2026, 2(2): 81-90

JAER

Journal of Animal Environmental Reaserch

Journal homepage: http://www.journalaer.com

Review Article

A Review on the Role of Biochar in Mitigating Microplastic Threats in Terrestrial and Aquatic Ecosystems with Emphasis on Animal Implications

Seyedeh Bahareh Azimi [1*], Azadeh Safadoust [2*], Nadia Babaei [3]

[1] *Department of Environment, Research Center for Environment and Sustainable Development, Tehran, Iran*
[2] *Department of Soil Science and Engineering, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran*
[3] *Department of Environment, Tehran, Iran*

Key Words

Ecosystem
Pollution
Biochar
Environment
Microplastic

Abstract

The uncontrolled and increasing proliferation of microplastic (MP) pollution in aquatic and terrestrial environments has emerged as one of the most complex and pervasive environmental challenges of the 21st century. These microscopic particles not only alter the physicochemical properties of ecosystems, but may also affect organism health across multiple trophic levels through food chain transfer, bioaccumulation, and trophic magnification processes. Among emerging mitigation strategies, biochar has gained considerable attention as a sustainable, cost-effective, and circular-economy–oriented adsorbent material. Biochar is a carbon-rich material produced through the pyrolysis of biomass under oxygen-limited conditions. Owing to its porous structure, high specific surface area, and abundance of reactive surface functional groups, biochar exhibits substantial capacity for the adsorption, immobilization, and toxicity mitigation of microplastics. During pyrolysis, aliphatic carbon structures are transformed into more stable aromatic carbon forms along with combustible gases (H_2, CH_4, CO), enhancing the structural stability and environmental persistence of biochar. This review adopts an analytical perspective to examine the physicochemical mechanisms underlying microplastic removal by biochar, its interactions in soil and aquatic systems, and the potential biological implications for animal ecosystems. The findings indicate that physical entrapment within micropores, electrostatic interactions, hydrophobic forces, π–π interactions, and aggregation–sedimentation processes collectively contribute to reducing microplastic mobility and environmental availability. Furthermore, biochar application in soils may indirectly reduce exposure of soil and aquatic fauna by modifying physicochemical properties, decreasing microplastic bioavailability, enhancing enzymatic activity, and reshaping microbial community structure. However, most existing evidence is derived from laboratory-scale studies, while long-term field data and direct in vivo investigations on ecological impacts in animal systems remain limited. Additional concerns include biochar aging, potential re-release of adsorbed contaminants, and challenges related to large-scale industrial implementation. Overall, biochar represents a promising strategy for mitigating microplastic-related environmental risks. Nevertheless, comprehensive field validation, long-term ecosystem-level assessments, and predictive modeling of biochar–microplastic interactions remain critical priorities for future research.

Article info

* Corresponding Author's email:
azimib@rcesd.ac.ir
safadoust@basu.ac.ir

Received: 14 November 2025
Reviewed: 15 December 2025
Revised: 14 February 2026
Accepted: 17 March 2026

[Downloaded from www.journalaer.com on 2026-11-15]

[DOI: 10.22034/aer.2.2.81]

مقاله مروری

مروری بر نقش بیوچار در کاهش تهدید میکروپلاستیک‌ها در اکوسیستم‌های خاکی و آبی با تأکید بر پیامدهای جانوری

سیده‌بهاره عظیمی[۱*]، آزاده صفادوست[۲*]، نادیا بابایی[۳]

[۱] گروه پژوهشی ارزیابی و مخاطرات محیط‌زیست، پژوهشکده محیط‌زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران

[۲] گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

[۳] سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران

کلمات کلیدی

اکوسیستم
آلوگی
بیوچار
محیط‌زیست
میکروپلاستیک

چکیده

امروزه، گسترش فزاینده و کنترل‌نشده آلودگی‌های ناشی از میکروپلاستیک‌ها (MPs) در محیط‌های آبی و خاکی به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین و فراگیرترین چالش‌های محیط‌زیستی قرن بیست و یکم به‌شمار می‌رود. این ذرات ریز، نه‌تنها منجر به تغییر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی زیست‌بوم‌ها می‌شوند، بلکه از طریق ورود به زنجیره‌های غذایی و ایجاد فرآیندهایی نظیر زیست تجمع و انتقال تغذیه‌ای، می‌توانند سلامت جانداران را در سطوح مختلف اکولوژیک تحت تأثیر قرار دهند. از جمله رویکردهای نوظهور به‌منظور کاهش این تهدید، استفاده از بیوچار به‌عنوان یک ماده‌جاذب، پایدار، کم‌هزینه و سازگار با اصول اقتصاد چرخشی مطرح شده است. بیوچار، یک ماده غنی از کربن است که از طریق فرآیند پیرولیز (تخریب ترموشیمیایی بیومس تحت شرایط غیرهوازی یا اکسیژن محدود) تولید می‌شود و به‌دلیل ساختار متخلخل، سطح ویژه بالا و حضور گروه‌های عاملی فعال سطحی، قابلیت بالایی در جذب، تثبیت و کاهش اثرات سمی میکروپلاستیک‌ها دارد. در طی فرآیند پیرولیز، کربن آلیفاتیک به کربن‌های پایدارتر آروماتیک و گازهای قابل سوختن (H_2, CH_4, CO) تبدیل می‌گردد که این امر موجب افزایش پایداری ساختاری و مقاومت بیوچار در برابر تجزیه زیستی در محیط می‌شود. در این مقاله، با رویکردی تحلیلی-مروری، سازوکارهای فیزیکی و شیمیایی حذف میکروپلاستیک‌ها توسط بیوچار، تعاملات آن در خاک و آب، و پیامدهای زیستی بالقوه بر جانوران بررسی شده است. یافته‌ها نشان می‌دهند که مکانیسم‌های جذب فیزیکی در حفرات میکرومتخلخل، برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک، آب‌گریزی، پیوندهای π–π و هم‌چنین پدیده‌های تجمع و ته‌نشینی مشترک بیوچار–میکروپلاستیک، نقش کلیدی در حذف یا کاهش تحرک MPs دارند. افزون بر این، کاربرد بیوچار در خاک می‌تواند با تعدیل ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، کاهش دسترس‌پذیری زیستی ذرات، بهبود فعالیت‌های آنزیمی و تنظیم ترکیب جامعه میکروبی، به‌طور غیرمستقیم مواجهه جانوران خاکزی و آبزی را کاهش دهد. با این حال، بخش عمده شواهد موجود مبتنی بر مطالعات آزمایشگاهی است و داده‌های میدانی بلندمدت و مطالعات تجربی انجام‌شده بر روی جانداران زنده در شرایط طبیعی یا نیمه‌طبیعی درباره پیامدهای اکولوژیک بر زیست‌بوم‌های جانوری هم‌چنان محدود و ناکافی است. هم‌چنین، عواملی نظیر هوازدگی بیوچار، احتمال آزادسازی مجدد آلاینده‌ها و ملاحظات مرتبط با مقیاس صنعتی، از چالش‌های مهم در کاربرد گسترده این فناوری به شمار می‌روند. در مجموع، بیوچار به‌عنوان یک راهکار امیدوار کننده در مدیریت و کاهش مخاطرات ناشی از میکروپلاستیک‌ها مطرح است، اما ارزیابی جامع عملکرد آن در شرایط واقعی اکوسیستم، تحلیل اثرات بلندمدت بر شبکه‌های غذایی و توسعه چارچوب‌های مدل‌سازی پیش‌بینی‌کننده، از اولویت‌های اساسی تحقیقات آینده محسوب می‌شوند.

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول:
azimib@rcesd.ac.ir
safadoust@basu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۳ آبان ۱۴۰۴
تاریخ داوری: ۲۴ آذر ۱۴۰۴
تاریخ اصلاح: ۲۵ بهمن ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۲۶ اسفند ۱۴۰۴

[Downloaded from www.journalaer.com on 2026-11-15]

[DOI: 10.22034/aer.2.2.81]

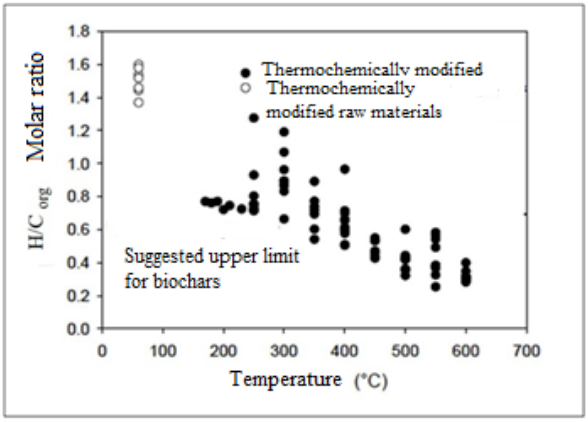
مقدمه

در دهه‌های اخیر، آلودگی میکروپلاستیک‌ها به‌عنوان یکی از تهدیدهای جهانی برای تنوع زیستی و سلامت اکوسیستم‌های طبیعی شناخته‌شده است. این ذرات که قطر آن‌ها کم‌تر از ۵ میلی‌متر است، حاصل تجزیه و فرسایش پلاستیک‌های بزرگ‌تر از طریق فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی هستند (۲۱). میکروپلاستیک‌ها به‌دلیل پایداری بالا، اندازه کوچک و توانایی در جذب سایر آلاینده‌ها مانند فلزات‌سنگین و ترکیبات‌آلی پایدار، می‌توانند وارد زنجیره‌های غذایی شده و به‌طور بالقوه بر سلامت موجودات جانوری در سطوح مختلف تغذیه‌ای اثرگذار باشند (۷، ۱۳، ۳۴). مطالعات اخیر نشان‌داده‌اند که ذرات پلاستیکی در محیط‌های آبی و خاکی به‌سرعت انباشته شده و از طریق تماس مستقیم یا غیرمستقیم می‌توانند با آسیب‌های بافتی، اختلالات متابولیکی و تغییر در رفتارهای تغذیه‌ای گونه‌های جانوری همراه باشند (۱۶، ۲۱). بنابراین، توسعه فناوری‌های کارآمد و پایدار برای حذف یا کاهش اثرات این آلاینده‌ها، ضروری است. در میان روش‌های مختلف تصفیه، بیوچار به‌عنوان ماده‌ای با ظرفیت جذب بالا، پایداری شیمیایی و منشاء زیستی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. بیوچار نه‌تنها قادر به حذف آلاینده‌ها از محیط‌های آبی است، بلکه در محیط خاک نیز می‌تواند از طریق برهم‌کنش با ذرات میکروپلاستیکی، اثرات مخرب آن‌ها را بر ساختار و عملکرد خاک کاهش دهد (۷، ۲۹، ۴۰). با این‌حال، بخش عمده شواهد موجود در این زمینه مبتنی بر مطالعات آزمایشگاهی، خاکی و گیاهی است و تعمیم مستقیم آن‌ها به پیامدهای جانوری نیازمند تحلیل دقیق‌تر مسیرهای انتقال در زنجیره غذایی و ارزیابی زیست‌تجمع می‌باشد. این ویژگی‌ها باعث شده تا بیوچار به‌عنوان یک ابزار امیدبخش برای حفاظت از زیست‌بوم‌های جانوری و بهبود کیفیت زیست‌محیطی مطرح شود. در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی درخصوص بیوچار در مقابله با آلودگی میکروپلاستیک انجام شده است. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای نشان‌داده شده است که بیوچار و ترکیبات مرتبط آن قادرند با استفاده از جذب فیزیکی، فیلتراسیون و تجمع ذرات میکروپلاستیک و نانوپلاستیک را از آب حذف کنند و این عملکرد تحت تأثیر عواملی مانندpH، دما و رقابت سایر آلاینده‌ها قرار دارد (۲۳، ۲۴). در مطالعه دیگری نیز، به‌عنوان یک بررسی جامع، بر این نکته تأکید شده است که بیوچار می‌تواند تحرک میکروپلاستیک‌ها را کاهش‌دهدو با تثبیت آن‌ها در ساختار خاک یا رسوب آن‌ها در محیط آبی، دسترس‌پذیری زیستی این ذرات را برای جانداران کاهش دهد (۱۴). افزون بر این، در تحقیقات اخیر تأیید شده است که بیوچار می‌تواند برخی اثرات منفی میکروپلاستیک‌ها بر رشد گیاهی را در شرایط آزمایشی تا حدی متعادل کند (۴۱)، با این وجود، ارتباط مستقیم این یافته‌های گیاهی با کاهش خطر برای زیست‌بوم‌های جانوری نیازمند شواهد تجربی بیش تر در سطوح مختلف تغذیه‌ای است. با توجه به این شکاف پژوهشی، هدف از این مطالعه ارائه یک مرور تحلیلی بر سازوکارهای حذف میکروپلاستیک‌ها توسط بیوچار و ارزیابی انتقادی میزان و حدود تأثیر این فرآیندها بر کاهش تهدید برای زیست‌بوم‌های جانوری است. در این راستا، ضمن تفکیک شواهد مستقیم جانوری از یافته‌های خاکی و گیاهی، تلاش شده است چارچوبی مفهومی برای درک مسیرهای احتمالی کاهش زیست‌دسترس‌پذیری و زیست‌تجمع میکروپلاستیک‌ها ارائه شود.

ویژگی‌ها، تهیه و انواع بیوچار: بیوچار محصول پیرولیز مواد آلی مانند بقایای گیاهی، ضایعات کشاورزی، لجن فاضلاب و چوب است که در دماهای بین ۳۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد در شرایط کم اکسیژن تولید می‌شود (۲۱). بسته به نوع ماده اولیه و دمای پیرولیز، بیوچارها دارای ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی متفاوتی از جمله سطح ویژه، تخلخل، گروه‌های عاملی اکسیژنی و نسبت کربن به هیدروژن هستند که این تفاوت‌ها می‌توانند نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی آن‌ها در جذب میکروپلاستیک‌ها داشته باشند (۲۸). ویژگی‌های اولیه بیوچار شامل خواص فیزیکی اندازه ذرات و رطوبت، و هم‌چنین ویژگی‌های شیمیایی نسبت‌های عنصری هیدروژن (H)، کربن (C) و نیتروژن (N)، نسبت خاکستر، رسانایی الکتریکی(EC)، pH و قابلیت آهک‌زنی است. در شکل ۱، پایداری کربن با نسبت مولی هیدروژن به کربن آلی نشان داده می‌شود. مقادیر کم‌تر این نسبت با پایداری کربن بیش‌تر در ارتباط است. نسبت مولی $H:C_{org}$ یک ویژگی است که با درجه تغییرات ترموشیمیایی وابسته به تشکیل ساختارهای حلقه‌ای آروماتیک ذوب‌شده در مواد مرتبط است. وجوداین ساختارها یکی از معیارهای اصلی برای ثبات بیوچار و دوام آن در محیط‌های طبیعی می‌باشد. با توجه به شکل ۱، عدد ۰/۷ به عنوان حد بالایی نسبت مولی $H:C_{org}$ برای تمایز بیوچار از بایومسی (Biomass) که تغییرات ترموشیمیایی نداشته یا تغییرات جزئی داشته است به‌کار می‌رود. از واژه تبدیل‌یافته ترموشیمیایی برای موادی استفاده می‌شود که نسبت $H:C_{org}$ کم‌تر از ۰/۷ دارند و سهم بیش‌تری از ساختارهای حلقه‌ای آروماتیک ذوب‌شده را شامل می‌شوند. سایر موادی که دارای نسبت $H:C_{org}$ بالاتر از ۰/۷ هستند، اگرچه دچار تغییر ترموشیمیایی شده‌اند، اما لزوماً در گروه مواد تبدیل‌یافته کامل قرار نمی‌گیرند (۱۵). افزایش دمای پیرولیز معمولاً موجب افزایش سطح ویژه و کاهش محتوای مواد فرار می‌شود که این امر می‌تواند به بهبود توان جذب بیوچار منجر گردد. به‌عنوان نمونه، بیوچار حاصل از چوب یا ضایعات گیاهی در دمای بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد توان جذب بالاتری

[Downloaded from www.journalaer.com on 2026-11-15]
[DOI: 10.22034/aer.2.2.81]

برای ذرات پلی‌استایرن (PS) و پلی‌اتیلن (PE) از خود نشان داده است (۷).



شکل۱: ارتباط بین دمای فرآیند و نسبت مولی در بیوچارها (۱۵)

Figure 1: Relationship between process temperature and molar ratio in biochars (15)

با این حال، گزارش‌ها نشان می‌دهند که این کارایی به شرایط محیطی، اندازه ذره میکروپلاستیک و ترکیب شیمیایی سطح بیوچار نیز وابسته است و یک روند یکنواخت در تمامی مطالعات مشاهده نمی‌شود. بیوچارها بسته به نوع ماده اولیه، شامل بیوچار چوبی، بیوچار کشاورزی (مانند نی، پوست برنج، پوسته بادام‌زمینی)، بیوچار دامی (مانند فضولات حیوانی) و بیوچار لجن فاضلاب هستند. بیوچارهای چوبی به‌دلیل دارا بودن ساختار پایدار آروماتیک و سطح ویژه بالا، در بسیاری از مطالعات کارایی بیش‌تری در حذف میکروپلاستیک‌ها و سایر آلاینده‌های آلی نشان داده‌اند (۲۱)، اگرچه مقایسه مستقیم میان انواع مختلف بیوچارها در شرایط آزمایشگاهی و میدانی هم‌چنان محدود است. بیوچار، به‌ویژه انواع تولیدشده از مواد لیگنوسلولزی مانند چوب و نی، در حذف میکروپلاستیک‌ها از محیط‌های آبی و خاکی از طریق ترکیب چند سازوکار عمل می‌کند. در محیط‌های آبی، سطح متخلخل، بار سطحی و گروه‌های عاملی اکسیژنی بیوچار می‌تواند موجب جذب فیزیکی و شیمیایی ذرات میکروپلاستیک از طریق نیروهای واندروالسی، برهم‌کنش‌های π–π و پیوندهای هیدروژنی شود (۷، ۳۷). این ویژگی‌ها می‌توانند غلظت ذرات معلق در ستون آب را کاهش داده و در نتیجه احتمال تماس مستقیم آن‌ها با جانداران آبزی را به‌طور بالقوه محدود کنند. در محیط‌های خاکی، بیوچار با بهبود بافت و تهویه خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی (Cation exchange capacity) و فراهم‌کردن نقاط جذب فعال، می‌تواند حرکت افقی و عمودی میکروپلاستیک‌ها را محدود کرده و از نفوذ آن‌ها به ناحیه ریشه یا آب زیرزمینی جلوگیری کند (۲۱). افزون بر این، بیوچار حاصل از منابع آلی غنی از نیتروژن (مانند فضولات دامی) ممکن است از طریق فعالیت‌های میکروبی و اکسیداسیون سطحی، موجب تغییر شیمی سطحی و تسهیل تخریب تدریجی برخی پلیمرها شود (۱۷، ۳۳). بنابراین، کاربرد بیوچار در هر دو محیط آبی و خاکی می‌تواند در کاهش بار پلاستیکی و افزایش پایداری اکوسیستم نقش داشته باشد؛ با این حال، میزان تأثیر این فرآیندها بر کاهش واقعی مواجهه و زیست تجمع در سطوح مختلف جانوری نیازمند شواهد تجربی مستقیم و مطالعات میدانی بلندمدت است.

سازوکارهای حذف میکروپلاستیک‌ها توسط بیوچار: سازوکار حذف میکروپلاستیک‌ها از محیط‌های آبی و خاکی توسط بیوچار ترکیبی از جذب فیزیکی، برهم‌کنش‌های شیمیایی، نیروهای الکترواستاتیک و تعاملات آب‌گریز و π–π است (۲۱). ساختار متخلخل بیوچار سبب می‌شود که ذرات میکروپلاستیکی در حفرات سطحی و درون‌ساختارهای میکروسکوپی آن به دام بیفتند. این مکانیسم به‌ویژه برای ذرات کوچک‌تر از ۱ میکرومتر گزارش شده است که کارایی بالاتری داشته باشد، هرچند وابستگی آن به توزیع اندازه حفرات و اندازه واقعی ذرات در مطالعات مختلف متفاوت بوده است. بیوچار به‌دلیل ویژگی‌های سطحی گسترده، ساختار متخلخل و ترکیب شیمیایی فعال، می‌تواند به شکل مؤثری میکروپلاستیک‌ها را از آب و خاک حذف کند (۲۱)، اما میزان این کارایی به شرایط محیطی و نوع پلیمر وابسته است. بر اساس مطالعات موجود چندین مسیر اصلی برای برهمکنش بین بیوچار و ذرات میکروپلاستیک شناسایی شده است:

الف) جذب سطحی (Adsorption): بیوچار با داشتن سطح بزرگ و گروه‌های عاملی قطبی یا هیدروفوبیک می‌تواند ذرات میکروپلاستیک را جذب کند. این جذب تحت تأثیر عواملی مانندpH، دما و نوع محلول قرار دارد، به‌گونه‌ای که در محیط‌های با pH خنثی تا قلیایی، نقش برهم‌کنش‌های آب‌گریز و π–π در پلیمرهای آروماتیک پررنگ‌تر گزارش شده است، درحالی‌که در شرایط اسیدی، نیروهای الکترواستاتیک می‌توانند غالب شوند (۴).

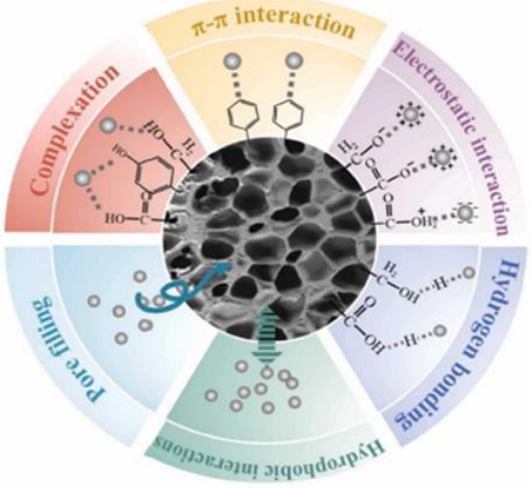
ب) فیلتراسیون مکانیکی (Filtration/Sieving): ساختار متخلخل بیوچار اجازه می‌دهد که ذرات معلق میکروپلاستیک در حفره‌ها به دام بیفتند و از جریان آب یا خاک حذف شوند، با این حال این مکانیسم عمدتاً برای ذرات بزرگ‌تر از اندازه منافذ مؤثر است و در مورد نانوپلاستیک‌ها کارایی آن ممکن است کاهش یابد (۲۴).

ج) تجمع (Flocculation): گروه‌های سطحی بیوچار می‌توانند ذرات میکروپلاستیک را به صورت تجمعی درآورند و به ذرات بزرگ‌تری تبدیل کنند که رسوب آن‌ها در محیط آسان‌تر می‌شود، اگرچه پایداری این تجمع‌ها در شرایط هیدرودینامیکی متغیر هنوز به‌طور کامل مشخص نیست (۲۴، ۳۱).

[Downloaded from www.journalaer.com on 2026-11-15]

[DOI: 10.22034/aer.2.2.81]

د) تثبیت در خاک یا رسوب در محیط آبی (/ Immobilization Sedimentation): پس از برهمکنش با بیوچار، میکروپلاستیک‌ها کم‌تر تحرک دارند و بنابراین دسترس‌پذیری زیستی آن‌ها برای موجودات کاهش می‌یابد (۱۴)، اما میزان کاهش زیست‌دسترس‌پذیری در مقیاس میدانی و در حضور سایر آلاینده‌ها نیازمند ارزیابی‌های تجربی بیش‌تر است.



شکل ۲: مکانیسم برهمکنش بیوچار و میکروپلاستیک‌ها (۲۱)
Figure 2: Mechanism of interaction between biochar and microplastics (21)

شکل ۲ مسیرهای مختلف حذف این ذرات را نشان می‌دهد. این شکل بیش‌تر مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی کنترل‌شده است و ممکن است تمامی پیچیدگی‌های محیط‌های طبیعی، از جمله حضور مواد آلی محلول، بیوفیلم‌ها و رقابت جذب میان آلاینده‌ها را منعکس نکند. علاوه بر این، مطالعات دیگر نشان می‌دهند که بیوچار می‌تواند اثرات منفی میکروپلاستیک‌ها بر رشد گیاهی را نیز کاهش دهد (۲۴، ۴۱)، هرچند ارتباط مستقیم این یافته‌ها با کاهش مواجهه جانوری نیازمند بررسی مسیرهای انتقال در زنجیره غذایی است. براساس مطالعه Hsieh و همکاران، بیوچار حاصل از چوب توانسته است پلی‌استایرن میکروپلاستیک‌ها را با راندمان نزدیک به ۱۰۰ درصد از محلول حذف کند. با این حال، این راندمان در شرایط آزمایشگاهی و غلظت‌های مشخص گزارش شده و تعمیم آن به سامانه‌های طبیعی با ماتریس پیچیده آب یا خاک باید با احتیاط انجام شود. علاوه‌بر این، گروه‌های عاملی اکسیژنی مانند COOH– و OH– در سطح بیوچار با گروه‌های قطبی روی سطح پلیمرها پیوند برقرار کرده و موجب پایداری جذب می‌شوند (۱۲). در دماهای بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، میزان آروماتیسیته بیوچار افزایش یافته و در نتیجه، برهم‌کنش‌های π–π بین حلقه‌های بنزنی بیوچار و پلیمرهای آروماتیک مانند پلی‌استایرن تقویت می‌شود (۵)، که نشان‌دهنده نقش ساختار شیمیایی بیوچار در تعیین مکانیسم غالب جذب است. از سوی دیگر، تعاملات الکترواستاتیک بین سطوح باردار بیوچار و ذرات پلاستیکی نیز نقش مهمی دارند. سطح بیوچار ممکن است بسته به pH محیط دارای بار مثبت یا منفی باشد. در pH پایین، گروه‌های عاملی سطحی پروتونه شده و جذب ذرات منفی را تسهیل می‌کنند؛ درحالی‌که در pH بالا، جذب ذرات مثبت از طریق نیروهای کولنی امکان‌پذیر است (۷). برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که بیوچار اکسیدشده یا عامل‌دارشده با گروه‌های قطبی، ظرفیت بالاتری برای جذب میکروپلاستیک‌های قطبی مانند PVC و PET دارد، که بیانگر اهمیت اصلاح سطحی در بهینه‌سازی عملکرد است. در محیط خاک، بیوچار علاوه بر جذب فیزیکی، با تغییر ساختار خاک و افزایش ظرفیت نگه‌داری آب، از تحرک و انتقال عمودی میکروپلاستیک‌ها جلوگیری می‌کند (۱۴، ۳۸). هم‌چنین حضور بیوچار در خاک باعث کاهش پتانسیل آزادسازی افزودنی‌های سمی از ذرات پلاستیکی می‌شود که این امر می‌تواند به طور غیرمستقیم بر سلامت موجودات خاکزی اثرگذار باشد، هرچند شواهد مستقیم جانوری در این زمینه محدود است. مطالعات جدید نشان داده‌اند که استفاده از بیوچار مغناطیسی یکی از رویکردهای نوین برای حذف میکروپلاستیک‌ها از محیط‌های آبی است. بیوچار مغناطیسی قادر است ذرات تازه و کهنه را از آب حذف کند و سازوکار حذف شامل ترکیبی از جذب فیزیکی درون‌حفره‌ای و جمع‌آوری مغناطیسی ذرات است که راندمان حذف را تا بیش از ۹۰ درصد افزایش می‌دهد (۳۵). با این حال، پایداری طولانی‌مدت ذرات مغناطیسی و احتمال آزادسازی آن‌ها به محیط نیازمند ارزیابی ریسک زیست محیطی است. هم‌چنین مطالعات نشان می‌دهند که اصلاح سطحی بیوچار با سورفکتانت‌های کاتیونی مانند CTAB موجب افزایش جذب نانوپلاستیک‌ها می‌شود (۳۳)، اما کاربرد این اصلاحات در مقیاس صنعتی باید با درنظرگرفتن هزینه، پایداری و امکان بازیافت بررسی شود. به‌طور کلی، اگرچه سازوکارهای متعددی برای حذف میکروپلاستیک‌ها توسط بیوچار پیشنهاد شده است، اما تعیین مکانیسم غالب به ویژگی‌های بیوچار (منشأ، دمای پیرولیز، اصلاح سطحی)، نوع پلیمر، اندازه ذره و شرایط محیطی وابسته است. نبود مطالعات مقایسه‌ای در مقیاس میدانی و در شرایط چندآلاینده‌ای یکی از شکاف‌های اصلی پژوهشی در این حوزه محسوب می‌شود.

اثرات بیوچار بر کاهش تهدید میکروپلاستیک‌ها برای زیست‌بوم‌های جانوری: براساس مطالعات متعدد، گزارش شده است که بیوچار می‌تواند در برخی شرایط اثرات سمی میکروپلاستیک‌ها را برای جانداران خاکزی و آبزی کاهش دهد (۷). بیوچار از طریق چندین

[Downloaded from www.journalaer.com on 2026-11-15]
[DOI: 10.22034/aer.2.2.81]

سازوکار هم‌زمان ممکن است به کاهش اثرات سمی میکروپلاستیک‌ها بر جانداران خاکزی و آبزی کمک کند. نخست، سطح بسیار متخلخل و دارای گروه‌های عاملی اکسیژنی بیوچار موجب می‌شود که میکروپلاستیک‌ها و ترکیبات سمی جذب‌شده بر سطح آن‌ها (مانند فتالات‌ها و پلی‌هیدروکربن‌های آروماتیک) به سطح بیوچار متصل شوند و دسترس‌پذیری زیستی (Bioavailability) آن‌ها برای موجودات زنده کاهش یابد (۷). با این حال، بخش عمده این شواهد مبتنی بر آزمایش‌های کنترل‌شده آزمایشگاهی است و میزان کاهش واقعی مواجهه جانوری در شرایط میدانی هنوز به‌طور کامل روشن نیست. دوم، بیوچار با بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و آب- از جمله افزایش pH، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و پایداری کربن- می‌تواند محیطی پایدارتر ایجاد کند که به‌صورت غیرمستقیم از نفوذ و جذب ذرات پلاستیکی توسط ریشه‌ها یا بافت‌های جانوری جلوگیری کند (۲۱). این اثر بیش‌تر در مطالعات خاکی و گیاهی گزارش شده و تعمیم آن به سطوح بالاتر تغذیه‌ای نیازمند بررسی مسیرهای انتقال در زنجیره غذایی است. علاوه بر این، در زیست‌بوم‌های خاکزی، بیوچار با فراهم‌کردن زیستگاه‌های مناسب برای میکروارگانیسم‌ها، رشد جوامع میکروبی تجزیه‌کننده ترکیبات آلی را افزایش می‌دهد و در نتیجه، اکسیداسیون سطحی و تخریب تدریجی میکروپلاستیک‌ها را تسریع می‌کند (۱۸)، با وجود این، شواهد مربوط به تخریب کامل پلیمرها در مقیاس زمانی کوتاه محدود بوده و اغلب به تغییرات سطحی یا اکسیداسیون جزئی اشاره دارند. در محیط‌های آبی نیز، بیوچار معلق می‌تواند ذرات پلاستیکی را به‌خود جذب کرده و مانع از تماس مستقیم آن‌ها با جانداران شناور یا کف‌زی شود. این فرآیندها در مجموع ممکن است به کاهش شدت مواجهه و برخی شاخص‌های استرس اکسیداتیو کمک کنند و در نهایت به کاهش تجمع زیستی (Bioaccumulation) در سطوح بالاتر زنجیره غذایی منجر شوند، هرچند داده‌های مستقیم درخصوص کاهش تجمع زیستی در شرایط طبیعی هم‌چنان محدود است. به‌طورکلی، اگرچه سازوکارهای پیشنهادی نشان‌دهنده ظرفیت بالقوه بیوچار در کاهش پیامدهای زیستی میکروپلاستیک‌ها هستند، اما تمایز میان شواهد مستقیم جانوری و استنتاج‌های مبتنی بر داده‌های خاکی یا گیاهی برای ارزیابی دقیق اثرات اکولوژیکی ضروری است.

الف) بهبود شرایط فیزیکوشیمیایی خاک: اهمیت بیوچار به دلایل زیادی ازجمله ساخته‌شدن آن از پسماندها، به‌ویژه پسماندهای گیاهی و مواد ارزان‌قیمت، مورد توجه قرار گرفته است؛ زیرا می‌تواند باعث بهبود کیفیت خاک، افزایش عملکرد محصول، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، کاهش جذب مواد سمی توسط خاک و بهبود ساختمان خاک شود (۱۰). از طرفی افزودن بیوچار به خاک‌های آلوده به میکروپلاستیک گزارش شده است که می‌تواند باعث بهبود pH، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و کاهش تجمع ترکیبات آلی سمی در ریزمحیط‌های خاک شود. در پژوهش انجام‌شده توسط Khalid و همکاران، کاربرد بیوچار حاصل از ساقه پنبه موجب افزایش وزن خشک گیاهان و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از PVC در ریشه شده است (۱۸). با این حال، این نتایج در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی به‌دست‌آمده و تعمیم آن به شرایط مزرعه‌ای نیازمند مطالعات میدانی بیش‌تر است. این یافته نشان می‌دهد که بیوچار می‌تواند به‌عنوان یک عامل کاهنده شدت تنش پلاستیکی در سطح گیاهی مطرح باشد، هر چند میزان پایداری این اثر در بلندمدت هنوز مشخص نیست. اصطلاح تنش پلاستیکی به مجموعه‌ای از تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی اشاره دارد که در اثر تماس گیاهان با ذرات ریز پلاستیکی ایجاد می‌شود. این ذرات می‌توانند از طریق خاک یا آب به سطح ریشه نفوذ کرده و موجب اختلال در جذب آب و مواد غذایی، آسیب غشای سلولی، افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و در نتیجه استرس اکسیداتیو شوند (۲۱). مطالعات نشان داده‌اند که وجود میکروپلاستیک‌ها در خاک باعث کاهش فتوسنتز، تضعیف سیستم آنتی‌اکسیدانی و تغییر بیان ژن‌های مرتبط با دفاع گیاهی می‌شود (۲۷). از سوی دیگر، برخی ترکیبات افزوده‌شده به پلاستیک‌ها مانند فتالات‌ها و استایرن‌ها می‌توانند به‌صورت تدریجی آزاد شده و به‌عنوان ترکیبات شبه‌هورمونی عمل کنند و رشد گیاه را مختل نمایند (۳). در چنین شرایطی، افزودن بیوچار به خاک ممکن است از طریق کاهش دسترس‌پذیری زیستی ذرات و افزودنی‌های پلاستیکی، میزان جذب آن‌ها به سطح ریشه را کاهش دهد و از شدت تنش پلاستیکی بکاهد. با این وجود، ارتباط مستقیم میان کاهش تنش گیاهی و کاهش انتقال میکروپلاستیک‌ها به سطوح بالاتر زنجیره غذایی هنوز به‌طور کامل تبیین نشده است و نیازمند بررسی‌های اکولوژیکی جامع‌تر می‌باشد.

ب) اثرات بر جامعه میکروبی خاک: میکروپلاستیک‌ها به‌طور معمول گزارش شده‌اند که می‌توانند باعث کاهش تنوع و تراکم میکروارگانیسم‌های خاک شوند؛ اما بیوچار با فراهم آوردن سطح زیستگاهی و منبع کربنی پایدار، ممکن است فعالیت آنزیم‌های خاک را افزایش دهد و ترکیب جمعیت میکروبی را به‌سوی گونه‌های مقاوم‌تر تغییر دهد (۹). با این حال، شدت و جهت این تغییرات به ویژگی‌های خاک، نوع و غلظت میکروپلاستیک و مقدار بیوچار وابسته است. چنین تغییراتی می‌تواند برخی فرآیندهای تجزیه ترکیبات آلی و چرخه نیتروژن را تعدیل کند که نهایتاً به‌طور بالقوه به پایداری بیش‌تر اکوسیستم منجر می‌شود، اگرچه شواهد میدانی بلندمدت برای تأیید این پیامدها هنوز محدود است. در طی فرآیند تبدیل بایومس به بیوچار در شرایط حرارتی، کربن در حدود ۱۰۰، نیتروژن بالاتر از ۲۰۰، گوگرد بالاتر از ۳۷۵ و پتاسیم و فسفر بین ۷۰۰ و

[Downloaded from www.journalaer.com on 2026-11-15]

[DOI: 10.22034/aer.2.2.81]

۸۰۰ درجه سانتی‌گراد شروع به تصاعد می‌کنند (۲۵، ۳۹). نیتروژن بیش از سایر عناصر پرمصرف به حرارت حساس است و با افزایش درجه حرارت در طی فرآیند گرماکافت، نیتروژن سریع‌تر از سایر عناصر از زیست‌توده خارج می‌شود. بنابراین، محتوای نیتروژن بیوچار تولیدشده در دمای بالا معمولاً کاهش می‌یابد که این امر می‌تواند بر نقش تغذیه‌ای و زیست‌محیطی آن در خاک اثرگذار باشد. به‌طورکلی با افزایش دمای گرماکافت، غلظت قابل‌استخراج NH^{4+} و PO_4^{3-} از بیوچار کاهش می‌یابد و در دماهای بالاتر، بخشی از NH^{4+} به مقدار محدودی NO^{3-} قابل تبادل اکسید می‌شود (۶). این تغییرات شیمیایی ممکن است بر دسترس‌پذیری عناصر غذایی برای گیاهان و میکروارگانیسم‌ها تأثیر گذاشته و به‌صورت غیرمستقیم پیامدهایی برای شبکه‌های غذایی خاک ایجاد کند، هرچند این ارتباط نیازمند شواهد تجربی مستقیم است. بیوچار، بسته به ماهیت مواد اولیه، ممکن است حاوی برخی عناصر کم‌مصرف نظیر مس، روی و آهن باشد که با افزودن بیوچار به خاک، این عناصر غذایی به محیط خاک اضافه می‌شوند (۱۱، ۲۰). با این وجود، ارزیابی هم‌زمان احتمال تجمع عناصر بالقوه سمی و تغییر در تعادل ریزمغذی‌ها برای پیش‌بینی اثرات اکولوژیکی ضروری است.

ج) کاهش اثرات زیستی بر جانوران: میکروپلاستیک‌ها از طریق زنجیره غذایی به بدن جانوران رسیده و گزارش شده‌اند که می‌توانند موجب انسداد دستگاه گوارش، التهاب بافتی و استرس اکسیداتیو شوند. بیوچار با کاهش تحرک و دسترسی‌زیستی ذرات پلاستیکی در محیط، ممکن است احتمال انتقال آن‌ها به بدن جانوران را کاهش دهد، هرچند میزان این کاهش به شرایط محیطی و ساختار شبکه غذایی وابسته است. به‌ویژه در محیط‌های آبی، بیوچار معلق می‌تواند ذرات پلاستیکی را به خود جذب کرده و از ورود مستقیم آن‌ها به بدن فیتوپلانکتون‌ها و بی‌مهرگان جلوگیری کند (۷، ۸). این فرآیند، در نهایت می‌تواند به کاهش مواجهه در سطوح بالاتر تغذیه‌ای منجر شود، اگرچه شواهد مستقیم درباره کاهش زیست‌بزرگ‌شدن در مقیاس اکوسیستمی هنوز محدود است. در محیط‌های آبی، بیوچار معلق می‌تواند ذرات پلاستیکی را به خود جذب کند و از تماس مستقیم این ذرات با فیتوپلانکتون‌ها و بی‌مهرگان جلوگیری نماید. این اثر از چند مسیر احتمالی توضیح داده شده است: اول، جذب سطحی و فروماندن ذرات روی سطح بیوچار سبب افزایش اندازه مؤثر ذرات معلق و تسریع ته‌نشینی آن‌ها می‌شود؛ در نتیجه ذرات از ستون آب دور می‌مانند و شانس بلعیده شدن توسط پلانکتون‌ها و بی‌مهرگان کاهش می‌یابد. دوم، بیوچار می‌تواند به‌عنوان مخزنی برای آلاینده‌های همراه با میکروپلاستیک (مثلاً PAHs یا فلزات) عمل کند، بنابراین حتی اگر ذره‌ای در تماس با جاندار قرار گیرد، بار شیمیایی زیان‌آور آن ممکن است کاهش یابد و دسترس‌پذیری زیستی آن کم‌تر شود. سوم، هنگامی که بیوچار-ذره ته‌نشین شود، احتمال ورود آن به مسیرهای تغذیه‌ای آب‌ستیز (مثلاً فیتوپلانکتون ← گرازبایوت ← ماهی) می‌تواند کاهش یابد، هرچند پویایی رسوبات و بازتعلیق ذرات در شرایط طبیعی باید مدنظر قرار گیرد .شواهد تجربی و مرورهای اخیر نشان می‌دهند که ترکیب جذب فیزیکی، فیلتراسیون و ایجاد تجمع توسط بیوچار، به‌ویژه انواع اصلاح‌شده یا مغناطیسی، می‌تواند حذف موثر میکروپلاستیک‌ها از آب را تسریع کند و در مقیاس آزمایشگاهی و نیمه‌میدانی کاهش بار ذرات معلق کوچک را نشان داده است (۷، ۲۴). در محیط‌های آبی، کاربرد بیوچار گزارش شده است که می‌تواند ورود مستقیم ذرات میکروپلاستیک به بدن فیتوپلانکتون‌ها و بی‌مهرگان را کاهش دهد. به‌عنوان مثال، پژوهش‌ها نشان می‌دهند که بیوچار با جذب اولیه ذرات معلق و کاهش دسترسی آن‌ها به جانداران آبزی، می‌تواند مسیر انتقال آن‌ها در زنجیره غذایی را تعدیل کند (۷). افزون بر این، پژوهشی نشان داده است که به‌کارگیری بیوچار در سیستم‌های آبی، در شرایط میدانی منجر به کاهش نشانگرهای تجمع زیستی میکروپلاستیک‌ها در گونه‌های ماهی تجاری شده است (۳۰). با این حال، تعمیم این یافته‌ها به سایر گونه‌ها و اکوسیستم‌ها نیازمند داده‌های مقایسه‌ای گسترده‌تر است. هم‌چنین، این فرآیند می‌تواند به کاهش انتقال آلاینده‌های جذب‌شده توسط میکروپلاستیک‌ها- مانند ترکیبات آلی پایدار یا فلزات سنگین- کمک کند، چرا که با کاهش تعداد ذرات معلق، فرصت برهم‌کنش میکروپلاستیک‌ها با این آلاینده‌ها و سپس انتقال به جانداران کاهش می‌یابد. بنابراین، بیوچار نه‌تنها به حذف مستقیم ذرات پلاستیکی کمک می‌کند، بلکه با کاهش دسترس پذیری زیستی آن‌ها، می‌تواند احتمال و شدت تجمع زیستی را در جانداران کاهش دهد؛ با این حال، شواهد تجربی کافی و قطعی درباره تأثیر آن بر تشدید غلظت آلاینده در سطوح تغذیه‌ای بالاتر هم‌چنان محدود و نیازمند بررسی‌های بیش‌تر است. هم‌چنین براساس پژوهش‌های انجام‌گرفته با تمرکز بر رواناب‌های کشاورزی، نشان داده شده است که ستون‌های پرشده با بیوچار قادرند بین ۸۶ تا ۹۳ درصد از میکروپلاستیک‌های موجود در جریان‌های سطحی را حذف کنند (۲۶). این عملکرد بالا در شرایط واقعی مزرعه و تحت چرخه‌های تر و خشک مکرر نیز حفظ شده است. با وجود این، ارزیابی مستقیم اثر این کاهش بر جمعیت‌های جانوری پایین‌دست نیازمند پایش اکولوژیکی بلندمدت است. یافته‌ها بیانگر آن است که کاربرد بیوچار در مناطق کشاورزی نه‌تنها کیفیت آب خروجی را بهبود می‌دهد بلکه می‌تواند احتمال ورود ذرات پلاستیکی به زیست‌بوم‌های جانوری پایین‌دست را کاهش دهد.

[Downloaded from www.journalaer.com on 2026-11-15]
[DOI: 10.22034/aer.2.2.81]

د) کاربرد بیوچار در حذف میکروپلاستیک‌ها از محیط‌های آبی: با توجه به این‌که استفاده از بیوچار به‌عنوان یک جاذب پایدار برای حذف میکروپلاستیک‌ها (MPs) از محیط‌های آبی توجه زیادی را جلب کرده است، مطالعات نشان داده‌اند که بیوچار می‌تواند در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی و نیمه‌میدانی به‌طور موثری MPs را از سیستم‌های آبی حذف کند و به‌عنوان یک ماده جاذب برای برخی آلاینده‌های نوظهور عمل کند (۷). با این حال، میزان کارایی آن به ویژگی‌های بیوچار (منشأ زیست‌توده، دمای پیرولیز، اصلاح سطحی)، نوع پلیمر و شرایط شیمیایی آب وابسته است. همان‌طورکه گفته شد این ماده کربن‌دار و متخلخل که از پیرولیز زیست‌توده تولید می‌شود، ظرفیت بالایی برای جذب آلاینده‌ها داردو می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مکمل در مدیریت آلودگی آب مطرح باشد، هرچند جایگزین کامل روش‌های تصفیه متداول محسوب نمی‌شود (۵، ۱۷). در بررسی دیگری نیز مشخص شده که بیوچار می‌تواند به‌عنوان یک جاذب در محیط‌های آبی برای حذف MPs و هم‌چنین به‌عنوان یک ماده اصلاحی برای MPsدر خاک‌ها عمل نموده و اثرات منفی MPs را بر ویژگی‌های خاک، فعالیت‌های آنزیمی و جامعه میکروبی خاک کاهش دهد (۹، ۲۲). این مطالعات نشان داده که بیوچار تولیدشده از چوب دارای بالاترین بازدهی در جذب MPs است، اگرچه این برتری ممکن است به سطح ویژه بالاتر و آروماتیسیته بیش‌تر آن مرتبط باشد و لزوماً برای همه انواع میکروپلاستیک‌ها یا شرایط محیطی صدق نکند. به‌طور کلی، استفاده از بیوچار در حذف میکروپلاستیک‌ها از محیط‌های آبی به‌عنوان یک رویکرد امیدوارکننده و نسبتاً پایدار مطرح شده است، اما ارزیابی عملکرد آن در مقیاس میدانی، در حضور چندآلاینده‌ای و تحت نوسانات هیدرودینامیکی طبیعی، برای تعیین کارایی واقعی و پیامدهای اکولوژیکی آن ضروری است.

چالش‌ها و محدودیت‌های استفاده از بیوچار: مطالعات اخیر رویکردی مهندسی برای استفاده از بیوچار در سیستم‌های جریان پیوسته (ستون ثابت) را بررسی کرده‌اند که براساس نتایج آن‌ها، در طراحی ستون‌های پرشده با بیوچار (به‌ویژه بیوچار حاصل از پوست موز)، در شرایط آزمایشگاهی بهینه می‌توان با تنظیم پارامترهایی مانند سرعت جریان و ارتفاع بستر، به راندمان حذف بیش از ۹۰ درصد برای میکروپلاستیک‌های پلی‌استایرن دست یافت. با این‌حال، این راندمان به ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آب ورودی، اندازه ذرات و زمان تماس وابسته‌است. این نوع سیستم‌ها به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای به‌کارگیری در مراحل پیشرفته تصفیه فاضلاب شهری و صنعتی پیشنهاد شده‌اند (۲، ۸، ۳۶)، اگرچه ارزیابی عملکرد آن‌ها در مقیاس واقعی و تحت شرایط بارگذاری متغیر هم‌چنان ضروری است. اگرچه بیوچار به‌عنوان روشی موثر برای کاهش اثرات میکروپلاستیک‌ها شناخته شده است، اما چالش‌هایی نیز وجوددارد که باید مورد توجه قرار گیرند:

الف) پایداری بلندمدت: بیوچار در محیط طبیعی ممکن است در اثر فرآیندهای هوازدگی و اکسیداسیون دچار تغییرات ساختاری و شیمیایی شود که توان جذب آن را در طول زمان کاهش می‌دهد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که کهنگی سطح بیوچار می‌تواند منجر به کاهش گروه‌های فعال و افت بازده حذف شود (۴، ۲۱). این موضوع به‌ویژه در کاربردهای محیطی بلندمدت، نیازمند پایش دوره‌ای و ارزیابی چرخه عمر ماده است.

ب) خطرات ثانویه: برخی بیوچارها که از مواد اولیه آلوده مانند لجن فاضلاب یا زباله شهری تولید می‌شوند، ممکن است خود حاوی فلزات سنگین یا ترکیبات آلی سمی باشند که در صورت ورود به محیط‌زیست می‌توانند آلودگی ثانویه ایجادکنند (۲۱، ۳۲). بنابراین، انتخاب ماده اولیه و کنترل کیفیت محصول نهایی برای کاهش ریسک‌های اکولوژیکی اهمیت اساسی دارد.

ج) تجمیع و آزادسازی مجدد آلاینده‌ها: ذرات میکروپلاستیکی جذب‌شده بر سطح بیوچار ممکن است در طول زمان در محیط باقی مانده و در اثر تغییر شرایط محیطی (مانند تغییرpH، شوری یا آشفتگی فیزیکی)، دوباره آزاد شوند. این فرایند می‌تواند منجر به بازآلودگی ثانویه و کاهش پایداری عملکردبیوچار در مقیاس بلندمدت شود (۱، ۷، ۲۱)؛ درنتیجه، پایداری پیوند بین بیوچار و ذرات جذب شده یکی از موضوعات کلیدی برای تحقیقات آینده محسوب می‌شود.

د) هزینه و مقیاس صنعتی: تولید انبوه بیوچار با کیفیت بالا نیازمند تجهیزات تخصصی و مصرف انرژی قابل‌توجه است. علاوه بر این، فرآیندهای اصلاح سطحی مانند مغناطیسی یا عامل‌دار کردن بیوچار هزینه‌های اضافی ایجاد می‌کنند. با این حال، مطالعات اخیر به توسعه بیوچارهای اقتصادی‌تر، قابل بازیافت و با قابلیت احیا اشاره کرده‌اند (۷، ۳۳). ارزیابی جامع هزینه- فایده و تحلیل چرخه عمر برای تعیین امکان‌پذیری صنعتی این فناوری ضروری است.

مسیرهای آینده پژوهش: پژوهش‌های آینده می‌توانند بر بهینه‌سازی بیوچارهای اصلاح‌شده (مانند بیوچار مغناطیسی، عامل‌دار با نانوذرات فلزی یا گروه‌های عاملی اکسیژنی) متمرکز شوند تا کارایی جذب در شرایط واقعی افزایش یابد. هم‌چنین، بررسی اثرات طولانی‌مدت بیوچار بر زنجیره‌های غذایی جانوری، چرخه مواد مغذی و تبادلات گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه در مقیاس اکوسیستمی و تحت شرایط میدانی ضروری است. به‌طور خاص، کمبود داده‌های مستقیم درباره انتقال، زیست‌تجمع و زیست‌بزرگ‌شدن در حضور هم‌زمان بیوچار و میکروپلاستیک‌ها، یکی از شکاف‌های اصلی پژوهشی محسوب

[Downloaded from www.journalaer.com on 2026-11-15]

[DOI: 10.22034/aer.2.2.81]

می‌شود .به‌کارگیری مدل‌های زیست‌محیطی برای شبیه‌سازی رفتار ترکیبی بیوچار و میکروپلاستیک در اکوسیستم‌ها می‌تواند درک جامع‌تری از پویایی این برهم‌کنش‌ها در شرایط چندآلاینده‌ای و متغیر طبیعی فراهم آورد (۳۸). یک مرور تحلیلی نشان داده است که رفتار واقعی بیوچار و میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های طبیعی تحت‌تأثیر عواملی مانند هوازدگی، تشکیل بیوفیلم‌های میکروبی و تغییرات گروه‌های عاملی سطحی است. این عوامل می‌توانند کارایی جذب را به‌مراتب کم‌تر یا متفاوت از نتایج آزمایشگاهی کنند (۵، ۱۹). از این‌رو، اتکای صرف به‌داده‌های آزمایشگاهی ممکن است منجر به برآورد بیش‌ازحد کارایی بیوچار در شرایط طبیعی شود. درنهایت، ضرورت مطالعات میدانی بلندمدت، پایش اکولوژیکی و مدل‌سازی رفتار ترکیبی بیوچار-میکروپلاستیک در اکوسیستم‌های آبی و خاکی برای ارزیابی دقیق پیامدهای زیست‌محیطی و جانوری این فناوری مورد تأکید قرار می‌گیرد.

نتیجه‌گیری: بیوچار، به‌عنوان یک جاذب زیستی و پایدار، به عنوان یک گزینه امیدوارکننده ظرفیت قابل توجهی برای کاهش آلودگی میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی و خاکی نشان داده است. سازوکارهای جذب متنوع آن شامل تعاملات فیزیکی، شیمیایی و الکترواستاتیکی است که در مجموع می‌توانند به کاهش غلظت و تحرک ذرات پلاستیکی در شرایط آزمایشگاهی و نیمه‌میدانی منجر شوند. علاوه بر این، بیوچار با بهبود برخی شاخص‌های کیفیت خاک، افزایش فعالیت میکروبی و کاهش دسترس‌پذیری زیستی آلاینده‌ها، ممکن است به‌طور غیرمستقیم شدت مواجهه زیستی را کاهش دهد؛ با این‌حال، شواهد مستقیم درباره کاهش زیست‌تجمع و زیست‌بزرگ شدن در زیست‌بوم‌های جانوری هنوز محدود بوده و عمدتاً مبتنی بر مطالعات کنترل‌شده است. در مجموع، اگرچه بیوچار ظرفیت بالقوه‌ای در مدیریت آلودگی میکروپلاستیک‌ها دارد، کارایی واقعی آن در مقیاس اکوسیستمی به ویژگی‌های محیطی، نوع بیوچار و پویایی شبکه‌های غذایی وابسته است. بنابراین، ارزیابی جامع اثرات بلندمدت، انجام مطالعات میدانی مقایسه‌ای و توسعه بیوچارهای اصلاح‌شده با رویکرد ارزیابی چرخه‌عمر، گام‌های اساسی برای کاربرد ایمن، پایدار و مبتنی بر شواهد این فناوری محسوب می‌شوند.

منابع

1. **Ahmad, T., Gul, S., Mehmood, T., Zinck, P., Liu, F., van Hullebusch, E.D., Luo, Y., Lu, H. and Licheng, P., 2025.** Efficient removal of polystyrene microplastics using a novel clay-biochar composite: An insight into effect of pH, DOM and interfering ions. *Separation and Purification Technology*. 136660. doi: 10.1016/j.seppur.2025.136660

2. **Anuwa-Amarh, N.A., Dizbay-Onat, M., Venkitesh waran, K. and Wu, S., 2024.** Carbon-based adsorbents for microplastic removal from wastewater. *Materials.* 17(22): 5428. doi: 10.3390/ma17225428

3. **Boots, B., Russell, C.W. and Green, D.S., 2019.** Effects of microplastics in soil ecosystems: Above and below ground. *Environmental Science & Technology*. 53(19): 11496-11506. doi: 10.1021/acs.est.9b03304

4. **Cairns, S., 2024.** Interactions between biochar and nano(micro)plastics in water: Mechanisms, aging, and biofilm effects. *Environmental Chemistry Letters.* doi: 10.1007/s41742-024-00635-0

5. **Celletti, S., Poreba, L., Wawer, R., Padoan, E., Comis, S., Bartosiewicz, B. and Schiavon, M., 2025.** The potential of nature-based solutions for urban soils: focus on green infrastructure and bioremediation. *Frontiers in Environmental Science*. 13:1634662. doi: 10.3389/fenvs.2025.1634662

6. **DeLuca, T.H., MacKenzie, M.D. and Gundale, M.J., 2006.** Biochar effects on soil nutrient transformations. *Soil Biology and Biochemistry*. 38(6): 1385-1393. doi: 10.4324/9781003297673-16

7. **Dong, M., He, L., Jiang, M., Zhu, Y., Wang, J., Gustave, W., Wang, S., Deng, Y., Zhang, X. and Wang, Z., 2023.** Biochar for the removal of emerging pollutants from aquatic systems: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 20(3): 1679. doi: 10.3390/ijerph20031679

8. **Dong, M., Jiang, M., He, L., Zhang, Z., Gustave, W., Vithanage, M., Niazi, N.K., Chen, B., Zhang, X., Wang, H. and He, F., 2025.** Challenges in safe environmental applications of biochar: Identifying risks and unintended consequence. *Biochar*. 7(1):12. doi: 10.1007/s42773-024-00412-4

9. **Duan, X., Chen, X., Shi, L., Cao, Y., Liang, Y., Huang, C. and Cao, Y., 2025.** Functionality-dependent removal efficiency and mechanisms of polystyrene microplastics by a robust magnetic biochar. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 13(2):115509. doi: 10.1016/j.jece.2025.115509

10. **Guo, M., Li, C. and Liu, C., 2020.** Biochar improves soil fertility and microbial activity in degraded lands: A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 295: 106891. doi:10.1007/s13593-016-0372-z

11. **He, M., Xu, Z., Hou, D., Gao, B., Cao, X., Ok, Y.S., Rinklebe, J., Bolan, N.S. and Tsang, D.C., 2022.** Waste-derived biochar for water pollution control and sustainable development. *Nature Reviews Earth & Environment*. 3(7): 444-460. doi: 10.1038/s43017-022-00306-8

12. **Hsieh, L., He, L., Zhang, M., Lv, W., Yang, K. and Tong, M., 2022.** Addition of biochar as thin preamble layer into sand filtration columns could improve the microplastics removal from water. *Water Research.* 221: 118783. doi: 10.1016/j.watres.2022.118783

[Downloaded from www.journalaer.com on 2026-11-15]

[DOI: 10.22034/aer.2.2.81]

Environmental Chemical Engineering. 13(5): 117503. doi: 10.1016/j.jece.2025.117503

24. **Mota, L.S.O., de Oliveira, P.C.O., Peixoto, B.S., Bezerra, E.S. and de Moraes, M.C., 2025.** Biochar applications in microplastic and nanoplastic removal: Mechanisms and integrated approaches. Environmental Science*: Water Research & Technology*. 11(2): 222-241. doi: 10.1039/D4EW00709C

25. **Neary, D.G., Klopatek, C.C., DeBano, L.F. and Ffolliott, P.F., 1999.** Fire effects on belowground sustainability: A review and synthesis. *Forest Ecology and Management*. 122(1-2): 51-71. doi: 10.1016/S0378-1127(99)00032-8

26. **Olubusoye, B.S., Cizdziel, J.V., Wontor, K., Heinen, E., Grandberry, T., Bennett, E.R. and Moore, M.T., 2024.** Removal of microplastics from agricultural runoff using biochar: a column feasibility study. *Frontiers in Environmental Science*. 12: 1388606. doi: 10.3389/fenvs.2024.1388606

27. **Qi, Y., Yang, X., Pelaez, A.M., Huerta Lwanga, E., Beriot, N., Gertsen, H., Garbeva, P. and Geissen, V., 2020.** Effects of plastic mulch film residues on wheat growth and soil properties. *Science of the Total Environment*. 715: 136771. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121711

28. **Roy, R., Hossain, A., Sultana, S., Deb, B., Ahmod, M.M. and Sarker, T., 2024.** Microplastics increase cadmium absorption and impair nutrient uptake and growth in red amaranth (*Amaranthus tricolor* L.) in the presence of cadmium and biochar. *BMC plant biology*. 24(1): 608. doi:10.1186/s12870-024-05312-0

29. **Ruan, Y., Xiang, Z., Yang, Z., Yang, Z., Zhang, M., Wong, M.H., Shan, S. and Liu, W., 2026.** Linking bacterial community shifts to biochar-induced improvements in soil fertility and multifunctionality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 399: 110142. doi: 10.3390/horticulturae12010119

30. **Santhakumar, B. and Gomez, A., 2025.** Assessing the bioaccumulation of microplastics in commercially important fish species. *International Journal of Aquatic Research and Environmental Studies.* 5(1): 622-637. doi: 10.70102/IJARES/V5I1/5-1-57

31. **Sarfraz, U., Qian, Y., Yu, Q., Cao, Y., Jiang, X., Mahreen, N., Tao, R., Ma, Q., Zhu, M., Ding, J. and Li, C., 2025.** Microplastic effects on soil nitrogen storage, nitrogen emissions, and ammonia volatilization in relation to soil health and crop productivity: mechanism and future consideration. *Frontiers in Plant Science.* 16: 1621542. doi: 10.3389/fpls.2025.1621542

32. **Selim, M.M., Tounsi, A., Gomaa, H. and Shenashen, M., 2025.** Biochar-based adsorption technologies for microplastic remediation in aquatic ecosystems. *AIP Advances.* 15(3). doi: 10.1063/5.0258086

33. **Shi, Y., Du, J., Zhao, T., Feng, B., Bian, H., Shan, S., Meng, J., Christie, P., Wong, M.H. and Zhang, J., 2023.** Removal of nanoplastics from aqueous solution by aggregation using reusable magnetic biochar modified

13. **Hussain, M., Sarfraz, W., Chen, C., Shabir, R., Abbas, G. and Rashti, M.R., 2026.** From waste to resource: unveiling the unknown nexus between compost, microplastics, and agroecosystem. *Journal of Hazardous Materials Advances*. 101033. doi: 10.1016/j.hazadv.2026.101033

14. **Ihenetu, S.C., Khan, Z.H., Mo, Y., Kubwimana, J.J. and Li, G., 2025.** Biochar as a potential tool for addressing microplastic pollution: A review. *International Journal of Environmental Research*. 19(1): 105-119. doi: 10.1007/s41742-025-00772-0

15. **International Biochar Initiative (IBI). 2023.** Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil (Version 3.1). International Biochar Initiative, Westerville, Ohio, USA.

16. **Jazaei, F., Chy, T.J. and Salehi, M., 2022.** Can microplastic pollution change soil-water dynamics? Results from controlled laboratory experiments. *Water*. 14(21): 3430. doi: 10.3390/w14213430

17. **Ji, G., Xing, Y. and You, T., 2024.** Biochar as adsorbents for environmental microplastics and nanoplastics removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 12(5): 113377. doi: 10.1016/j.jece.2024.113377

18. **Khalid, S., Hussain, S., Khan, M.H. and Huang, D., 2022.** Biochar mitigates microplastic-induced stress in soil ecosystems. *Environmental Research*. 212: 113276. doi: 10.3390/su16229749

19. **Kumar, P., Kumar, A., Kumar, D., Prajapati, K.B., Mahajan, A.K., Pant, D., Yadav, A., Giri, A., Manda, S., Bhandari, S. and Panjla, R., 2025.** Microplastics influencing aquatic environment and human health: A review of source, determination, distribution, removal, degradation, management strategy and future perspective. *Journal of Environmental Management*. 375: 124249. doi: 10.1016/j.jenvman.2025.124249

20. **Lehmann, J., Gaunt, J. and Rondon, M., 2006.** Biochar sequestration in terrestrial ecosystems – A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change.* 11(2): 403-427. doi: 10.1007/s11027-005-9006-5

21. **Li, W., Xing, Y., Guo, Y., Zhang, D., Tang, Y., Chen, J., Zhang, H. and Jiang, B., 2024.** The removal and mitigation effects of biochar on microplastics in water and soils: Application and mechanism analysis. *Sustainability*. 16(22): 9749. doi: 10.3390/su16229749

22. **Mohammadi, P., Dang, C.H., Román, S., Duman, G., Akdeniz, R.C., Kömekçi, F., Nik Ghazali, N.N., De Tender, C. and Kulli, B., 2025.** Can biomass-derived chars serve as a viable alternative to commercial inorganic fertilizers? *Biofuel Research Journal*. 12(1): 2350-2372. doi: 10.18331/BRJ2025.12.1.5

23. **Mondal, S., Cho, S. and Lee, J., 2025.** Material innovations and challenges in adsorption-based nanoplastic removal for water purification: A comprehensive review of efficacy, mechanisms, performance factors, and future perspectives. *Journal of*

[Downloaded from www.journalaer.com on 2026-11-15]

[DOI: 10.22034/aer.2.2.81]

with cetyltrimethylammonium bromide. *Environmental Pollution*. 318: 120897. doi: 10.1016/j.envpol.2022.120897

34. **Song, Q., Kong, F., Liu, B.F., Song, X. and Ren, H.Y., 2024.** Biochar-based composites for removing chlorinated organic pollutants: Applications, mechanisms, and perspectives. *Environmental science and ecotechnology*. 21: 100420. doi: 10.1016/j.ese.2024.100420

35. **Siipola, V., Pflugmacher, S., Romar, H., Wendling, L. and Koukkari, P., 2020.** Low-cost biochar adsorbents for water purification including microplastics removal. *Applied sciences.* 10(3): 788. doi: 10.3390/app10030788

36. **Subair, A., Krishnamoorthy Lakshmi, P., Chellappan, S. and Chinghakham, C., 2024.** Removal of polystyrene microplastics using biochar-based continuous flow fixed-bed column. *Environmental Science and Pollution Research*. 31(9): 13753-13765. doi: 10.1007/s11356-024-32088-5

37. **Wang, B., Lu, J., Wang, L., Xiao, J., Liu, G., Chai, Y. and Li, X., 2025.** Distribution characteristics and risk assessment of microplastics in Lake Bosten. *Environmental Geochemistry and Health*. 47(11): 486. doi: 10.1007/s10653-025-02802-4

38. **Wang, Z., Sedighi, M. and Lea-Langton, A., 2020.** Filtration of microplastic spheres by biochar: removal efficiency and immobilisation mechanisms. *Water Research*. 184: 116165. doi: 10.1016/j.watres.2020.116165

39. **Wasserman, T.N. and Mueller, S.E., 2023.** Climate influences on future fire severity: a synthesis of climate-fire interactions and impacts on fire regimes, high severity fire, and forests in the western United States. *Fire Ecology*. 19(1): 43. doi:10.1186/s42408-023-00200-8

40. **Yoo, J., 2026.** Recent advances in livestock manure biochar Development in Korea: A review. *Waste Management*. 210: 115208. doi: 10.1016/j.wasman.2025.115208

41. **Zhao, M., Zhang, Y., Li, X. and Liu, X., 2025.** Biodegradable microplastics coupled with biochar enhance Cd chelation and reduce Cd accumulation in Chinese cabbage. *Biochar*. 7(1): 43. doi: 10.1007/s42773-024-00418-y

[Downloaded from www.journalaer.com on 2026-11-15]

[DOI: 10.22034/aer.2.2.81]