

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 (H₂, CH₄, 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

مقاله مروری

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

سیده بهاره 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

چکیده

کلمات کلیدی

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 $\pi-\pi$ 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 آبی 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 هوازدهی بیوچار، احتمال آزادسازی مجدد آلاینده‌ها و ملاحظات مرتبط با مقیاس صنعتی، از چالش‌های مهم در کاربرد گسترده این فناوری به‌شمار می‌روند. در مجموع، بیوچار به‌عنوان یک راهکار امیدوارکننده 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

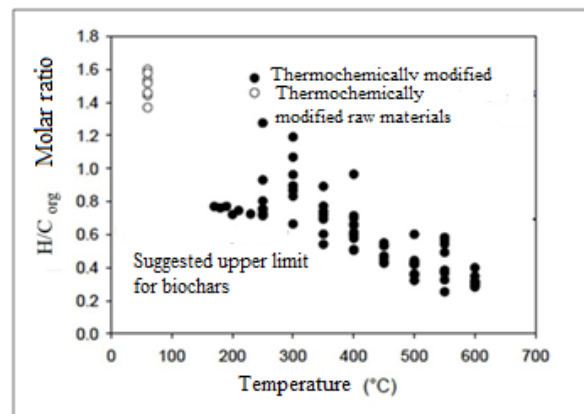
مقدمه

در دهه‌های اخیر، آلودگی میکروپلاستیک‌ها به‌عنوان یکی از تهدیدهای جهانی برای تنوع زیستی و سلامت اکوسیستم‌های طبیعی شناخته شده 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 فلزات سنگین و ترکیبات آلی پایدار، می‌توانند وارد زنجیره‌های غذایی شده و به‌طور بالقوه بر سلامت موجودات جانوری در سطوح مختلف تغذیه‌ای اثرگذار باشند (۷، ۱۳، ۳۴). مطالعات اخیر نشان داده‌اند 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، بیوجار به‌عنوان ماده‌ای با ظرفیت جذب بالا، پایداری شیمیایی و منشاء زیستی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. بیوجار نه تنها 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 این حال، 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 بیوجار به‌عنوان یک ابزار امیدبخش برای حفاظت از زیست‌بوم‌های جانوری و بهبود کیفیت زیست‌محیطی مطرح شود. در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی درخصوص بیوجار در مقابله با آلودگی میکروپلاستیک انجام شده است. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای نشان داده شده است که بیوجار 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 مانند pH، دما و رقابت سایر آلاینده‌ها قرار دارد (۲۳، ۲۴). در مطالعه دیگری نیز، به‌عنوان یک بررسی جامع، بر این نکته تأکید شده است که بیوجار می‌تواند تحرک میکروپلاستیک‌ها را کاهش دهد و با تثبیت آن‌ها در ساختار خاک یا رسوب آن‌ها در محیط آبی، دسترسی پذیری زیستی این ذرات را برای جانداران کاهش دهد (۱۴). افزون بر این، در تحقیقات اخیر تأیید شده است که بیوجار 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 بیش‌تر در سطوح مختلف تغذیه‌ای است. با توجه به این شکاف پژوهشی، هدف از این مطالعه ارائه یک مرور تحلیلی بر سازوکارهای حذف میکروپلاستیک‌ها توسط بیوجار 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 زیست‌دسترسی‌پذیری و زیست‌تجمع میکروپلاستیک‌ها ارائه شود.

ویژگی‌ها، تهیه و انواع بیوجار: بیوجار 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، بیوجارها 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 بیوجار 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. وجود این ساختارها یکی از معیارهای اصلی برای ثبات بیوجار و دوام آن در محیط‌های طبیعی می‌باشد. با توجه به شکل ۱، عدد 0.7 به عنوان حد بالایی نسبت مولی $H:C_{org}$ برای تمایز بیوجار از بیوماس (Biomass) که تغییرات ترموشیمیایی نداشته یا تغییرات جزئی داشته است به کار می‌رود. از واژه تبدیل‌یافته ترموشیمیایی برای موادی استفاده می‌شود که نسبت $H:C_{org}$ کم‌تر از 0.7 دارند و سهم بیش‌تری از ساختارهای حلقه‌ای آروماتیک ذوب‌شده را شامل می‌شوند. سایر موادی که دارای نسبت $H:C_{org}$ بالاتر از 0.7 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 بیوجار منجر گردد. به‌عنوان نمونه، بیوجار حاصل از چوب یا ضایعات گیاهی در دمای بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد توان جذب بالاتری

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



شکل ۱: 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 بادام زمینی)، بیوچار دامی (مانند فضولات حیوانی) و بیوچار لجن فاضلاب هستند. بیوچارهای چوبی به دلیل 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 $\pi-\pi$ 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 آبی را به‌طور بالقوه محدود کنند. در محیط‌های خاکی، بیوچار با بهبود بافت و تهویه خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی (Cation exchange capacity) و فراهم کردن 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 $\pi-\pi$ است (۲۱). ساختار متخلخل بیوچار سبب می‌شود که ذرات میکروپلاستیکی در حفرات سطحی و درون ساختارهای 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 به دلیل 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 مانند pH، دما و نوع محلول قرار دارد، به‌گونه‌ای که در محیط‌های با pH خنثی تا قلیایی، نقش برهم‌کنش‌های آب‌گریز و $\pi-\pi$ 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).

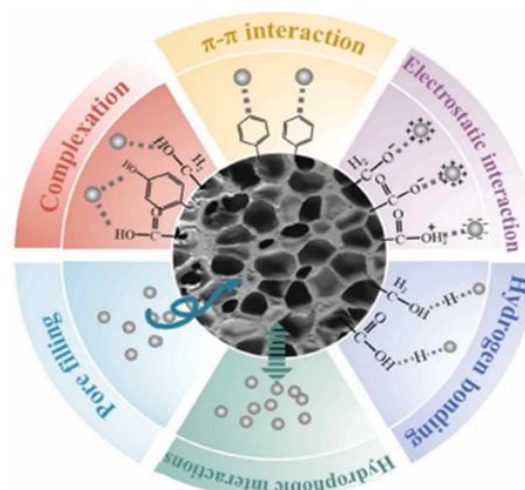
ج) تجمع (Flocculation): گروه‌های سطحی بیوچار می‌توانند ذرات میکروپلاستیک را به صورت تجمع‌ی درآورند و به ذرات بزرگ‌تری تبدیل کنند که رسوب آن‌ها در محیط آسان‌تر می‌شود، اگرچه پایداری این تجمع‌ها در شرایط هیدرودینامیکی متغیر هنوز به‌طور کامل مشخص نیست (۲۴، ۳۱).

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؛ در حالی که 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 درون حفره‌ای 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 در نظر گرفتن 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 آبی کاهش دهد (۷). بیوچار از طریق چندین

(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، بیوفیل‌ها 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. علاوه بر 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 $\pi-\pi$ بین حلقه‌های بنزنی بیوچار و پلیمرهای آروماتیک مانند پلی‌استایرن

سازوکار هم‌زمان ممکن است به کاهش اثرات سمی میکروپلاستیک‌ها بر جانداران خاکریزی و آبی کمک کند. نخست، سطح بسیار متخلخل و دارای گروه‌های عاملی اکسیژنی بیوپچار موجب می‌شود که میکروپلاستیک‌ها و ترکیبات سمی جذب‌شده بر سطح آن‌ها (مانند فتالات‌ها و پلی‌هیدروکربن‌های آروماتیک) به سطح بیوپچار 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، بیوپچار 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 خاکریزی، بیوپچار با فراهم کردن 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، بیوپچار 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. به‌طور کلی، اگرچه سازوکارهای پیشنهادی نشان‌دهنده ظرفیت بالقوه بیوپچار 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 بیوپچار به دلایل زیادی از جمله 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 بیوپچار 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 بیوپچار 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 به‌دست آمده و تعمیم آن به شرایط مزرعه‌ای نیازمند مطالعات میدانی بیش‌تر است. این یافته نشان می‌دهد که بیوپچار می‌تواند به‌عنوان یک عامل کاهش‌دهنده 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 بیوپچار 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 بیوپچار 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 بیوپچار 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 بايومس به بیوپچار در شرایط حرارتی، کربن در حدود ۱۰۰ نیتروژن بالاتر از ۲۰۰، گوگرد بالاتر از ۳۷۵ و پتاسیم و فسفر بین ۷۰۰ و

۸۰۰ درجه سانتی گراد شروع به تصاعد می کنند (۲۵، ۳۹). نیتروژن بیش از سایر عناصر پرمصرف به حرارت حساس است و با افزایش درجه حرارت در طی فرآیند گرماکافت، نیتروژن سریع تر از سایر عناصر از زیست توده خارج می شود. بنابراین، محتوای نیتروژن بیوپچار تولید شده در دمای بالا معمولاً کاهش می یابد که این امر می تواند بر نقش تغذیه ای و زیست محیطی آن در خاک اثرگذار باشد. به طور کلی با افزایش دمای گرماکافت، غلظت قابل استخراج NH_4^+ و PO_4^{3-} از بیوپچار کاهش می یابد و در دماهای بالاتر، بخشی از NH_4^+ به مقدار محدودی NO_3^- قابل تبادل اکسید می شود (۶). این تغییرات شیمیایی ممکن است بر دسترس پذیری عناصر غذایی برای گیاهان و میکروارگانیسم ها تأثیر گذاشته و به صورت غیرمستقیم پیامدهایی برای شبکه های غذایی خاک ایجاد کند، هرچند این ارتباط نیازمند شواهد تجربی مستقیم است. بیوپچار، بسته به ماهیت مواد اولیه، ممکن است حاوی برخی عناصر کم مصرف نظیر مس، روی و آهن باشد که با افزودن بیوپچار به خاک، این عناصر غذایی به محیط خاک اضافه می شوند (۱۱، ۲۰). با این وجود، ارزیابی هم زمان احتمال تجمع عناصر بالقوه سمی و تغییر در تعادل ریزمغذی ها برای پیش بینی اثرات اکولوژیکی ضروری است.

ج) کاهش اثرات زیستی بر جانوران: میکروپلاستیک ها از طریق زنجیره غذایی به بدن جانوران رسیده و گزارش شده اند که می توانند موجب انسداد دستگاه گوارش، التهاب بافتی و استرس اکسیداتیو شوند. بیوپچار با کاهش تحرک و دسترس پذیری ذرات پلاستیکی در محیط، ممکن است احتمال انتقال آن ها به بدن جانوران را کاهش دهد، هرچند میزان این کاهش به شرایط محیطی و ساختار شبکه غذایی وابسته است. به ویژه در محیط های آبی، بیوپچار معلق می تواند ذرات پلاستیکی را به خود جذب کرده و از ورود مستقیم آن ها به بدن فیتوپلانکتون ها و بی مهرگان جلوگیری کند (۷، ۸). این فرآیند، در نهایت می تواند به کاهش مواجهه در سطوح بالاتر تغذیه ای منجر شود، اگرچه شواهد مستقیم درباره کاهش زیست بزرگ شدن در مقیاس اکوسیستمی هنوز محدود است. در محیط های آبی، بیوپچار معلق می تواند ذرات پلاستیکی را به خود جذب کند و از تماس مستقیم این ذرات با فیتوپلانکتون ها و بی مهرگان جلوگیری نماید. این اثر از چند مسیر احتمالی توضیح داده شده است: اول، جذب سطحی و فروماندن ذرات روی سطح بیوپچار سبب افزایش اندازه مؤثر ذرات معلق و تسریع ته نشینی آن ها می شود؛ در نتیجه ذرات از ستون آب دور می مانند و شانس بلعیده شدن توسط پلانکتون ها و بی مهرگان کاهش می یابد. دوم، بیوپچار می تواند به عنوان مخزنی برای آلاینده های همراه با میکروپلاستیک (مثلاً PAHs یا فلزات) عمل کند، بنابراین حتی اگر ذره ای در تماس با جاندار قرار گیرد، بار شیمیایی زیان آور

آن ممکن است کاهش یابد و دسترس پذیری زیستی آن کم تر شود. سوم، هنگامی که بیوپچار- ذره ته نشین شود، احتمال ورود آن به مسیرهای تغذیه ای آبستیز (مثلاً فیتوپلانکتون ← گرازبایوت ← ماهی) می تواند کاهش یابد، هرچند پویایی رسوبات و بازتعقیق ذرات در شرایط طبیعی باید مدنظر قرار گیرد. شواهد تجربی و مرورهای اخیر نشان می دهند که ترکیب جذب فیزیکی، فیلتراسیون و ایجاد تجمع توسط بیوپچار، به ویژه انواع اصلاح شده یا مغناطیسی، می تواند حذف مؤثر میکروپلاستیک ها از آب را تسریع کند و در مقیاس آزمایشگاهی و نیمه میدانی کاهش بار ذرات معلق کوچک را نشان داده است (۷، ۲۴). در محیط های آبی، کاربرد بیوپچار گزارش شده است که می تواند ورود مستقیم ذرات میکروپلاستیک به بدن فیتوپلانکتون ها و بی مهرگان را کاهش دهد. به عنوان مثال، پژوهش ها نشان می دهند که بیوپچار با جذب اولیه ذرات معلق و کاهش دسترس آن ها به جانداران آبی، می تواند مسیر انتقال آن ها در زنجیره غذایی را تعدیل کند (۷). افزون بر این، پژوهشی نشان داده است که به کارگیری بیوپچار در سیستم های آبی، در شرایط میدانی منجر به کاهش نشانگرهای تجمع زیستی میکروپلاستیک ها در گونه های ماهی تجاری شده است (۳۰). با این حال، تعمیم این یافته ها به سایر گونه ها و اکوسیستم ها نیازمند داده های مقایسه ای گسترده تر است. هم چنین، این فرآیند می تواند به کاهش انتقال آلاینده های جذب شده توسط میکروپلاستیک ها- مانند ترکیبات آلی پایدار یا فلزات سنگین- کمک کند، چرا که با کاهش تعداد ذرات معلق، فرصت برهم کنش میکروپلاستیک ها با این آلاینده ها و سپس انتقال به جانداران کاهش می یابد. بنابراین، بیوپچار نه تنها به حذف مستقیم ذرات پلاستیکی کمک می کند، بلکه با کاهش دسترس پذیری زیستی آن ها، می تواند 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 تغذیه ای بالاتر هم چنان محدود و نیازمند بررسی های بیش تر است. هم چنین براساس پژوهش های انجام گرفته با تمرکز بر رواناب های کشاورزی، نشان داده شده است که ستون های پر شده با بیوپچار قادرند بین ۸۶ تا ۹۳ درصد از میکروپلاستیک های موجود در جریان های سطحی را حذف کنند (۲۶). این عملکرد بالا در شرایط واقعی مزرعه و تحت چرخه های تر و خشک مکرر نیز حفظ شده است. با وجود این، ارزیابی مستقیم اثر این کاهش بر جمعیت های جانوری پایین دست نیازمند پایش اکولوژیکی بلندمدت است. یافته ها بیانگر آن است که کاربرد بیوپچار در مناطق کشاورزی نه تنها کیفیت آب خروجی را بهبود می دهد بلکه می تواند احتمال ورود ذرات پلاستیکی به زیست بوم های جانوری پایین دست را کاهش دهد.

(د) کاربرد بیوچار در حذف میکروپلاستیک‌ها از محیط‌های آبی:

با توجه به این که استفاده از بیوچار به عنوان 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 به طور موثری MPs را از سیستم‌های آبی حذف کند و به عنوان 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. همان‌طور که گفته شد این ماده کربن‌دار و متخلخل که از پیرولیز زیست‌توده تولید می‌شود، ظرفیت بالایی برای جذب آلاینده‌ها دارد و می‌تواند به عنوان 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 به عنوان یک جاذب در محیط‌های آبی برای حذف MPs و هم‌چنین به عنوان یک ماده اصلاحی برای MPs در 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 آروماتیسسته 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 به عنوان 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 پر شده 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 این حال، این راندمان به ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آب ورودی، اندازه ذرات و زمان تماس وابسته است. این نوع سیستم‌ها به عنوان 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 به عنوان روشی موثر برای کاهش اثرات میکروپلاستیک‌ها شناخته شده است، اما چالش‌هایی نیز وجود دارد 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 ایجاد کنند (۲۱، ۳۲). بنابراین، انتخاب ماده اولیه و کنترل کیفیت محصول نهایی برای کاهش ریسک‌های اکولوژیکی اهمیت اساسی دارد.

ج) تجمع 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 تغییر pH، شوری یا آشفستگی فیزیکی)، دوباره آزاد شوند. این فرایند می‌تواند منجر به بازآلودگی ثانویه و کاهش پایداری عملکرد بیوچار در مقیاس بلندمدت شود (۱، ۷، ۲۱)؛ در نتیجه، 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 قابل توجه 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

- Purification Technology*. 136660. doi: 10.1016/j.seppur.2025.136660
2. Anuwa-Amarh, N.A., Dizbay-Onat, M., Venkiteshwaran, 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

می‌شود. به‌کارگیری مدل‌های زیست‌محیطی برای شبیه‌سازی رفتار ترکیبی بیوپچار 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 بیوپچار و میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های طبیعی تحت تأثیر عواملی مانند هوازدگی، تشکیل بیوفیلیم‌های 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 به داده‌های آزمایشگاهی ممکن است منجر به برآورد بیش‌ازحد کارایی بیوپچار در شرایط طبیعی شود. درنهایت، ضرورت مطالعات میدانی بلندمدت، پایش اکولوژیکی و مدل‌سازی رفتار ترکیبی بیوپچار-میکروپلاستیک در اکوسیستم‌های آبی و خاکی برای ارزیابی دقیق پیامدهای زیست‌محیطی و جانوری این فناوری مورد تأکید قرار می‌گیرد.

نتیجه‌گیری: بیوپچار، 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، بیوپچار 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 این حال، شواهد مستقیم درباره کاهش زیست‌تجمع و زیست‌بزرگ شدن در زیست‌بوم‌های جانوری هنوز محدود بوده و عمدتاً مبتنی بر مطالعات کنترل‌شده است. در مجموع، اگرچه بیوپچار ظرفیت بالقوه‌ای در مدیریت آلودگی میکروپلاستیک‌ها دارد، کارایی واقعی آن در مقیاس اکوسیستمی به ویژگی‌های محیطی، نوع بیوپچار و پویایی شبکه‌های غذایی وابسته است. بنابراین، ارزیابی جامع اثرات بلندمدت، انجام مطالعات میدانی مقایسه‌ای و توسعه بیوپچارهای اصلاح‌شده با رویکرد ارزیابی چرخه عمر، 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*

- 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*

- 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 Chinghakhham, 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