیماری پارکینسون، اختلال در غدد درون‌ریز (به‌ویژه تیروئید و هورمون‌های جنسی)، سمیت کبدی و کلیوی و کاهش باروری شود. همچنین برخی مطالعات اپیدمیولوژیک ارتباط آن را با بروز لنفوم غیرهوچکین و سارکوم بافت نرم مطرح کرده‌اند، هرچند برخی نتایج موجود متناقض و غیرقطعی است. [۱] بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان (IARC) ، این علف‌کش در گروه 2B به معنای احتمالاً سرطان‌زا برای انسان طبقه‌بندی می‌شود. در شکل زیر، نمای شماتیک اندام‌های هدف انسانی تحت تأثیر علف‌کش ۲و۴-دی نشان داده شده است (شکل۲) [۳، ۴۷، ۶۲، ۶۳].



شکل۲. نمای شماتیک اندام‌های هدف انسانی تحت تأثیر علف‌کش ۲و۴-دی[۳،۴۷،۶۲،۶۳]

انواع روش های حذف علفکش ۲و۴-دی

برای حذف علف‌کش‌های مقاوم به‌ویژه ۲و۴-دی از محیط‌های آبی، روش‌های گوناگونی توسعه یافته‌اند که شامل **فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته(AOPs)** ، **تصفیه‌های بیولوژیکی، فرآیندهای غشایی و جذب سطحی** می‌باشند [۶۴]. هر یک از این رویکردها مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. به عنوان نمونه، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته قادر به تجزیه کامل آلاینده‌های آلی هستند، اما معمولاً هزینه‌بر بوده و با تولید محصولات جانبی سمی همراه‌اند [۶۵]. روش‌های بیولوژیکی از نظر زیست‌محیطی پایدار و کم‌هزینه‌اند، ولی وابستگی زیادی به شرایط محیطی دارند و به دلیل سرعت پایین و

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 ۲و۴-دی از محیط‌های آبی به شمار می‌رود [۷۱-۷۳].

بر همین اساس، در ادامه ابتدا فرآیند جذب سطحی به عنوان 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.

این فرآیند شامل چند مرحله‌ی کلیدی است : انتقال جرم از فاز محلول به سطح جاذب، نفوذ در خلل‌وفرج، 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 [۷۴-۷۶].

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 ۲و۴-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

گرمایش و محیط گازی) باشد. به‌طور 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 **pHpzc** (pH نقطه بار صفر)، ویژگی‌های سطحی و رفتار جذب آن را تعیین می کنند [۸۰، ۸۱].

از منظر زیست‌محیطی، بایوچار به‌عنوان 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 بهبود کیفیت خاک، تثبیت کربن و افزایش حاصلخیزی نیز نقش‌آفرینی کند.

در مقایسه با جاذب‌های متداولی مانند کربن فعال، بایوچار اگرچه ممکن است سطح ویژه پایین‌تری داشته باشد، اما به دلیل **قیمت پایین، دسترس‌پذیری بالا، و قابلیت اصلاح و فعال‌سازی**، به‌عنوان جایگزینی مقرون‌به‌صرفه 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 (فعال‌سازی حرارتی یا تولید نانوساختارها) می‌تواند ظرفیت جذب آن را به‌طور چشمگیری افزایش دهد [۷۵، ۸۲-۸۴].

بنابراین، بایوچار به‌عنوان یک جاذب نوظهور و کارآمد، قابلیت بالایی برای حذف آلاینده‌های آلی مقاوم نظیر علف‌کش ۲و۴-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.



شکل ۳. نمای ماکروسکوپی و تصویر SEM بایوچار [۸۵، ۸۶]

بایوچار خام، اگرچه به دلیل ساختار متخلخل و گروه‌های عاملی سطحی، ظرفیت جذب قابل‌توجهی برای آلاینده‌ها دارد، اما به‌تنهایی در حذف ترکیبات آلی مقاوم مانند علف‌کش‌ها همواره کارایی بالایی نشان

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** ۷۹، ۸۷-۸۹.

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 مانندHCl ، 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.
- **اصلاح با عوامل اکسیدکننده: موادی** مانند $KMnO_4$، H_2O_2یا 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 (مانندFe ، Mn، Znیا 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 مایکروویو: 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

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، بایوچاری با خاصیت دوگانه (جذب–کاتالیستی) ایجاد می‌کند.

اصلاح بیولوژیکی

اصلاح بیولوژیکی بایوچار شامل پوشش‌دهی سطح آن با میکروارگانیسم‌ها 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.

به طور کلی، اصلاح بایوچار رویکردی کلیدی برای ارتقای کارایی آن در حذف آلاینده‌های آلی مقاوم به‌ویژه ۲و۴-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 روش ها

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 ۲و۴-دی با استفاده از بایوچار و سایر جاذب‌های کربنی گردآوری و تحلیل شوند.

راهبرد جستجو

جستجوی نظام‌مند در پایگاه‌های داده‌ی معتبر شامل Web of Science، Scopus، ScienceDirect و Google Scholar انجام گرفت. بازه‌ی زمانی 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 ۲و۴-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 صرفا 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

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

جدول ۳. خلاصه مراحل غربالگری مطالعات بر اساس الگوی PRISMA

ردیف	مرحله	توضیح	تعداد
۱	شناسایی	مقالات شناسایی‌شده از پایگاه‌های داده Web of Science، Scopus، ScienceDirect 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 ۲و۴-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

استخراج و تجلیل داده ها

از هر مقاله‌ی منتخب، داده‌هایی شامل منبع زیست‌توده، روش و شرایط فعال‌سازی بایوچار، ویژگی‌های ساختاری (سطح ویژه، تخلخل، گروه‌های عاملی)، پارامترهای عملیاتی بهینه (pH، دما، دوز جاذب، 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.

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

یافته ها

بررسی مطالعات گردآوری‌شده در جدول ۴ نشان می‌دهد که کارایی بایوچار در حذف علف‌کش ۲و۴-دی به‌شدت تحت تأثیر نوع پیش‌ماده، شرایط پیرولیز و روش‌های اصلاح و فعال‌سازی قرار دارد. دامنه ظرفیت‌های جذب گزارش‌شده بسیار گسترده بوده و از کمتر از ۱۰ mg/g تا بیش از ۳۰۰ mg/g متغیر است، که این تنوع بیانگر اهمیت انتخاب صحیح ماده خام و فرآیند آماده‌سازی برای دستیابی به جاذب‌های کارآمد می‌باشد. به‌عنوان مثال، بیوچارهای ساده‌ی حاصل از پیرولیز (مانند مطالعه Kearns et al., 2014)[۹۱] ظرفیت‌هایی در حدود ۱۱mg/g نشان داده‌اند، در حالی که فعال‌سازی شیمیایی با موادی چون KOH یا $ZnCl_2$ منجر به توسعه چشمگیر تخلخل و افزایش سطح

ویژه شده و ظرفیت جذب را به بیش از ۲۰۰mg/g رسانده است[۸۳، ۹۲].

این اختلاف عملکرد را می‌توان ناشی از تفاوت در ساختار متخلخل، وجود گروه‌های عاملی فعال (به‌ویژه –OH و –COOH)، و نسبت‌های متفاوت کربن/اکسیژن در بایوچارهای حاصل دانست که هر کدام نقش تعیین‌کننده‌ای در مکانیسم‌های جذب دارند.

جدول ۴. مطالعات انجام‌شده در زمینه حذف ۲و۴-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 (qmax ,mg/g)	مدل ایزوترم	مدل‌سینتیکی	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 بادام‌زمینی	H_2SO_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 بی‌هوازی	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_2SO_4	۱۱۹/۸	–	۲/۰	۳	۶۶/۶۶	لانگمویر	شبه مرتبه دوم	Khan et al. (2021)	98
11	پوست بادام‌زمینی	H_2SO_4	–	۵۰	۱/۰	۳	۲۴۴/۳۳	HDL M1E	–	Knani et al. (2025)	99
12	میوه واتریا ایندیکا	HCL		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	–	۳۰۰-۵۰	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

15	گیاه Switchgrass	پیرولیز سریع	۱/۱	۴۰۰-۲۵	۲	۲	۱۳۴	فروندلیچ	شبه مرتبه دوم	Essandoh, M., et al., (2017)	102
16	چوب کاج	پیرولیز در دمای ۷۰۰ °C با نیتروژن	۳۰۴/۲	۰/۰۲۵	۱	۷	۱۰۰/۹ µg/g	لانگمویر	شبه مرتبه اول	Sellaoui, L., et al., (2023)	103
17	کاه ذرت	پتاسیم کربنات (K_2CO_3)	۶۸۰	۵۰-۵	۰/۶۷	-	۱۹/۸	لانگمویر	-	Zhu et al., (2018)	104
18	پوسته برنج	HCl	-	۱۵۰	۵۰	-	۹۰/۹	فروندلیچ	شبه مرتبه دوم	Evy et al., (2019)	105
19	خاک‌اره کاج	اسید فسفریک، سپس آمونیاک	-۱۱۵۳ ۱۲۰۹	۵۰-۱۰	۱	۳-۴	۷۰-۶۷	لانگمویر	شبه مرتبه دوم	Tang et al., (2025)	106
20	cetyltrimethylammonium bromide	KOH	-	-	-	-	۸۵/۱۳	لانگمویر	شبه مرتبه دوم	Wang et al., (2022)	107
21	ساقه کلزا	فعال‌سازی با بخار آب (600°C)	۵۵۶/۷۸	۱۵۰	۰/۰۵	۲	۱۳۵/۸	لانگمویر	Particle Diffusion Model	Amiri et al., (2020)	108
22	غلاف درخت Pterocarpus	H_3PO_4	۱۱۴۷/۷۱	-	۰/۲۵	۲	۳۰۲/۶۶	فروندلیچ	شبه مرتبه دوم	Samanth et al., (2025)	78
23	پوست درخت Cedrela fissilis	اصلاح فیزیکی و $ZnCl_2$	-۴۷/۳۱ ۹۸/۱۲	-	-	حذف ناکام ۲و۴ -دی	اصلاح فیزیکی: ۳.۴۴ اصلاح با $ZnCl_2$: ۲.۷	Koble – Corrigan	*Linear Driving Force (LDF)*	Hernandes et al., (2022)	109
24	ساقه ذرت	پیرولیز در دمای ۶۰۰ °C	۵۲۳	۵۰-۵	۰/۶۷	۷	۸/۵۴	لانگمویر	شبه مرتبه دوم	Zhu et al., (2018)	110
25	ساقه ذرت	فعال‌سازی با K_2CO_3	۶۸۰	۵۰-۵	۰/۶۷	۷	۱۹/۸۰	لانگمویر	شبه مرتبه دوم	Zhu et al., (2018)	110
26	ساقه ذرت	آمینه‌دار شده با گروه‌های نیتروژنی	۶۹۱	۵۰-۵	۰/۶۷	۷	۲۲/۸۴	لانگمویر	شبه مرتبه دوم	Zhu et al., (2018)	110
27	ساقه ذرت	اصلاح سطحی با HNO_3 (اکسیداسیون)	۲۹۰	۵۰-۵	۰/۶۷	۷	۱۲/۸۷	لانگمویر	شبه مرتبه دوم	Zhu et al., (2018)	110
28	باگاس نیشکر	فعال‌سازی فیزیکی (بخار ۸۰۰°C)	۵۴۷	۲۵۰-۵	۰/۴	۶.۹	۱۵۳/۹	Redlich – Peterson	شبه مرتبه دوم	Brito et al., (2020)	111
29	پوسته نارگیل	فعال‌سازی فیزیکی (بخار ۸۰۰°C)	۹۹۱	۲۵۰-۵	۰/۴	۶.۹	۲۳۳/۰	Redlich – Peterson	شبه مرتبه دوم	Brito et al., (2020)	111
30	اندوکارپ باباسو	فعال‌سازی فیزیکی (بخار ۸۰۰°C)	۱۰۶۸	۲۵۰-۵	۰/۴	۶.۹	۲۳۵/۵	Redlich – Peterson	شبه مرتبه دوم	Brito et al., (2020)	111

تمام مقادیر ظرفیت جذب (q_{max}) بر حسب mg/g گزارش شده است) به جز ردیف ۱۶ که بر حسب µg/g است .(علامت"–" نشان‌دهنده عدم گزارش داده در منبع اصلی است. مدل ایزوترم در ردیف‌های 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).

مشخصات محلول نیز عامل کلیدی در راندمان حذف است. اکثر مطالعات محدوده اسیدی ($pH = 2–3$) را به‌عنوان شرایط بهینه گزارش کرده‌اند، زیرا در این بازه، علفکش ۲و۴-دی عمدتاً به شکل خنثی وجود دارد و جذب از طریق برهم‌کنش‌های هیدروفوب، پیوندهای هیدروژنی و نیروهای واندروالس تقویت می‌شود. در مقابل، با افزایش pH و یونیزه شدن مولکول، بار منفی سطح بایوچار باعث دافعه الکترواستاتیکی می‌گردد و راندمان حذف کاهش می‌یابد.

افزون بر pH، پارامترهایی مانند غلظت اولیه آلاینده، دوز جاذب، و زمان تماس نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. نتایج اکثر مطالعات نشان داده‌اند که با افزایش غلظت اولیه، نیروی محرکه انتشار جرم بیشتر شده و ظرفیت جذب تا حد اشباع افزایش می‌یابد، اما درصد حذف به‌تدریج کاهش می‌یابد. در مقابل، افزایش دوز جاذب موجب افزایش تعداد سایت‌های فعال و بهبود راندمان حذف می‌شود. زمان تماس نیز معمولاً در محدوده ۶۰ تا ۱۲۰ دقیقه به حالت تعادل می‌رسد که با مدل شبه‌مرتبه دوم تطابق دارد.

از نظر مدل‌سازی ایزوترمی و سینتیکی، بیشترین برازش داده‌ها با مدل لانگمویر و مدل شبه‌مرتبه دوم گزارش شده است، که بیانگر غالب بودن جذب شیمیایی و تشکیل لایه یکنواخت از ۲و۴-دی بر سطح جاذب می‌باشد. با این حال، در برخی مطالعات برازش بهتر با مدل‌های فروندلیچ یا توماس نیز گزارش شده است، که نشان‌دهنده ناهمگنی سطح جاذب و پیچیدگی انتقال جرم است.

علاوه بر این، یافته‌های ترمودینامیکی در مطالعات منتخب حاکی از آن است که فرآیند جذب ۲و۴-دی بر روی بایوچارها اندوترمیک و خودبه‌خودی است، زیرا مقادیر $\Delta H°$ مثبت و $\Delta G°$ منفی گزارش شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش دما، حرکت مولکولی و نفوذ ۲و۴-دی را در منافذ میکرو و مزو تقویت می‌کند.

از دیدگاه پایداری، باززایی بایوچار یکی از چالش‌های اساسی است. نتایج مرور نشان می‌دهد که بایوچارهای اصلاح‌شده با NaOH یا $ZnCl_2$ معمولاً تا سه چرخه قابلیت استفاده مجدد را با کاهش کمتر از ۲۰٪ در راندمان حفظ می‌کنند، اما پس از آن کاهش قابل توجهی در ظرفیت جذب مشاهده می‌شود. این مسئله لزوم بهینه‌سازی فرآیند شستشو و بازفعال‌سازی جاذب را نشان می‌دهد.

بررسی پیش‌ماده‌های مورد استفاده برای تولید بایوچار نشان می‌دهد که طیف وسیعی از ضایعات زیستی مانند هسته خرما، پوسته برنج، ساقه موز، ضایعات قهوه و چای به کار گرفته شده‌اند. استفاده از این منابع علاوه بر کاهش هزینه تولید و وابستگی به مواد تجاری گران‌قیمت، راهکاری پایدار برای مدیریت پسماندهای کشاورزی و کاهش آلودگی محیط زیست فراهم می‌کند. این ویژگی دوگانه، بایوچار را به جاذبی نویدبخش در حوزه‌های مختلف زیست‌محیطی تبدیل کرده است. از منظر مکانیزم جذب، علاوه بر نیروهای فیزیکی (هیدروفوب و واندروالس)، برهم‌کنش‌های $\pi–\pi$ بین ساختارهای آروماتیک بایوچار و حلقه‌های بنزنی ۲و۴-دی، و همچنین تشکیل پیوندهای هیدروژنی بین گروه‌های عاملی سطحی (–OH و –COOH) و گروه‌های قطبی ۲و۴-دی، نقش مهمی ایفا می‌کنند. این مکانیسم‌ها در کنار بار سطحی بایوچار و شرایط عملیاتی، تعیین‌کننده کارایی نهایی فرایند هستند.

از دیگر عوامل مهم در ارزیابی کارایی جاذب‌های زیست‌توده‌ای، نحوه آماده‌سازی و فعال‌سازی آن‌ها است. در مطالعات بررسی‌شده، روش‌های متفاوتی مانند پیرولیز ساده، فعال‌سازی فیزیکی، و فعال‌سازی شیمیایی با مواد قلیایی یا اسیدی به‌کار رفته‌اند. فعال‌سازی شیمیایی با NaOH، به‌ویژه برای بقایای کشاورزی مانند هسته خرما، توانسته است ساختاری بسیار متخلخل و غنی از گروه‌های عاملی ایجاد کند که ظرفیت جذب ۲و۴-دی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. در حالی که روش‌هایی نظیر فعال‌سازی با $ZnCl_2$ نیز عملکرد جذبی مناسبی نشان داده‌اند، اما به دلیل هزینه بالاتر و مسائل زیست‌محیطی، استفاده از NaOH، از نظر اقتصادی و عملی ترجیح داده شده است. مجموع یافته‌ها

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 مکانیسم‌ها تأکید دارند. به‌عنوان مثال، Liu و همکاران (۲۰۱۸) [۸۲] نشان دادند که افزودن بایوچار به خاک می‌تواند سمیت ۲و۴-دی را برای گیاه برنج کاهش دهد. همچنین Ying و همکاران (۲۰۱۵) [۱۱۲] گزارش کردند که بایوچار بارگذاری‌شده با نانوذرات Fe^0 قادر است بیش از ۸۰٪ از ۲و۴-دی را در خاک اسپایک‌شده طی ۷۲ ساعت حذف کند. این نتایج بیانگر آن است که عملکرد بایوچار 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 مکانیسم‌های مشابهی را برجسته می‌سازند.

با وجود این پیشرفت‌ها، چالش‌های مهمی همچنان پابرجاست. اغلب مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده‌اند و داده‌های محدودی از کارایی بایوچار در شرایط واقعی منابع آبی وجود دارد. علاوه بر این، موضوعاتی نظیر باززایی بایوچار، 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 بایوچار در حذف علف‌کش‌ها محقق شود.

بحث

نتایج مرور نظام‌مند نشان داد که بایوچار 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 ۲و۴-دی دارد.[۹۲،۸۶،۸۵،۸۳] این کارایی بسیار به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی جاذب، مانند ساختار میکرو و مزوپور، حضور گروه‌های عاملی سطحی، و تعاملات کمّی با آلاینده وابسته است. تحلیل داده‌های جدول ۴ نشان می‌دهد که ظرفیت جذب گزارش شده در مطالعات مختلف از کمتر از ۱۰ mg/g (در بیوچار خام) تا بیش از ۳۰۰ 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

مکانیسم جذب ۲و۴-دی روی بایوچار شامل مجموعه‌ای از برهم‌کنش‌های فیزیکی و شیمیایی است. از جمله مهم‌ترین مسیرهای جذب می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- برهم‌کنش‌های π–π بین حلقه‌های آروماتیک بایوچار و ۲و۴-دی، که در دماهای پیرولیز بالا تقویت می‌شوند؛
- جذب الکترواستاتیک در pH کمتر از pKa (حدود ۳.۴)، که باعث تقویت برهم‌کنش‌های جاذب–جاذب در حالت غیربارادر علف‌کش می‌شود؛
- پیوندهای هیدروژنی بین گروه‌های –OH و –COOH موجود در بایوچارهای فعال‌شده و گروه‌های قطبی ۲و۴-دی؛
- پیوندهای کمپلکسی میان کاتیون‌های فلزی باقی‌مانده در ساختار بایوچار و مولکول‌های آلاینده. [۱۰۳،۹۴،۷۸]

مدل های 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 به‌دلیل فرض تک‌لایه بودن و سطح یکنواخت جاذب، بیشترین انطباق را

با داده‌های تجربی داشته و پارامتر q_{max} را به‌خوبی پیش‌بینی 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 ۲و۴-دی توسط بایوچار داشته‌اند:

pH محلول: جذب علف‌کش در محدوده‌ی اسیدی (کمتر از pKa=۳/۴) مطلوب‌تر است، زیرا ۲و۴-دی در حالت غیریونیزه قرار می‌گیرد و برهم‌کنش مؤثرتری با سطح بایوچار دارد. اکثر مطالعات pH بهینه را بین ۲ تا ۳ گزارش کرده‌اند [۸۵، ۹۳].

دوز جاذب: افزایش دوز جاذب منجر به افزایش راندمان حذف می‌شود، اما معمولاً کاهش ظرفیت ویژه جذب (mg/g) را به‌دنبال دارد، زیرا نسبت تعداد سایت‌های فعال نسبت به غلظت آلاینده افزایش یافته و اشباع سطح سریع‌تر صورت می‌گیرد [۷۸، ۹۳، ۱۰۰].

غلظت اولیه آلاینده: افزایش غلظت اولیه سبب افزایش نیروی محرکه انتقال جرم و ظرفیت جذب می‌شود، ولی درصد حذف به دلیل محدودیت سایت‌های فعال کاهش می‌یابد [۹۲، ۱۰۶].

زمان تماس: اکثر مطالعات نشان داده‌اند که تعادل جذب در بازه زمانی ۳۰ تا ۱۲۰ دقیقه حاصل می‌شود.

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

ترمودینامیک جذب

تحلیل پارامترهای ترمودینامیکی فرآیند جذب، درک عمیق‌تری از ماهیت و خودبه‌خودی بودن فرآیند ارائه می‌دهد. در اکثر مطالعات مرور شده، ثابت شده که جذب ۲و۴-دی توسط بایوچار دارای ویژگی‌های زیر است:

ΔG° منفی: مقدار منفی انرژی آزاد گیبس بیانگر خودبه‌خودی بودن فرآیند جذب در شرایط عملیاتی است. هرچه مقدار ΔG° منفی‌تر باشد، فرایند از نظر ترمودینامیکی مطلوب‌تر است.

ΔH° مثبت: مقدار مثبت آنتالپی نشان‌دهنده گرماگیر بودن فرایند جذب است؛ به این معنا که افزایش دما موجب بهبود راندمان جذب می‌شود. این ویژگی معمولاً با مکانیزم‌های جذب شیمیایی همراه است.

ΔS° مثبت: افزایش آنتروپی بیانگر افزایش بی‌نظمی در سیستم –جاذب و آلاینده– در طول جذب است. این پارامتر نشان می‌دهد که جذب با آزاد شدن مولکول‌های آب و تغییر ساختار سطحی جاذب همراه است.

این ویژگی‌ها در مجموع مؤید آن هستند که فرآیند جذب به‌طور غالب ماهیت شیمیایی دارد و به شدت به پارامترهایی مانند دما و ویژگی سطح جاذب وابسته است. علاوه بر این، وابستگی به دما نشان می‌دهد که در کاربردهای عملی، کنترل شرایط حرارتی می‌تواند نقشی حیاتی در بهینه‌سازی عملکرد جذب داشته باشد. [۷۸،۹۳،۱۰۰،۱۰۳]

بازیابی و پایداری جاذب

قابلیت بازیابی، از جمله مهم‌ترین معیارها برای ارزیابی امکان‌پذیری صنعتی جاذب‌هاست. نتایج مطالعات مرور شده نشان می‌دهند که بایوچارهای فعال‌شده با NaOH یا $ZnCl_2$ عموماً تا ۳ تا ۵ چرخه جذب–واجذب را با کاهش راندمان کمتر از ۲۰٪ تحمل می‌کنند. به‌عنوان مثال، در برخی مطالعات، پس از ۳ سیکل بازیابی، ظرفیت جذب بایوچار تنها ۱۰–۱۵٪ کاهش یافت که این امر بیانگر پایداری قابل قبول ساختار جاذب است.

روش‌های رایج بازیابی شامل استفاده از محلول‌های قلیایی ملایم (مانند NaOH)، حلال‌های آلی (مانند اتانول یا متانول) و یا ترکیبی از این‌ها بوده است. با این حال، کاهش تدریجی ظرفیت جذب پس از هر سیکل نشان‌دهنده تخریب سایت‌های فعال سطحی، کاهش گروه‌های عاملی و احتمال گرفتگی منافذ است.

چالش‌های اصلی در این زمینه عبارتند از:

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

وابستگی باززایی به مواد شیمیایی و اثرات زیست‌محیطی ناشی از آن؛

نبود مطالعات جامع درباره باززایی در شرایط واقعی و صنعتی؛

با توجه به اهمیت پایداری جاذب‌ها، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده روی توسعه روش‌های باززایی سبزتر (مانند استفاده از فناوری‌های اکسیداسیون پیشرفته یا فرآیندهای زیستی) و ارزیابی چرخه عمر بایوچار در کاربردهای واقعی متمرکز شوند [۷۸، ۹۲، ۹۴].

مقایسه روش‌های آماده‌سازی جاذب‌های زیست‌توده‌ای و معیار انتخاب بهترین روش

روش‌های مختلف آماده‌سازی جاذب‌های زیست‌توده‌ای شامل فعال‌سازی شیمیایی (با NaOH، H_3PO_4، $ZnCl_2$ و KOH)، فعال‌سازی فیزیکی و پیرولیز ساده بوده و هر یک دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند. برخی مطالعات همچنین از روش‌های ترکیبی بهره گرفته‌اند که منجر به ظرفیت جذب بالاتر و عملکرد بهینه‌تر شده است. با این حال، پیچیدگی فرآیند، نیاز به مواد شیمیایی بیشتر و هزینه بالاتر، اجرای این روش‌ها را در مقیاس عملیاتی محدود می‌کند.

معیارهای اصلی انتخاب بهترین روش شامل:

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

پایداری ساختار: ساختار جاذب باید در چرخه‌های متعدد جذب–واجذب 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 می‌شود.

مسائل زیست‌محیطی: تولید زباله یا آلاینده ثانویه باید حداقل باشد.

بر اساس تحلیل مطالعات مرور شده و با توجه به معیارهای فوق، فعال‌سازی شیمیایی با NaOH به‌عنوان روشی با تعادل مطلوب بین ظرفیت جذب بالا، پایداری ساختار، سهولت اجرا، هزینه منطقی و بی‌خطری مواد شیمیایی انتخاب شده است. اگرچه روش‌های ترکیبی راندمان بالاتری ارائه می‌دهند، مزایای اقتصادی و ساده بودن اجرای NaOH آن را به گزینه‌ای مناسب برای تولید جاذب‌های زیست‌توده‌ای با عملکرد قابل قبول تبدیل کرده است [۹۲،۷۸،۵۶،۴۵].

نقاط قوت و ضعف مطالعات مرورشده و پیشنهادهای پژوهشی آینده

بررسی مطالعات نشان می‌دهد که بایوچار، به‌ویژه انواع اصلاح‌شده‌ی آن، پتانسیل بالایی در حذف علف‌کش ۲و۴–دی از محیط‌های آبی دارد. از نقاط قوت پژوهش‌های انجام‌شده می‌توان به تنوع بالای مواد اولیه زیست‌توده، به‌کارگیری روش‌های مختلف فعال‌سازی و اصلاح سطحی، و استفاده از مدل‌های ایزوترمی و سینتیکی دقیق برای تبیین مکانیزم جذب اشاره کرد. همچنین توجه روزافزون به استفاده از پسماندهای کشاورزی به‌عنوان پیش‌ماده، نشان‌دهنده‌ی جهت‌گیری مناسب مطالعات به‌سوی راهکارهای پایدار و کم‌هزینه است.

با این حال، محدودیت‌هایی نیز وجود دارد. بیشتر پژوهش‌ها در شرایط آزمایشگاهی کنترل‌شده و با محلول‌های مصنوعی انجام شده‌اند که نمی‌توانند پیچیدگی واقعی پساب‌های کشاورزی را به‌خوبی نشان دهند. روش‌های آزمایش، واحدهای اندازه‌گیری و نحوه‌ی گزارش‌دهی داده‌ها در میان مطالعات متفاوت بوده و مقایسه‌ی نظام‌مند نتایج را دشوار کرده است. علاوه بر این، مطالعات اندکی به ارزیابی ترمودینامیکی، پایداری در چرخه‌های باززایی و تحلیل اقتصادی پرداخته‌اند. همچنین اثر ترکیبات هم‌زمان، یون‌های

مزاحم 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 به‌منظور 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

بدین‌وسیله از بخش پژوهش و همچنین کتابخانه دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی جندی‌شاپور اهواز به‌دلیل فراهم‌سازی دسترسی به منابع علمی و حمایت‌های لازم برای انجام این مطالعه مروری و مقایسه‌ای صمیمانه قدردانی می‌شود.

تعارض منافع

نویسندگان اذعان می‌دارند که در اجرای پژوهش و نگارش این مقاله هیچ‌گونه تعارض منافعی نداشته‌اند.

حمایت مالی

در اجرای این پژوهش، نویسندگان از هیچ‌گونه 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 تکدستان

ارائه مشاوره در اجرای پژوهش: مجید احتشامی

نظارت بر آماده‌سازی نسخه نهایی مقاله: مجید احتشامی

References

1. 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 .

2. Benbrook CM. Trends in glyphosate herbicide use in the United States and globally. Environmental Sciences Europe. 2016;28:3 .

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 .

4. Ambrus A, Hamilton DJ. Food safety assessment of pesticide residues. World Scientific; 2017.

5. 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 .

6. 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 .

7. 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 .

8. 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 .

9. Organization WH. Guidelines for drinking-water quality: incorporating the first and second addenda. World Health Organization; 2022.

10. 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 .

11. 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 .

12. 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 .

13. 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 .

14. 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 .

15. 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 .

16. 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 .

17. Freisthler MS, Robbins CR, Benbrook CM, Young HA, Haas DM, 17- 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 .

18. 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 .

19. Mekonen S, Argaw R, Simanesew 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 .

20. 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 .

21. Burns CJ, Swaen GM. Review of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid (2, 4-D) biomonitoring and epidemiology. Critical Reviews in Toxicology. 2012;768:42-786.

22. 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.

23. 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 .

24. 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 .

25. 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, Zendehboudi 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, Nasseri S, Karamimanesh M. Removal of 2, 4-Dichlorophenolyxacetic 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. Banaee 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. Georgin 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-dicholrophonxy 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, Mlsna 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. Hernandes PT, Franco DS, Georgin 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 .