Shrimp Waste Biochar for *Soil Rehabilitation* from Cadmium-Induced Degradation: Red`uced Metal Bioavailability and Sustained Phytostability in *Sporobolus arabicus*

Navazollah Moradi [a,*], Saber Alavi [b], Elham Farahani [c], Alireza Nafarzadegan [d]

[a] *Assistant Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar-Abbas, Iran*

[b] *M.Sc. Graduate Student, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar-Abbas, Iran*

[c] Assistant Professor, Monitoring and Improvement of Soil and Water Research Department, Soil and Water Research Institute of Iran, Karaj, Iran.

[d] *Associate professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar-Abbas, Iran,*

Research Full Paper

Article History (Received: 2026/02/12 Accepted: 2026/03/11)

Extended abstract

Introduction

Soil contamination by heavy metals represents a critical threat to ecological sustainability, impairing soil quality while accelerating structural degradation and erosion processes. Cadmium (Cd), lead (Pb), and nickel (Ni) pose severe risks to food security and human health due to their high toxicity, environmental persistence, and potential for bioaccumulation in food chains. Biochar has emerged as a sustainable soil amendment capable of reducing heavy metal bioavailability through its porous architecture, abundant surface functional groups, enhanced cation exchange capacity, pH modulation, and chemical immobilization mechanisms. Nevertheless, the efficacy of aquaculture-derived biochars, particularly those produced from shrimp shells, in combination with native halophytic species adapted to coastal ecosystems, remains insufficiently explored. This study was designed to evaluate the capacity of shrimp waste-derived biochar to immobilize Cd, Pb, and Ni in contaminated soil and modulate the physiological responses of the *Sporobolus arabicus*.

Materials and Methods

A factorial experiment was conducted under controlled conditions at the Hormozgan Natural Resources Nursery Station (Baghu Village, southern Iran) using a completely randomized design with three replications. Shrimp shell biochar was produced via slow pyrolysis at 450°C for 3 h under oxygen-limited conditions, followed by grinding and sieving through a 0.25-mm mesh. Surface soil (0–30 cm depth) collected from agricultural land near Bandar Abbas was artificially contaminated with cadmium nitrate at concentrations of 40 and 80 mg kg^{-1}. Following a two-week stabilization period, biochar suspensions were uniformly incorporated into the soil at rates of 4 and 8 g L^{-1}. After a 60-day incubation period, *Sporobolus arabicus* seedlings were transplanted into treated pots and maintained for 90 days under controlled environmental conditions (18–25°C, 50% field capacity). At harvest, the plant's dry biomass was recorded. Heavy metal concentrations (Cd, Pb, Ni) in soil and plant tissues were quantified using atomic absorption spectrometry following acid digestion. Soil chemical parameters (pH and electrical conductivity) were determined via saturated paste extract, and the bioconcentration factor (BCF) was calculated. Statistical analysis was performed using SPSS software with analysis of variance and Duncan's multiple range test at $p < 0.01$.

Results

Analysis of variance revealed that cadmium contamination levels significantly influenced ($p < 0.01$) Cd content in plant and soil, electrical conductivity (EC), and soil Pb concentration. Biochar application exerted significant effects ($p < 0.01$) on all measured parameters except plant biomass. A significant interaction ($p < 0.01$) between contamination levels and biochar treatments was observed for BCF, Ni concentration, and soil pH. The minimum plant Cd concentration (4.74 mg kg^{-1}) occurred in the 8 g L^{-1} biochar treatment, compared to 13.08 mg kg^{-1} in the control. Maximum plant biomass (44.12 g) was recorded at 8 g L^{-1} biochar, while the control yielded the lowest biomass (36.24 g). BCF decreased from

[*] **Corresponding Author: nvz.moradi@hormozgan.ac.ir**

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.44]

0.292 (control) to 0.137 (8 g L^{-1}), indicating restricted metal translocation to aerial plant parts. Soil heavy metal concentrations declined substantially: Cd from 45.69 to 34.54 mg kg^{-1}, Pb from 15.94 to 6.72 mg kg^{-1} (at 4 g L^{-1}), and Ni from 18.03 to 8.33 mg kg^{-1}. EC decreased from 2.808 (control) to 1.667 dS m^{-1} (8 g L^{-1}), while soil pH was moderated from 8.35 to 8.14. Notably, 4 g L^{-1} biochar demonstrated optimal efficacy for Pb and Ni immobilization, whereas 8 g L^{-1} proved superior for reducing plant Cd uptake and enhancing biomass production.

Discussion and Conclusion

The observed reduction in heavy metal bioavailability aligns with established biochar immobilization mechanisms, including surface adsorption, organic–metal complexation, and enhanced cation exchange capacity. The significant decline in BCF confirms restricted metal translocation to aboveground tissues—a critical attribute for phytostabilization strategies aimed at minimizing entry into food chains. *Sporobolus arabicus* exhibited remarkable resilience under elevated Cd stress (80 mg kg^{-1}), maintaining substantial biomass even in untreated controls, thereby confirming its suitability as a native species for phytoremediation of coastal soils in southern Iran. The reduction in soil EC likely reflects improved soil structure, enhanced permeability, and facilitated leaching of soluble salts. The modest pH decrease (8.35 to 8.14)—contrary to the typical alkalizing effect of biochar suggests context-dependent interactions between biochar properties and native soil chemistry; shrimp shell biochar apparently exerted a moderating influence in inherently alkaline coastal soils.

In conclusion, shrimp shell-derived biochar significantly reduced Cd uptake by *Sporobolus arabicus* and enhanced immobilization of Cd, Pb, and Ni in contaminated soil. Under elevated Cd contamination, the 4 g L^{-1} application rate demonstrated optimal efficacy for improving soil properties and reducing Pb and Ni bioavailability. We therefore recommend application of shrimp waste-derived biochar at 4 g L^{-1} for remediation of heavy metal-contaminated soils in southern coastal Iran. Furthermore, *Sporobolus arabicus* is strongly recommended for phytoremediation applications in this region owing to its ecological adaptability, robust growth under metal stress, and inherent capacity to extract heavy metals even without amendment. This integrated approach, simultaneously converting aquacultural waste into a functional soil amendment while deploying regionally adapted vegetation, offers a novel circular-economy framework for sustainable restoration of contaminated coastal ecosystems.

Keywords: Cadmium contamination; Shrimp waste biochar; Soil rehabilitation; *Sporobolus arabicus*

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.44]

Cite this article: Moradi, N., Alavi, S., Farahani, E. & Nafarzadegan, A. (2026). Shrimp Waste Biochar for Soil Rehabilitation from Cadmium-Induced Degradation: Red`uced Metal Bioavailability and Sustained Phytostability in *Sporobolus arabicus*. *Journal of Environmental Erosion Research. 2026; 16 (1):44-63.* http//doi.org/10.61882/jeer.405.1.44

©The Author(s)

.Published by Hormozgan University Press .

DOI: http//doi.org/10.61882/jeer.405.1.44 / URL: http://magazine.hormozgan.ac.ir

ترمیم خاک‌های تخریب‌شده توسط کادمیم با بیوچار ضایعات میگو: کاهش زیست‌دسترسی فلز و حفظ عملکرد زیستی گیاه بذرانداز (*Sporobolus arabicus*)

نوازاله مرادی*: استادیار، *گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکدهٔ کشاورزی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران،*
صابر علوی: دانش‌آموخته، *گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکدهٔ کشاورزی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران،*
الهام فراهانی: استادیار، بخش پایش و بهسازی منابع خاک و آب، موسسه تحقیقات خاک و آب ایران، کرج، ایران.
علیرضا نفرزادگان: دانشیار، *گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکدهٔ کشاورزی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران،*

نوع مقاله: پژوهشی
تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۰)
DOI: http//doi.org/10.61882/jeer.405.1.44

چکیده

آلودگی خاک به فلزات سنگین، به‌دلیل سمیت مزمن و پایداری زیست‌محیطی، نه‌تنها سلامت اکوسیستم خاک را تهدید می‌کند، بلکه از طریق کاهش پوشش گیاهی و تضعیف محتوای مواد آلی به‌عنوان عوامل کلیدی پایداری ساختاری فرآیندهای تخریب خاک را تشدید می‌کند. این زنجیره تأثیری، با گسستن پیوندهای خاک‌دانه‌ای و افزایش حساسیت سطح خاک به عوامل فرسایشی، چرخه تخریب-فرسایش را شتاب داده و توان تولیدی اراضی را به‌طور همزمان تضعیف می‌نماید.. بیوچار، به‌عنوان یک ماده کربن‌دار و متخلخل، قادر است خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک از جمله فعالیت میکروبی، تنوع جمعیت‌های میکروبی، فعالیت آنزیمی و ساختار خاک را بهبود بخشد و در نتیجه حاصلخیزی و عملکرد اکولوژیک خاک را ارتقا دهد. این پژوهش با هدف بررسی اثر سوسپانسیون بیوچار تولیدشده از ضایعات میگو (در دو سطح غلظت ۴ و ۸ گرم بر لیتر) بر جذب، تثبیت و کاهش زیست‌دسترسی فلزات سنگین کادمیم، سرب و نیکل در خاک و همچنین ارزیابی تأثیر آن بر رشد گیاه *Sporobolus arabicus* در شرایط آلودگی خاک با کادمیوم (در دو سطح ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در شرایط گلدانی انجام شد. پارامترهای اندازه‌گیری‌شده شامل محتوای کادمیوم در گیاه و خاک، هدایت الکتریکی، pH خاک، غلظت سرب و نیکل در خاک، بیوماس گیاهی و ضریب جذب زیستی بود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که محتوای کادمیوم در گیاه و خاک، هدایت‌الکتریکی و غلظت سرب در خاک به‌طور معنی‌داری ($p < 0.01$) تحت تأثیر سطوح آلودگی کادمیوم قرار گرفتند .همچنین، کاربرد بیوچار تأثیر معنی‌داری در سطح ۱ درصد بر تمامی صفات مورد مطالعه به‌جز بیوماس گیاه داشت. برهمکنش آماری معنی‌داری در سطح ۱ درصد نیز بین تیمارهای اعمال‌شده برای پارامترهای ضریب جذب‌زیستی، غلظت نیکل و pH مشاهده شد. افزودن بیوچار حاصل از ضایعات میگو منجر به کاهش معنی‌دار غلظت فلزات سنگین در خاک، محتوای کادمیوم در بافت گیاهی، هدایت الکتریکی و pH شد، به‌طوری‌که این اثر در غلظت ۴ گرم بر لیتر بیوچار برجسته‌تر بود. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از ضایعات شیلاتی، به‌ویژه پوسته میگو، در مناطق ساحلی جنوب ایران می‌تواند راهبردی پایدار برای تولید بیوچار و اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین باشد.

کلید واژه‌ها: آلودگی کادمیم، بیوچار، ضایعات شیلاتی ، ترمیم خاک، گیاه بذرانداز

* **نویسندهٔ مسئول:** nvz.moradi@hormozgan.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61882/jeer.405.1.44]

۱ـ مقدمه

آلودگی خـاک، بـه‌عنوان یکی از چالش‌های محوری توسـعه پایدار، نه‌تنها کیفیت خاک را تضـعیف می‌کند، بلکه فرآیندهای تخریب سـاختاری و فرسـایش خاک را نیز تسریع می‌نماید. تجمع فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی، علاوه بر تهدید سـلامت اکوسیستم به‌مثابه یک معضل جهانی (Ferronato & Torretta, 2019)، با افزایش حساسیت خاک به فرسایش آبی و بادی نیز ارتباط مستقیم دارد؛ زیرا این آلاینده‌ها از طریق القای زوال پوشش گیاهی، کاهش ماده آلی و تخریب سـاختمان خاک، شـرایط را برای فرسایش مساعد می‌سازند. این آلاینده‌ها عمدتاً از مسیر فعالیت‌های صنعتی، کشـاورزی گسترده، مصرف کودها و سموم شیمیایی، آبیاری با پساب‌های آلوده و ترافیک جاده‌ای وارد خاک شده و در آن تجمع می‌یـابنـد (Wong et al., 2002; Hu et al., 2013). هرچند مواد مادری خاک می‌توانند منبع طبیعی فلزات سـنگین محسـوب شـوند (Facchinelli et al., 2011)، فعالیت‌های انسانی نقش اصلی را در آلودگی غیرطبیعی خاک ایفا می‌کنند (Banat et al., 2005). این فعالیت‌ها با تغییر خواص فیزیکوشیمیایی خاکاز جمله کاهش ظرفیت تبادل کاتیونی، تخریـب سـاختار تجمعی و افزایش پراکندگی ذرات ریز زمینه تشـدید فرسـایش و انتقال آلاینده‌ها به آبخوان‌ها و اکوسـیسـتم‌های پایین‌دست را فراهم می‌آورند. این چرخه بازخوردی میان آلودگی و فرسایش، علاوه بر تهدید کیفیت منابع خاک و آب، موانع جدی را در مسیر مدیریت پایدار اراضی و احیای اکولوژیک ایجاد می‌کند.

در میان فلزات سنگین، کادمیم، سرب و نیکل به‌دلیل سمیت بالا، پایداری زیست‌محیطی و توانایی نفوذ به زنجیره غذایی، از بیش‌ترین خطرات برای سـلامت انسـان و اکوسـیسـتم‌ها برخوردارند (Bian et al., 2014). کادمیم، به‌ویژه، به‌دلیل حلالیت بالا و جذب آسـان توسـط گیاهان (Pagotto et al., 2001)، به‌سـرعت وارد زنجیره غذایی می‌شـود و عواقب جبران‌ناپذیری برای محیط‌زیسـت و سلامت عمومی به‌دنبال دارد (Jia et al., 2010). سرب نیز با القای تنش اکسیداتیو و اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاهان، عملکرد کشـاورزی را کاهش می‌دهد (Lone et al., 2008). در مواجهه با این چالش، گیاهان راهبردهای دفاعی متنوعی از جمله تجمع پرولین در سیتوپلاسم(Sharma & Dubey, 2005) و تولید اسـید سـالیسـیلیک،که از طریق فعال‌سازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز، استرس ناشی از فلزات سنگین را تعدیل می‌کند (Khan et al., 2015)، به‌کار می‌گیرند. با این حال، این ساز وکارها در مواجهه با غلظت‌های بالای آلاینده‌ها کافی نیسـتند و نیاز به راهکارهای مکمل جهت کاهش زیسـت‌فراهمی فلزات سنگین احساس می‌شود.

در این راسـتا، استفاده از بیوچار به‌عنوان یک اصلاح‌کننده محیطی پایدار مورد توجه قرار گرفته است. بیوچار، محصول پیرولیز بی‌هوازی زیست‌توده‌های آلی مانند ضایعات کشاورزی، دارای ساختار متخلخل، شدیداً کربنی و پایدار در خاک اسـت (Lehmann et al., 2006; Beesley et al., 2015)**.** این ماده با داشـتن گروه‌های عاملی سـطحی مانند کربوکسـیل، فنولیک و هیدروکسیل، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) خاک را افزایش داده و فلزات سنگین را از طریق مکانیسم‌هایی چون جذب الکترواسـتاتیک، تبادل یونی، تشـکیل کمپلکس و رسوب‌دهی شیمیایی تثبیت می‌کند (Tan et al., 2015; Paz-Ferreiro et al., 2014). همچنین، افزایش pH خاک توسط بیوچار باعث کاهش محلولیت و زیست‌فراهمی فلزات سنگین، به‌ویژه کادمیم و سرب می‌شود (Jiang et al., 2012; Xu et al., 2018).

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.44]

تحقیقات متعددی کارایی بیوچار در کاهش جذب فلزات سنگین توسط گیاهان را تأیید کرده‌اند. به‌عنوان مثال، Liu و همکاران (2014) گزارش کردند که بیوچار لجن فاضلاب، زیست‌فراهمی Cd، Pb، Cu،Zn و Cr را کاهش و رشد کلم چینی (*Brassica pekinensis*) را بهبود بخشید. درمطالعه دیگر Al-Wabel و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که بیوچار بادام‌هندی، غلظت فلزات سنگین در ساقه ذرت (*Zea mays*) را کاهش و بیومس خشک آن را افزایش می‌دهد. Cui و همکاران (۲۰۱۱) نیز گزارش کردند که کاربرد بیوچار منجر به کاهش محتوای سرب و کادمیوم در دانه برنج (*Oryza sativa*) می‌شود .همچنین، Motaghian و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که کاربرد بیوچار با کاهش غلظت سرب زیست‌فراهم در خاک، میزان جذب این فلز را در گیاه ذرت کاهش داده و رشد آن را بهبود بخشید.

سایر مطالعات نیز اثرات مثبت بیوچار کود مرغی (O'Connor et al., 2018)، بیوچار پوست بادام‌زمینی (Xu et al., 2017) و بیوچار بقایای برنج (Zibaei et al., 2017) بر کاهش جذب کادمیم و سرب و تحریک رشد گیاهان را تأیید کرده‌اند. همچنین، Antonangelo و Zhang (2019) و Radziemska و همکاران (۲۰۱۹) به‌ترتیب کارایی بیوچارهای حاصل از بستر مرغداری/چمن و کمپوست ضایعات ماهی را در کاهش زیست‌فراهمی فلزات سنگین نشان دادند.

با توجه به اینکه استان هرمزگان یکی از قطب‌های اصلی تولید و فرآوری میگو در ایران است، ضایعات قابل‌توجهی از سر، پوسته و دم میگو سالانه بدون استفاده دورریخته می‌شود. این ضایعات زیست‌توده‌ای با پتانسیل بالا برای تولید بیوچار هستند که می‌تواند در مدیریت پایدار خاک‌های آلوده به‌کار گرفته شود. از سوی دیگر، شناسایی گونه‌های گیاهی بومی و تطابق‌یافته با شرایط اقلیمی و خاکی این منطقه ،به‌ویژه گونه‌هایی با توانایی گیاه‌پالایی و زیست‌توده بالا، از اولویت‌های راهبردی در تحقیقات محیط‌زیستی محلی محسوب می‌شود.

در این میان، گیاه بذرانداز (*Sporobolus arabicus*)[1]، یک گونه مقاوم بومی مناطق ساحلی و نیمه‌خشک جنوب ایران، می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای کاربرد در برنامه‌های گیاه‌پالایی باشد. با این حال، اطلاعات محدودی درباره تعامل این گیاه با بیوچار حاصل از ضایعات میگو در شرایط آلودگی با فلزات سنگین ،به‌ویژه کادمیم، سرب و نیکل، وجود دارد.

بنابراین، ضرورت این پژوهش آنست که ضمن بهره‌گیری از یک منبع محلی و ارزان (ضایعات میگو) برای تولید بیوچار، امکان استفاده از ترکیب گیاه‌پالایی و اصلاح خاک با بیوچار در کاهش جذب فلزات سنگین توسط گیاه بذرانداز (*Sporobolus arabicus*) به عنوان یک گیاه بومی و سازگار با اکوسیستم ساحلی هرمزگان، مورد ارزیابی قرار گیرد. این رویکرد نه‌تنها به مدیریت پایدار آلودگی خاک کمک می‌کند، بلکه ضایعات شیلات را، به‌عنوان منبعی ارزشمند، بازیافت می‌نماید و هم‌راستا با اصول اقتصاد چرخشی و توسعه پایدار است.

هدف اصلی این پژوهش، بررسی اثرات بیوچار تولیدشده از ضایعات میگو در غلظت‌های مختلف بر جذب، حذف و کنترل فلزات سنگین در خاک آلوده به کادمیم، توسط گیاه بذرانداز به عنوان گیاه بومی هرمزگان و همچنین ارزیابی پاسخ‌های رشدی این گیاه تحت تیمارهای ترکیبی بیوچار و آلاینده‌هاست.

۲-مواد و روش‌ها:

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در ایستگاه تولید نهال اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان هرمزگان، واقع در روستای باغو، به‌منظور بررسی تأثیر بیوچار تولیدشده از ضایعات میگو بر جذب،

[1] - *Sporobolus arabicus*

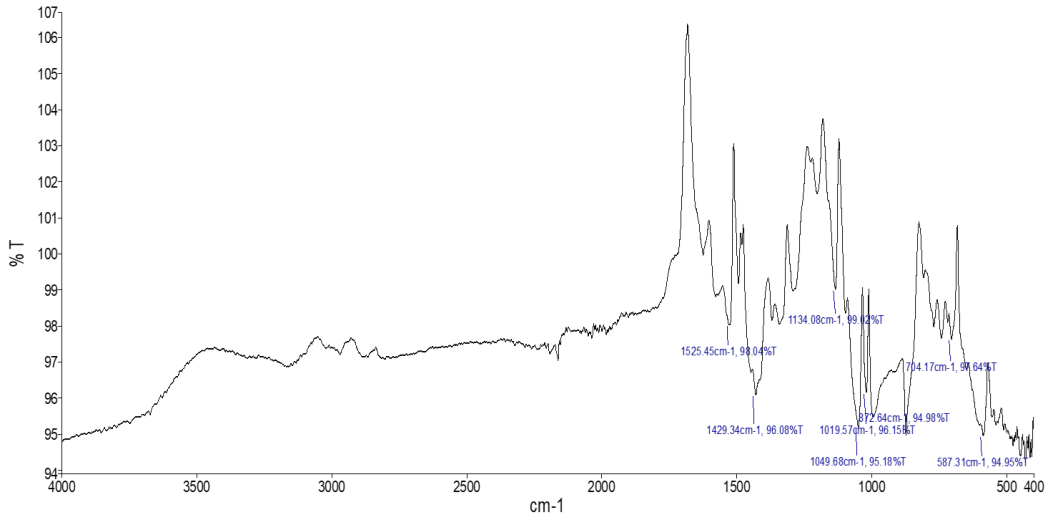
[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.44]

حذف و کنترل فلزات سنگین کادمیم(Cd) ، سرب (Pb) و نیکل (Ni) در خاک آلوده به کادمیم، و همچنین ارزیابی برخی ویژگی‌های رویشی گیاه بذرانداز(*Sporobolus arabicus*) پیاده‌سازی شد. تیمارهای آزمایشی شامل دو سطح غلظت بیوچار ضایعات میگو (۴ و ۸ گرم بر لیتر) و دو سطح آلودگی خاک به کادمیوم (۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم درکیلوگرم خاک) بودند.

تهیه بیوچار میگو:

به‌منظور تولید بیوچار، پوسته‌های میگو از بازار ماهی‌فروشان شهر بندرعباس تهیه و پس از شست‌وشوی کامل، در هوای آزاد خشک شدند. سپس، نمونه‌های خشک‌شده درون فویل آلومینیومی ضخیم بسته‌بندی و در کوره الکتریکی تحت دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۳ ساعت در شرایط بدون اکسیژن پیرولیز شدند (Kim et al., 2012). پس از سپری شدن این زمان و سرد شدن کامل بیوچار، نمونه‌ها با استفاده از آسیاب برقی ریز خرد شده و از الک استاندارد با اندازه ۰/۲۵ میلی‌متر عبور داده شدند (Moshtagh et al., 2022). ویژگی‌های شیمیایی و همچنین طیف‌های FTIR[1] بیوچار تولید شده مورد اندازه‌گیری قرار گرفت که نتایج آن به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۱ آورده شده‌اند.



شکل ۱. تصویر نتایج طیف‌سنجی FTIR بیوچار تولید شده از ضایعات میگو

جدول ۱- برخی ویژگی‌های شیمیایی بیوچار تولید شده از ضایعات میگو

Organic carbon	pH	EC	N	P	K	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu
g/kg		dsm^{-1}		(%)				mg/kg		
۴۲۰	۷/۸۶	۴/۱۲	۵/۲	۴/۱	۳/۵	۲۵	۷۰	۳۵	۶/۲	۳/۵

تهیه بستر کاشت و اعمال تیمارها:

بستر کشت با استفاده از لوله‌های پلیکا فشارقوی به طول ۳۵ سانتی‌متر و قطر ۱۲/۵ سانتی‌متر به‌عنوان گلدان تهیه شد. ۱۸ گلدان به تعداد تیمارهای مورد استفاده با خاک سطحی با کمترین دست‌خوردگی از یک مزرعه در اطراف شهر بندرعباس پر گردید جهت اخذ نمونه‌های خاک، استوانه‌های نمونه‌برداری با ضربات کنترل‌شده چکش به درون پروفیل

[1]- FOURIER TRANSFORM INFRARED SPECTROMETER

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61882/jeer.405.1.44]

خاک نفوذ داده شدند تا ساختمان اولیه خاک حفظ گردد. پس از استقرار لوله‌ها، خاک اطراف به‌وسیله بیلچه برداشته و نمونه‌ها با احتیاط از بستر خاک خارج شدند. جهت جلوگیری از ریزش خاک، ته هر یک از ظروف با پارچه‌ای مقاوم مسدود شد و بدین‌ترتیب نمونه‌ها آماده‌سازی و به محل اجرای آزمایش (نهالستان باغو) انتقال یافتند. در ادامه، هر یک از ظروف توزین شد و وزن خالص خاک محاسبه گردید. در نهایت، جرم مخصوص ظاهری خاک‌ها بر مقدار ۱/۴۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب تنظیم شد. ویژگی‌های اولیه این خاک در جدول ۲ ارائه شده است. سپس، خاک داخل گلدان‌ها با استفاده از محلول نیترات کادمیوم به‌صورت وزنی و در دو سطح غلظت ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک آلوده شد. پس از اعمال آلودگی، نمونه‌ها به‌منظور رسیدن به تعادل شیمیایی در خاک، به مدت دو هفته در شرایط محیطی کنترل‌شده نگهداری گردیدند. در ادامه، بیوچار تهیه‌شده از ضایعات میگو در دو غلظت ۴ و ۸ گرم در لیتر، بر اساس وزن مخصوص ظاهری خاک، به‌صورت یکنواخت به گلدان‌ها تزریق شد. علاوه بر تیمارهای ترکیبی (کادمیم + بیوچار)، یک تیمار شاهد شامل خاک آلوده بدون اعمال هرگونه ماده اصلاحی نیز در نظر گرفته شد. به‌منظور اطمینان از تأثیر بهینه بیوچار بر خواص خاک و تعامل آن با کادمیم، کلیه تیمارها پس از اعمال، به مدت ۶۰ روز در حالت استراحت (انکوباسیون) قرار داده شدند.

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اولیه خاک

کلاس بافت خاک	BD	Na	Mg	Ca	K	ازت کل	pH	EC
	g/cm^3		meq/l			%		ds/m
شنی	۱/۴۹	۴/۵۳۳	۵/۵۳۳	۳۲/۰۳۳	۳/۳۳	۰/۰۱۴	۸/۰۲۳	۳/۹۱۷

تهیه نهال برای کشت: نهال‌های گیاه بذرانداز (*Sporobolus arabicus*) از رویشگاه طبیعی آن در منطقه سیریک جمع‌آوری و به نهالستان منتقل شدند. نهال‌ها به مدت دو هفته در خاک نهالستان کشت و تحت مدیریت استاندارد (شامل آبیاری و مراقبت‌های لازم) نگهداری گردیدند. پس از این دوره، نهال‌های سالم انتخاب و در گلدان‌های حاوی تیمارهای آزمایشی کاشته شدند. در طول دوره آزمایش (۹۰ روز)، گلدان‌ها به صورت هفتگی در محدوده ظرفیت زراعی تا ۷۰ درصد ظرفیت زراعی آبیاری و تحت شرایط دمایی ۲۵ درجه تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. (شکل ۲)



شکل ۲. نمایی محیط طبیعی و شرایط گلخانه‌ای گیاه

پایان اعمال تیمار، اندازه‌گیری و انجام آزمایش‌ها:

1 - *Sporobolus arabicus*

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.44]

پس از گذشت ۹۰ روز از اعمال تیمارها، نهال‌های گیاه به‌طور کامل از گلدان‌ها خارج شـدند. ریشه‌ها با دقت از ذرات خاک پیرامون پاک‌سـازی و شـاخه‌های خشـک‌شـده حذف گردیدند. در ادامه، وزن تر گیاه اندازه‌گیری شد و سپس نمونه‌ها در دمای ۷۰ درجه سـلسـیوس در آون تا رسـیدن به وزن ثابت خشک شدند. بیوماس خشک گیاه با استفاده از رابطه (۱) محاسـبه گردید. غلظت کادمیم در بافت گیاه با اسـتفاده از روش‌های استاندارد (Ryan et al, 2007) تعیین شد.

$$\% \text{ Biomass} = \frac{DW}{FW} \times 100 \qquad \text{رابطه } (۱)$$

که در آن DW و FW به ترتیب وزن خشک و تر گیاه هستند.

نمونه‌های خاک برداشـت‌شـده از گلدان‌ها هوا-خشک و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند pH و هدایت الکتریکی (EC[1]) نمونه‌های خاک بر اسـاس روش عصـاره گل اشـباع (Corwin & Yemoto, 1996) اندازه‌گیری شـدند. غلظت فلزات سنگین (کادمیم، سرب و نیکل) در خاک نیز با استفاده از روش استخراج با اسید نیتریک–پرکلریک (Ryan et al, 2007) و با دستگاه جذب اتم[2]ی (AAS) تعیین گردید.

ضـریب جذب زیسـتی[3] (BCF) کادمیم در گیاه بر اسـاس رابطه (۲) و مطابق روش Zacchini و همکاران (۲۰۰۹) محاسبه گردید.

$$BCF = \frac{Cplant}{\text{Csoil}} \qquad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن C_{plant} غلظت عنصـر (کادمیم) در گیاه و C_{soil} غلظت همان عنصـر در خاک می‌باشد. آنالیز آماری، تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها از نرم‌افزار اس‌پی‌اس‌اس[4] SPSS و همچنین از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده گردید و عملیات رسم نمودارها در محیط اکسل[5] Excel انجام گرفت.

۳- نتایج و بحث:

تجزیه واریانس داده‌ها در رابطه با ویژگی‌های مورد بررسـی بیانگر آن اسـت که مقدار کادمیم گیاه و خاک، هدایت الکتریکی و میزان سرب خاک به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر میزان آلودگی خاک توسط کادمیم قرار گرفتند. تیمارهای بیوچار بر همه ویژگی‌های مورد بررسـی، به‌جز بیوماس، اثر معنی‌داری در سـطح ۱ درصـد داشـتند. اثر متقابل تیمار آلودگی خاک به کادمیم و تیمارهای بیوچار در ویژگی‌های کادمیم خاک و گیاه، سرب خاک و ضریب جذب زیستی در سطح ۱ درصد معنی‌داری بوده است (جدول ۳).

1 - Electrical Conductivity
2 - Atomic Absorption Spectrophotometer
3 - Bio concentration factor
4 - SPSS
5 - Excel

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61882/jeer.405.1.44]

جدول ۳- تجزیه واریانس ویژگی‌های مورد بررسی در رابطه با تیمارهای آلودگی کادمیم و بیوچار میگو

۱۰	درجه آزادی D.F	میانگین مربعات (M.S)							
		Cdگیاه	Biomassگیاه	BCF	EC	Cdخاک	Pbخاک	Niخاک	pH
تیمار آلودگی خاک به کادمیم (A)	۱	۴/۸۳**	۰/۴۲ns	۰/۰۰۱ns	۱/۲۸**	۱۱۲۵/۷**	۲۰/۸**	۰/۲۹ns	۰/۰۱۴ns
تیمار بیوچار میگو (B)	۲	۱۱۱/۷۷**	۹۸/۶۲ns	۰/۰۴۵**	۲/۰۳**	۴۴۱/۱**	۱۲۹/۶**	۱۶۵/۳۰**	۸/۶۸۲**
اثرمتقابل AB	۲	۷/۳۶**	۴۵/۱۹ns	۰/۰۱۳**	۰/۱۸ns	۶۳۹/۹**	۲۸/۹**	۰/۵۴ns	۰/۲۵۴ns
خطا	۱۲	۰/۳۲	۳۰/۹۱	۰/۰۰۱	۰/۰۶	۲۶/۵	۰/۷	۳/۸۸	۰/۷۷۳
ضریب تغییرات C.V%		۶/۸	۱۳/۶	۱۹/۱	۱۰/۸	۱۱/۷	۷/۲	۱۳/۷	۱/۱

ns، * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد.

۱-۳- مقایسه میانگین اثرات اصلی خاک آلوده و تیمار بیوچار بر ویژگی‌های مورد بررسی:

مقایسه میانگین اثر اصلی خاک آلوده بر ویژگی‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که غلظت کادمیم در گیاه و خاک، هدایت الکتریکی و مقدار سرب در خاک در تیمار آلوده‌شده با ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بوده است. بیوماس گیاه هرچند در تیمار ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم بالاتر بود، اما تفاوت معنی‌داری بین دو سطح آلودگی مشاهده نشد؛ این یافته می‌تواند نشان‌دهنده توانایی گیاه بذرانداز در مقاومت به سطوح مختلف آلودگی و نقش آن در فرآیند گیاه‌پالایی باشد. ضریب جذب زیستی (BCF) و غلظت نیکل در خاک در تیمار آلوده‌شده با ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم بیشتر از تیمار ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود، اما این تفاوت از نظر آماری معنی‌دار نبود. در مورد pH خاک نیز بین دو سطح آلودگی کادمیم تفاوت معنی‌داری مشاهده نشده است. (جدول ۴).

مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارهای بیوچار با شاهد نشان داد که کادمیم گیاه بین شاهد و هر دو تیمار در سطح ۵ درصد اختلاف آماری وجود دارد. بر همین اساس کمترین میزان کادمیم گیاه در تیمار ۸ گرم بر لیتر بیوچار (۴/۷۴ میلی‌گرم در کیلوگرم) و بیشترین آن در شاهد (۱۳/۰۸ میلی‌گرم در کیلوگرم) مشاهده شد. در مورد بیوماس گیاه تنها بین شاهد و تیمار بیوچار ۸ گرم اختلاف معنی‌دار مشاهده شد، بر همین اساس بیشترین بیوماس در تیمار بیوچار ۸ گرم بر لیتر (۴۴/۱۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) و کمترین مقدار در شاهد (۳۶/۲۴ میلی‌گرم در کیلوگرم) مشاهده گردید. این یافته‌ها بیانگر آنست که گیاه بذرانداز توانایی خوبی در جذب کادمیم از خاک آلوده حتی بدون کاربرد بیوچار از خود نشان داده است. همچنین این گیاه در حضور بیوچار در سطح غلظت بالاتر توانسته رشد و نمو مناسبی از خود نشان دهد. ضریب جذب زیستی (BCF) بین تیمار شاهد و تیمارهای حاوی بیوچار اختلاف معنی‌داری نشان داد؛ در عین حال، بین دو سطح بیوچار (۴ و ۸ گرم بر لیتر) اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. بیشترین مقدار BCF در تیمار شاهد (۰/۲۹۲) و

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.44]

کمترین مقدار آن در تیمار بیوچار ۸ گرم بر لیتر (۰/۱۳۷) ثبت شـد (جدول ۴). این یافته نشـان می‌دهد که گیاه بذرانداز (*Sporobolus arabicus*) در غیاب بیوچار نیز توانسته است آلاینده‌ها را به‌طور مؤثر از خاک جذب کرده و همزمان رشد کافی داشته باشد؛ بنابراین، این گیاه بومی را می‌توان به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای کاربرد در گیاه‌پالایی مدنظر قرار داد.

در مورد کادمیم خاک، بین تیمار شـاهد و تیمار حاوی ۴ گرم بر لیتر بیوچار اختلاف آماری معنی‌داری مشـاهده نشـد. بیشـترین غلظت کادمیم در تیمار شـاهد (۴۵/۶۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کمترین مقدار آن در تیمار با ۸ گرم بر لیتر بیوچار (۳۴/۵۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) اندازه‌گیری شـد. غلظت سرب خاک در بین هر سه تیمار (شاهد، ۴ و ۸ گرم بر لیتر بیوچار) اختلاف معنی‌داری از نظر آماری نشـان داد؛ به‌طوری‌که بیشـترین مقدار سـرب در تیمار شـاهد (۱۵/۹۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کمترین مقدار آن در تیمار حاوی ۴ گرم بر لیتر بیوچار (۶/۷۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مشاهده گردید. در مورد نیکل نیز، بین تیمار شـاهد و تیمار ۸ گرم بر لیتر بیوچار اختلاف معنی‌داری وجود نداشت، در حالی‌که بیشـترین غلظت نیکل در شـاهد (۱۸/۰۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کمترین مقدار آن در تیمار ۴ گرم بر لیتر بیوچار (۸/۳۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) ثبت شد (جدول ۴). الگوی کاهشی غلظت فلزات سنگین در خاک تحت تأثیر تیمارهای بیوچار، به‌ویژه در مقایسه با شاهد، نشان‌دهنده نقش مؤثر بیوچار در جذب و کاهش زیست‌فراهمی آلاینده‌های فلزی در خاک است.

هدایت الکتریکی خاک نیز در بین سـه تیمار اختلاف معنی‌داری داشـت؛ بیشـترین مقدار EC در تیمار شـاهد (۲/۸۰۸ دسـی‌زیمنس بر متر) و کمترین مقدار آن در تیمار ۸ گرم بر لیتر بیوچار (۱/۶۶۷ دسـی‌زیمنس‌برمتر) مشـاهده شـد. همچنین pH خاک بین تیمار شاهد و هر دو تیمار بیوچار (۴ و ۸ گرم بر لیتر) اختلاف معنی‌داری نشان داد، در حالی‌که اختلاف بین دو تیمار بیوچار از نظر آماری معنی‌دار نبود. بیشـترین pH در تیمار شاهد (۸/۳۵) و کمترین مقدار آن در تیمار ۴ گرم بر لیتر بیوچار (۸/۱۴) گزارش شد (جدول ۴).

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات اصلی خاک آلوده و تیمار بیوچار

	کادمیم گیاه Cd	بیومس Biomass	ضریب جذب زیستی BCF	هدایت الکتریکی EC	کادمیم خاک Cd	سرب خاک Pb	نیکل خاک Ni	اسیدیته pH
	mg/kg	g	درصد	dS/m		mg/kg		
خاک آلوده								
خاک آلوده با ۴۰ mg/kg کادمیم	۷/۷۵^{b}	۴۰/۶^{a}	۰/۲۰۰^{a}	۱/۹۰۶^{b}	۳۶/۰^{b}	۱۰/۵۸^{b}	۱۴/۴۷^{a}	۸/۲۱^{a}
خاک آلوده با ۸۰ mg/kg کادمیم	۸/۷۹^{a}	۴۰/۹^{a}	۰/۱۸۵^{a}	۲/۴۳۸^{a}	۵۱/۸^{a}	۱۲/۷۳^{a}	۱۴/۲۲^{a}	۸/۲۲^{a}
تیمار بیوچار								
شاهد	۱۳/۰۸^{a}	۳۶/۲۴^{b}	۰/۲۹۲^{a}	۲/۸۰۸^{a}	۴۵/۶۹^{a}	۱۵/۹۴^{a}	۱۸/۰۳^{a}	۸/۳۵^{a}
بیوچار ۴ g/L	۶/۹۹^{b}	۴۱/۸۱^{ab}	۰/۱۴۸^{b}	۲/۰۴۰^{b}	۵۱/۴۰^{a}	۶/۷۲^{c}	۸/۳۳^{b}	۸/۱۴^{b}
بیوچار ۸ g/L	۴/۷۴^{c}	۴۴/۱۲^{a}	۰/۱۳۷^{b}	۱/۶۶۷^{c}	۳۴/۵۴^{b}	۱۲/۳۱^{b}	۱۶/۶۶^{a}	۸/۱۶^{b}

* حروف مشترک تفاوت معنی‌داری ندارند.

۲-۳- مقایسه میانگین اثرات متقابل خاک آلوده و تیمار بیوچار بر ویژگی‌های مورد بررسی در گیاه:

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.44]

بررسی اثر متقابل خاک آلوده و تیمارهای بیوچار نشان داد که اثر تیمارها بر غلظت کادمیم در گیاه معنی‌دار بوده است. مقدار کادمیم در گیاه در دو تیمار بیوچار (۴ و ۸ گرم بر لیتر) به‌طور معنی‌داری کمتر از تیمار شاهد بود. کمترین غلظت کادمیم در گیاه در تیمار بیوچار ۸ گرم بر لیتر (۳/۳۹ میلی‌گرم در کیلوگرم) در خاک آلوده با ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم مشاهده شد که با سایر ترکیبات تیماری تفاوت آماری معنی‌داری داشت. در مقابل، بیشترین غلظت کادمیم در گیاه مربوط به تیمار شاهد (۱۴/۰۳ میلی‌گرم در کیلوگرم) در خاک آلوده با ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم بود (شکل ۳، الف). این یافته‌ها نشان‌دهنده تأثیر مثبت بیوچار در کاهش جذب کادمیم توسط گیاه است. Baghaie (۲۰۱۸) نتیجه گرفت که کاربرد کمپوست زباله شهری همراه با بیوچار بقایای پسته می‌تواند اثرات تنش ناشی از کادمیم را در گیاه کاهش دهد، هرچند این تأثیر ممکن است به نوع و گونه گیاه نیز وابسته باشد. Valizadeh Ghale Beig و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که بیشترین مقادیر صفات مورفولوژیکی (شامل سطح برگ، وزن تازه و خشک اندام هوایی و حجم ریشه) در کاهو در سطح ۵ گرم در کیلوگرم بیوچار رُز مشاهده شد و با افزایش سطح بیوچار از ۵ به ۱۰ گرم در کیلوگرم، غلظت کادمیم در ریشه کاهش یافت. همچنین، گزارش شده است که کاربرد بیوچار در خاک آلوده به سرب و کادمیم منجر به کاهش غلظت این عناصر در اندام هوایی و ریشه گیاه کلزا و افزایش سه‌برابری تولید زیست‌توده شده است (Houben et al., 2013) در مطالعه‌ای دیگر، کاهش معنی‌دار غلظت کادمیم در اندام هوایی ذرت در سطح ۱۵ گرم بر کیلوگرم بیوچار حاصل از چوب فعال گزارش شد که این اثر احتمالاً ناشی از تشکیل کمپلکس‌های آلی-فلزی است(Namgay et al., 2010) . علاوه بر این، بررسی‌ها نشان داده‌اند که بیوچار می‌تواند فعالیت میکروبی خاک را افزایش دهد، که این امر ممکن است به تجزیه آلاینده‌های آلی و ایمن‌سازی فلزات سنگین کمک کرده و در نتیجه تجمع آن‌ها را در گیاهان کاهش دهد (Gomez et al., 2019). Hejazizadeh و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که کاربرد بیوچار لجن فاضلاب کارخانه‌های کاغذ منجر به کاهش معنی‌دار (در سطح احتمال ۱ درصد) غلظت سرب و کادمیم در اندام هوایی و ریشه گیاه آفتابگردان شده است. همچنین، Feyzi و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای نشان دادند که کاربرد هم‌زمان اسید سالیسیلیک و بیوچار (شامل ۲۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک و ۳ درصد بیوچار) باعث کاهش، غلظت سرب در اندام هوایی گیاه شده است.

بررسی اثر متقابل خاک آلوده و تیمارهای بیوچار بر بیوماس گیاه نشان داد که تنها بین تیمار شاهد و تیمار حاوی ۴ گرم بر لیتر بیوچار در خاک آلوده با ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم، اختلاف معنی‌دار آماری وجود دارد؛ در حالی که بین سایر تیمارها چنین تفاوتی مشاهده نشد. کمترین و بیشترین مقادیر بیوماس گیاه به‌ترتیب در تیمار شاهد (۳۳/۳۴ گرم) و تیمار ۴ گرم بر لیتر بیوچار (۴۴/۴ گرم) در خاک آلوده با ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم ثبت شد (شکل ۴). در خاک آلوده با ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم، اگرچه تفاوت‌های عددی بین تیمارها قابل‌توجه بود، هیچ‌یک از آن‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبود. در این سطح آلودگی، بیشترین بیوماس گیاه در تیمار ۸ گرم بر لیتر بیوچار (۴۴/۲۹ گرم) و کمترین آن در شاهد (۳۹/۱۳ گرم) مشاهده گردید.گیاه بذرانداز حتی در تیمار شاهد و بدون حضور بیوچار توانسته است رشد خود را در خاک‌های آلوده به‌خوبی ادامه دهد، به‌طوری که میزان بیوماس آن در مقایسه با تیمارهای بیوچار به‌ویژه در خاک با غلظت بالاتر کادمیم تفاوت آماری معنی‌داری نداشته است. این یافته نشان‌دهنده سازگاری بالای این گیاه بومی با شرایط اکولوژیکی منطقه و توانایی آن در تحمل آلودگی‌های ناشی از

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

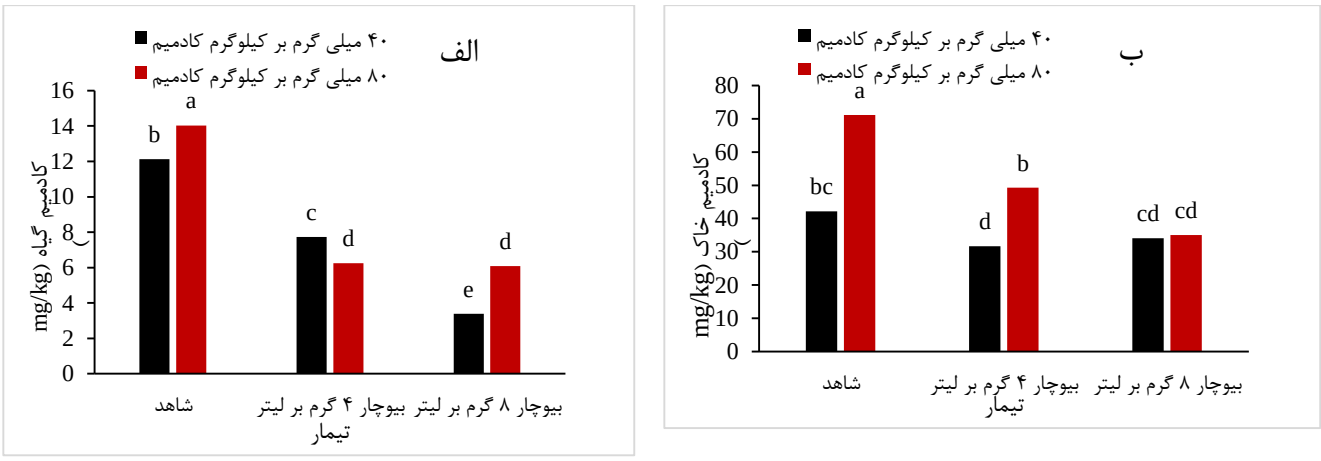
[DOI: 10.61882/jeer.405.1.44]

فلزات سنگین است و پتانسیل قابل‌توجه آن را برای کاربرد در گیاه‌پالایی تأیید می‌کند. در همین راستا، Zibaei و همکاران (2017) گزارش کردند که افزودن مخلوط بیوچار و بقایای گیاهی پوسته برنج به خاک تیمارشده با لجن فاضلاب، تأثیر مثبت و معنی‌داری بر رشد گیاه لوبیا داشت، به‌گونه‌ای که بیشینه وزن خشک گیاه در تیمار ترکیبی بیوچار، بقایای گیاهی و لجن فاضلاب با سطح کاربرد ۱۰۰ گرم در کیلوگرم خاک به‌دست آمد که نسبت به شاهد، رشدی معادل ۴۰/۴ درصد نشان داد. همچنین، در مطالعه‌ای دیگر مشخص شد که دو نوع بیوچار (تولیدشده از کود مرغی و زباله سبز) به‌طور معنی‌داری بیوماس ریشه و ساقه گیاه خردل هندی را افزایش داده‌اند؛ این اثر مثبت عمدتاً ناشی از کاهش سمیت فلزات سنگین از طریق تثبیت آن‌ها در خاک و هم‌زمان بهبود عرضه مواد مغذی بوده است (Hee Park et al., 2011). در پژوهشی دیگر گزارش شد که استفاده از کمپوست حاصل از زباله‌های ماهی منجر به افزایش عملکرد و بیوماس گیاه کاهو یخی گردید (Radziemska et al., 2019). Jalalipour و همکاران (۲۰۱۳) نیز نشان دادند که کاربرد بیوچار باعث بهبود رشد زیست‌توده آفتابگردان شد و بیشترین میزان ارتفاع گیاه، وزن خشک ساقه و ریشه در سطح ۱۵ گرم بیوچار در کیلوگرم خاک و در غیاب کادمیم مشاهده گردید. از سوی دیگر، Valizadeh Ghale Beig و همکاران (2019) گزارش کردند که بیشترین مقادیر صفات مرتبط با سطح برگ، وزن تازه و خشک اندام هوایی و حجم ریشه در سطح ۵ گرم در کیلوگرم بیوچار رُز ثبت شد.

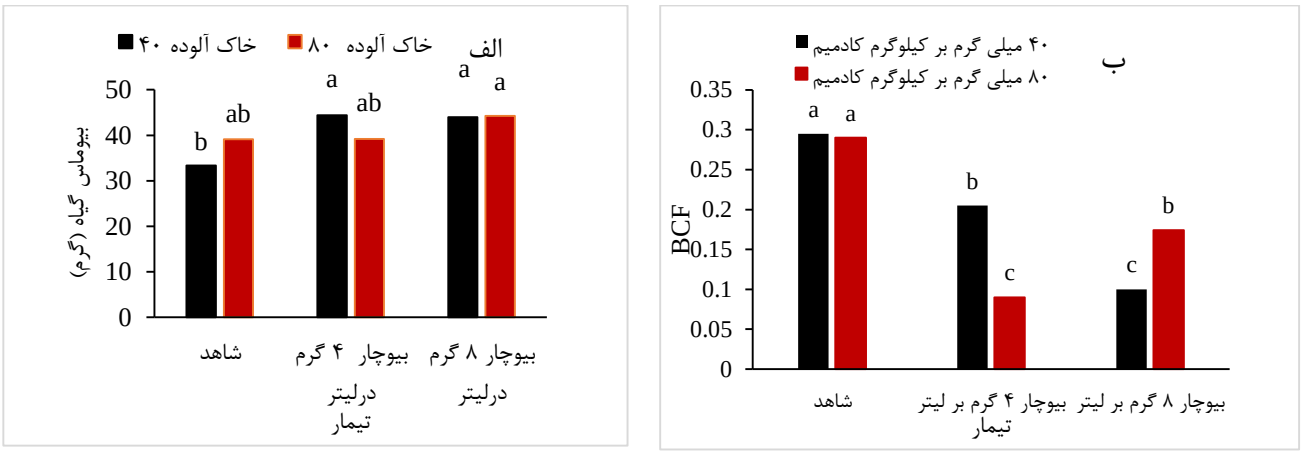
بررسی اثر متقابل خاک آلوده و تیمار بیوچار بر ضریب جذب زیستی (BCF) نشان داد که کمترین مقدار آن (۰/۰۹) در تیمار حاوی ۴ گرم بر لیتر بیوچار و خاک آلوده به ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با سایر ترکیب‌های تیماری داشت. بیشترین مقادیر ضریب جذب زیستی در گیاه، در تیمار شاهد (بدون بیوچار) در هر دو سطح آلودگی (۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم) به‌ترتیب برابر با ۰/۲۹۵ و ۰/۲۹۰ ثبت شد (شکل ۴، ب). حضور بیوچار در خاک منجر به کاهش معنی‌دار ضریب جذب زیستی در گیاه شد که نشان‌دهنده تاثیر مثبت کاربرد بیوچار بر کاهش محتوای کادمیم گیاه (شکل ۳، الف) و به دنبال آن کاهش جذب زیستی آن شده است. در حالی که در تیمار شاهد که فاقد بیوچار بود بیشترین مقدار ضریب جذب زیستی مشاهده گردید که نشان‌دهنده حداکثر جذب کادمیم توسط گیاه در این شرایط است و با نتایج ارائه شده در شکل ۳ (الف) نیز مطابقت دارد. در همین راستا، پژوهشی دیگر نیز کاهش زیست‌فراهمی فلزات سنگین از جمله روی، سرب و کادمیم پس از کاربرد بیوچارهای تولیدشده از بستر چمن و بستر مرغداری در خاک‌های آلوده را گزارش کرده است (Antonangelo & Zhang, 2019). از سوی دیگر، این یافته‌ها توانایی گیاه بذرانداز به‌عنوان یک گونه بومی در جذب آلاینده‌های فلزی از خاک‌های آلوده را تأیید کرده و پتانسیل آن را برای کاربرد در گیاه‌پالایی نشان می‌دهد.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.44]



شکل ۳- مقادیر کادمیم گیاه و خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمارهای مختلف



شکل ۴- بیوماس گیاه (گرم) و ضریب جذب زیستی (BCF) در تیمارهای مختلف

محققان متعددی گزارش کرده‌اند که پارامترهای رشد گیاه، از جمله جوانه‌زنی بذر(Martins et al., 2018)، رشد اندام هوایی و ریشه (Bashir et al., 2017; Yu et al., 2017)، عملکرد محصول (Yu et al., 2017; Nie et al., 2018) و همچنین فعالیت و جمعیت میکروبی خاک (Moore et al., 2018; Ahmad et al., 2016; Wang et al., 2017)، به‌طور قابل‌توجهی در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین تحت تأثیر کاربرد بیوچار بهبود یافته‌اند. به‌طور کلی، استفاده از بیوچار نه‌تنها به افزایش جذب مواد غذایی توسط گیاه کمک می‌کند، بلکه اثرات سمی فلزات سنگین از جمله کادمیم، سرب و نیکل را کاهش داده و همچنین ضریب جذب این آلاینده‌ها در گیاه را پایین می‌آورد.

۳-۳- مقایسه میانگین اثرات متقابل خاک آلوده و تیمار بیوچار بر ویژگی‌های مورد بررسی در خاک:

بررسی اثر متقابل خاک آلوده و تیمار بیوچار در مورد غلظت کادمیم خاک نشان داد که کمترین مقدار کادمیم (۳۱/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار حاوی ۴ گرم بر لیتر بیوچار و خاک آلوده با ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم، و بیشترین مقدار آن (۷۱/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار شاهد خاک آلوده با ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم مشاهده شد (شکل ۳، ب). به‌طور کلی، در تیمارهای حاوی بیوچار در هر دو خاک آلوده، کاهش غلظت کادمیم قابل اندازه‌گیری رخ داده است که نشان‌دهنده تأثیر مثبت بیوچار در کاهش کادمیم خاک است. در یک پژوهش مشابه، تأثیر سطوح مختلف (صفر، ۲ و ۵ درصد) بیوچار حاصل از پوست بادام‌زمینی بر جذب سطحی کادمیم از خاک بررسی

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61882/jeer.405.1.44]

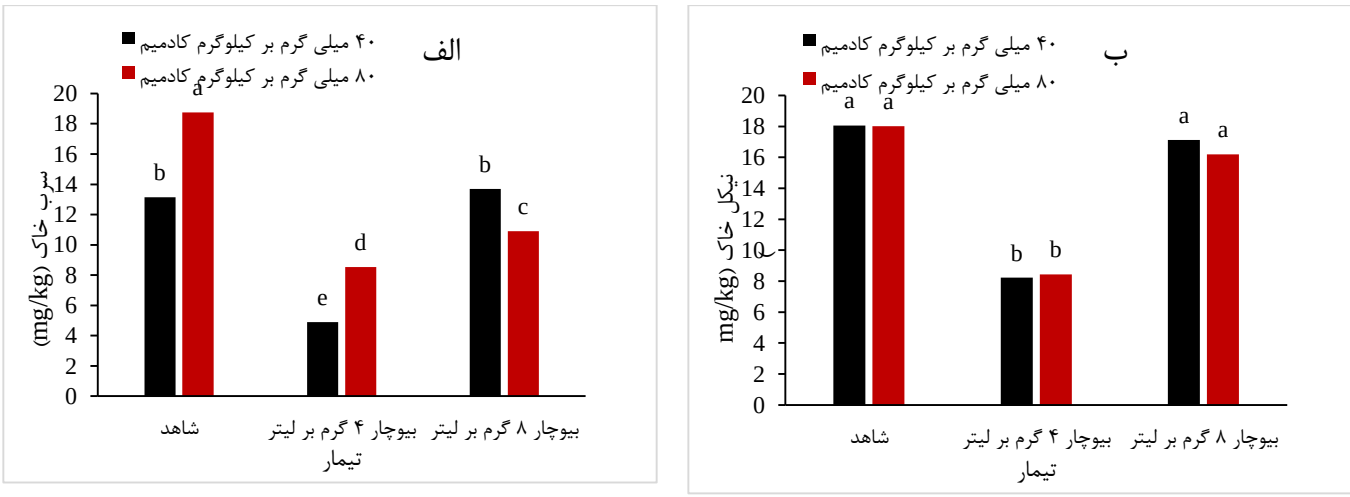
شد و گزارش گردید که با افزایش غلظت بیوچار در خاک، جذب کادمیم توسط بیوچار افزایش یافته و در نتیجه غلظت آن در خاک کاهش می‌یابد(Xu et al., 2017).

بررسی اثر متقابل خاک آلوده و تیمار بیوچار در مورد سرب خاک نیز نشان داد که کمترین مقادیر سرب (به‌ترتیب ۴/۹ و ۸/۵۴میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار ۴ گرم بر لیتر بیوچار در خاک‌های آلوده با ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم مشاهده شد (شکل ۵، الف). این یافته بیانگر تأثیر مثبت بیوچار در غلظت ۴ گرم بر لیتر در کاهش سرب خاک است . در تیمار ۸ گرم بر لیتر بیوچار نیز در خاک آلوده با ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم ، مقدار سرب خاک نسبت به شاهد کاهش معنی‌دار داشته است (شکل ۵، الف). این یافته نشان دهنده تاثیر کاهنده بیوچار بر سرب خاک در شرایط آلودگی زیاد به فلزات سنگین، مانند کادمیم، است، چراکه بیوچار توانسته هم سرب هم کادمیم خاک را (شکل ۳، ب) به طور موثری نسبت به شاهد (بدون تیمار بیوچار) کاهش دهد. در پژوهشی مشاهده شد که افزودن بیوچار منجر به افزایش pH و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک گردیده و جذب سطحی سرب را نسبت به تیمار شاهد افزایش داده است (Jiang et al., 2012). همچنین، در مطالعه‌ای دیگر، بیوچارهای تولیدشده از پوسته برنج و هسته زیتون در حذف یون‌های Cu^{2+} و Pb^{2+} مؤثر بوده‌اند و بهبود رشد گیاه در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین را نشان داده‌اند. این یافته‌ها بیانگر پتانسیل بالای بیوچار برای اصلاح و بازیابی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین است (Campos & de la Rosa, 2020) .

بررسی اثر متقابل خاک آلوده و تیمار بیوچار در مورد محتوای نیکل خاک نشان داد که کمترین مقادیر نیکل خاک در تیمار حاوی ۴ گرم بر لیتر بیوچار (به‌ترتیب ۸/۲۲ و ۸/۴۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در خاک‌های آلوده با ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم مشاهده شد. در مقابل، بیشترین مقادیر نیکل خاک در تیمار شاهد (فاقد بیوچار) گزارش گردید (شکل ۵، ب). این یافته، همانند روند مشاهده‌شده برای سرب خاک، نشان‌دهنده تأثیر مثبت کاربرد بیوچار در سطح ۴ گرم بر لیتر در کاهش غلظت نیکل خاک است؛ به‌طوری‌که در تیمار شاهد، که هیچ مقدار بیوچاری دریافت نکرده بود، محتوای نیکل خاک به بیشترین مقدار خود رسید. از سوی دیگر، به نظر می‌رسد که تیمار ۸ گرم بر لیتر بیوچار اثر معنی‌داری بر کاهش مقدار نیکل خاک نسبت به شاهد نداشته است.Rahimi و همکاران (۲۰۱۹) نیز در مطالعه‌ای مشابه گزارش کردند که بیوچار دارای ظرفیت تبادل کاتیونی بالایی است که توانایی جذب و تثبیت نیکل در ماتریس خاک را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، فرآیند تولید بیوچار در دماهای بالا (معمولاً بالای $400\ ^{\circ}C$) سبب افزایش سطح ویژه آن می‌شود. این سطح ویژه گسترده همراه با ظرفیت بالای جذب سطحی، باعث ایجاد محیطی مناسب برای جامعه میکروبی در خاک‌های سمی می‌گردد و از این طریق، تحرک فلزات سنگین از جمله نیکل را در خاک محدود کرده و زیست‌فرایندی آن‌ها را کاهش می‌دهد (Zhang et al., 2019).

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.44]

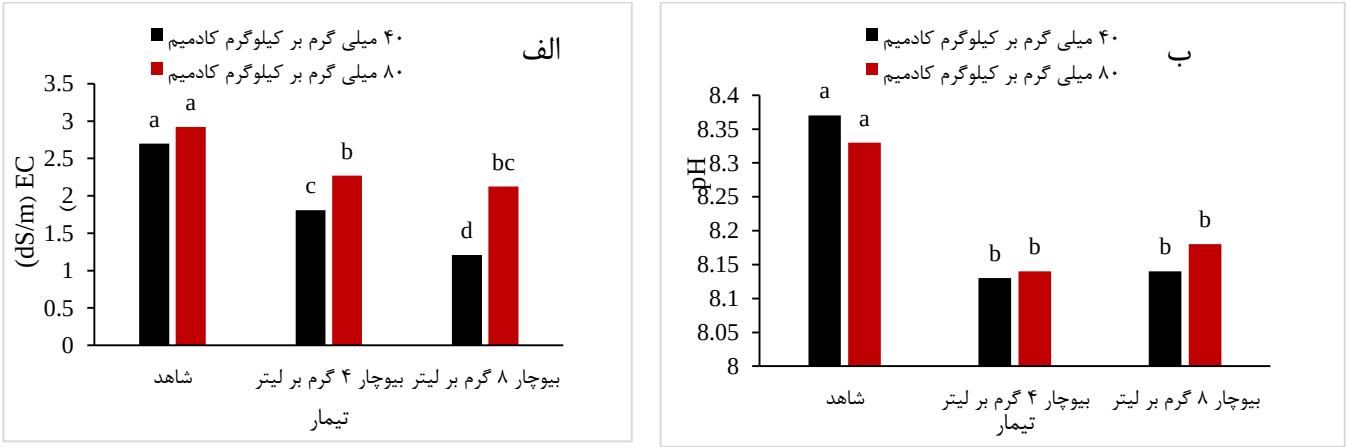


شکل ۵- مقادیر نیکل و سرب خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمارهای مختلف

بررسی اثر متقابل خاک آلوده و تیمار بیوچار، در مورد هدایت الکتریکی (EC) خاک و اسیدیته (pH) خاک نشان داد که بیشترین مقادیر این پارامترها در شاهد در هر دو خاک آلوده با ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم مشاهده شده است (شکل۶). در تیمارهای بیوچار مقدار EC و pH خاک نسبت به شاهد کاهش معنی‌دار پیدا کرده است که ممکن است به دلیل ویژگی‌های بیوچار حاصل از ضایعات میگو باشد که توانسته هدایت الکتریکی و اسیدیته خاک را کمتر کند. به نظر می‌رسد در این مطالعه، کاهش معنی‌دار هدایت الکتریکی خاک در تیمارهای حاوی بیوچار را می‌توان به اثر هم‌افزایی بین کشت گیاه، بهبود ساختار خاک و آبیاری نسبت داد. بیوچار با ایجاد منافذ و اصلاح ساختار خاک، انتقال مواد محلول را تسهیل کرده و در نتیجه با افزایش نفوذپذیری و جریان آب در خاک، فرآیند آبشویی یون‌های نمکی را تقویت کرده و منجر به کاهش غلظت نمک‌ها و در پی آن کاهش هدایت الکتریکی خاک شده است، این موضوع با یافته‌های Moshtagh و همکاران (۲۰۲۲) که بیوچار را به عنوان عاملی مؤثر در تغییرات میکروسکوپی و مورفولوژیکی خاک و افزایش نفوذپذیری معرفی می‌کنند، همخوانی دارد. در این مطالعه، کاهش معنی‌دار pH خاک در تیمارهای حاوی بیوچار نیز قابل توجه است. این امر زمانی قابل تبیین می‌شود که pH بیوچار مورد استفاده حاصل از ضایعات میگو در حدود ۷/۸۶ گزارش شده است (جدول ۱)؛ در حالی که pH خاک پایه در شرایط اولیه بالاتر از این مقدار بوده است. از این رو، افزودن بیوچاری با pH پایین‌تر نسبت به خاک، سبب تعدیل قلیایی‌بودن محیط خاک و در نتیجه کاهش هدایت الکتریکی و pH خاک شده است. این یافته بر این نکته مهم دلالت دارد که اثر بیوچار بر pH خاک صرفاً به جهت قلیایی بودن آن محدود نمی‌شود، بلکه به ویژگی‌های ذاتی بیوچار و همچنین شرایط اولیه خاک به ویژه سطح قلیایی آن نیز وابسته است. در خاک‌هایی با pH بالا (خنثی تا قلیایی)، کاربرد بیوچاری با pH متوسط می‌تواند منجر به کاهش نسبی pH خاک شود، در حالی که همین بیوچار در خاک‌های اسیدی ممکن است اثر بافری و افزایش‌دهنده pH داشته باشد (Gomez et al., 2019). بنابراین، کاهش pH مشاهده‌شده در این آزمایش، نتیجه تعامل هوشمندانه بین ویژگی‌های شیمیایی بیوچار و شرایط اولیه خاک قلیایی مورد مطالعه است. در مقابل، در پژوهش Hamzaei و همکاران (۲۰۱۲) مشاهده شده است که کاربرد بیوچار موجب افزایش EC خاک شده و در پی آن فراهمی عنصر کادمیم در خاک نیز افزایش یافته است، که این به نوبه خود تأثیر منفی بیوچار بر خاک‌های آلوده محسوب شده است. در پژوهش دیگری

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61882/jeer.405.1.44]

گزارش شده است که با افزودن بیوچار به خاک، افزایش pH و کربن آلی خاک رخ داده که منجر به عدم تحرک کادمیم و مس و افزایش تثبیت آن‌ها در خاک شده و درنتیجه غلظت این عناصر در گیاه خردل هندی کاهش یافته است (Beesley et al., 2010). Gholami& Rahimi (۲۰۲۰) نتیجه گرفتند که بیوچار تفاله هویج با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و تعدیل اسیدیته خاک اسیدی، سبب افزایش جذب سطحی و کاهش زیست‌فرایندی کادمیم و سرب در خاک می‌گردد و از بیوچار تفاله گیاه هویج می‌توان به‌عنوان یک ماده جاذب مؤثر و ارزان جهت اصلاح خواص خاک اسیدی و کاهش زیست‌فرایندی فلزات سنگین در این نوع خاک استفاده نمود. به طور مشابه، در تحقیق دیگری کاربرد بیوچار حاصل از کاه برنج سبب افزایش اسیدیته و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک گردیده و جذب سطحی سرب را نسبت به تیمار شاهد افزایش داده است (Jiang et al., 2012). لازم به ذکر است که ویژگی‌های بیوچار تولید شده از منابع مختلف می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر عملکرد آن در خاک تأثیرگذار باشد.



شکل ۶- مقادیر pH و EC (دسی‌زیمنس بر متر) در تیمارهای مختلف خاک

4- نتیجه‌گیری

به طور کلی در این مطالعه، تاثیر مثبت بیوچار حاصل از ضایعات میگو بر خاک‌های آلوده به کادمیوم مشاهده شد و نشان داد که کاربرد بیوچار ضایعات میگو در غلظت ۴ گرم بر لیتر توانست به‌طور معنی‌داری جذب کادمیم توسط گیاه بذرانداز (*Sporobolus arabicus*) را کاهش داده و ویژگی‌های خاک آلوده را بهبود بخشد. یافته‌های حاضر با پژوهش Antonangelo and Zhang (2019) همخوانی دارد که کاربرد بیوچارهای زیست‌توده‌ای (بستر چمن و مرغداری) را در کاهش زیست‌فراهمی کادمیم، سرب و روی در خاک‌های آلوده تأیید کرده است. همچنین، نتایج با مطالعه Xu و همکاران (2017) مطابقت دارد که افزایش غلظت بیوچار پوست بادام‌زمینی (تا ۵٪) را با کاهش غلظت کادمیم در خاک مرتبط دانسته است. نوآوری این پژوهش در تلفیق سه جزء کلیدی است: (۱) تولید بیوچار از ضایعات میگو به عنوان منبع بومی و فراوان در مناطق ساحلی جنوب ایران که همزمان چالش مدیریت پسماند آبزی‌پروری و آلودگی فلزی را حل می‌کند؛ (۲) به‌کارگیری گیاه بذرانداز به‌عنوان گونه‌ای بومی، شورپسند و سازگار با اکوسیستم‌های ساحلی خلیج فارس؛ و (۳) طراحی و ارزیابی پروتکلی بهینه از نظر هزینه و پایداری اکولوژیک برای احیای خاک‌های شور و آلوده در نواحی ساحلی گرمسیر، با اولویت‌بندی پتانسیل‌های گیاهی بومی منطقه چراکه تاکنون پژوهش‌های مدونِ کمی با

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61882/jeer.405.1.44]

تمرکز بر پیچیدگی‌های منحصربه‌فردِ تنش‌های توأمان شوری و آلودگی انجام شده است. این رویکرد، علاوه بر کارایی فنی، پتانسیل اقتصادی و زیست‌محیطی قابل تعمیم به سایر مناطق ساحلی در حال توسعه را داراست

منابع:

1. Ahmad, M., Ok, Y. S., Kim, B. Y., Ahn, J. H., Lee, Y. H., Zhang, M., Moon, D. H., Al-Wabel, M. I., & Lee, S. S. (2016). Impact of soybean stover- and pine needle-derived biochars on Pb and As mobility, microbial community, and carbon stability in a contaminated agricultural soil. Journal of Environmental Management, 166, 131–139. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.10.014
2. Ahmad, P., & Sharma, S. (2010). Physio-biochemical attributes in two cultivars of mulberry (Morus alba L.) under $NaHCO_3$ stress. International Journal of Plant Production, 4(2), 173–186.
3. Al-Wabel, M. I., Usman, A. R. A., El-Naggar, A. H., Aly, A. A., Ibrahim, M., Elmaghraby, S., & Al-Omran, A. (2015). Conocarpus biochar as a soil amendment for reducing heavy metal availability and uptake by maize plants. Saudi Journal of Biological Sciences, 22(4), 503–511. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.11.009
4. Antonangelo, J. A., & Zhang, H. (2019). Heavy metal phytoavailability in a contaminated soil of northeastern Oklahoma as affected by biochar amendment. Environmental Science and Pollution Research, 26(33), 33582–33593. https://doi.org/10.1007/s11356-019-06463-5
5. Baghaie, A. (2018). Interaction effect of municipal waste compost and pistachio residues biochar on decreasing cadmium stress in shallot (A case study: Zarandieh municipal waste compost). Journal of Health, 9(3), 277–290. http://healthjournal.arums.ac.ir/article-1-1558-fa.html [In Persian]
6. Banat, K. M., Howari, F. M., & Al-Hamada, A. A. (2005). Heavy metals in urban soils of central Jordan: Should we worry about their environmental risks? Environmental Research, 97(3), 258–273. https://doi.org/10.1016/j.envres.2004.02.011
7. Bashir, S., Hussain, Q., Akmal, M., Riaz, M., Hu, H., Ijaz, S. S., Iqbal, M., Abro, S., Mehmood, S., & Ahmad, M. (2018). Sugarcane bagasse-derived biochar reduces the cadmium and chromium bioavailability to mash bean and enhances the microbial activity in contaminated soil. Journal of Soils and Sediments, 18(2), 874–886. https://doi.org/10.1007/s11368-017-1824-7
8. Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., Gómez-Eyles, J. L., Harris, E., Robinson, B., & Sizmur, T. (2010). A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. Environmental Pollution, 159(12), 3269–3282. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.07.023
9. Bian, R., Joseph, S., Cui, L., Pan, G., Li, L., Liu, X., Zhang, A., Rutlidge, H., Wong, S., Chia, C., Marjo, C., Gong, B., Munroe, P., & Donne, S. (2014). A three-year experiment confirms continuous immobilization of cadmium and lead in a contaminated paddy field with biochar amendment. Journal of Hazardous Materials, 272, 121–128. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.03.017
10. Campos, P., & De la Rosa, J. M. (2020). Assessing the effects of biochar on the immobilization of trace elements and plant development in a naturally contaminated soil. Sustainability, 12(15), 6025. https://doi.org/10.3390/su12156025
11. Carter, S., Shackley, S., Sohi, S., Suy, T. B., & Haefele, S. M. (2013). The impact of biochar application on soil properties and plant growth of lettuce (Lactuca sativa) and cabbage (Brassica chinensis). Agronomy, 3(2), 404–418. https://doi.org/10.3390/agronomy3020404
12. Corwin, D. L., & Yemoto, K. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In D. L. Sparks (Ed.), Methods of soil analysis: Part 3—Chemical methods (pp. 417–462). Soil Science Society of America.
13. Cosio, C., Martinoia, E., & Keller, C. (2004). Hyperaccumulation of cadmium and zinc in Thlaspi caerulescens and Arabidopsis halleri at the leaf cellular level. Plant Physiology, 134(2), 716–725. https://doi.org/10.1104/pp.103.035840

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.44]

14. Cui, L., Li, L., Zhang, A., Pan, G., Bao, D., & Chang, A. (2011). Biochar amendment greatly reduces rice Cd uptake in a contaminated paddy soil: A two-year field experiment. BioResources, 6(3), 2605–2618.
15. Enaime, G., Baçaoui, A., Yaacoubi, A., & Lübken, M. (2020). Biochar for wastewater treatment: Conversion technologies and applications. Applied Sciences, 10(10), 3492. https://doi.org/10.3390/app10103492
16. Facchinelli, A., Sacchi, E., & Mallen, L. (2001). Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils. Environmental Pollution, 114(2), 313–324. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00243-8
17. Ferronato, N., & Torretta, V. (2019). Waste mismanagement in developing countries: A review of global issues. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(6), 1060. https://doi.org/10.3390/ijerph16061060
18. Feyzi, K., Amirinejad, A. A., & Ghobadi, M. (2021). The effects of biochar and salicylic acid on reducing Pb-induced stress in basil crop (Ocimum basilicum L.). Iranian Journal of Soil and Water Research, 52(2), 539–547. https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.313282.668795
19. Gholami, L., & Rahimi, G. (2020). The effect of carrot pulp derived biochar on the adsorption of cadmium and lead in an acidic soil. Journal of Water and Soil Conservation, 27(2), 1–23. https://doi.org/10.22069/jwsc.2020.16807.3230
20. Gómez, J. L., Sizmur, T., Collins, M., & Hodson, M. E. (2011). Effects of biochar and the earthworm Eisenia fetida on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons and potentially toxic elements. Environmental Pollution, 159(3), 616–622. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.09.037
21. Hamzaei, A., Lakzian, A., Astaraei, A. R., & Fotouh, A. (2012). Effect of biochar and wastewater on DTPA-extractable cadmium concentration in soil and mung bean (*Vigna radiata*) growth [Paper presentation]. *3rd National Conference on Integrated Water Resources Management*, Mashhad, Iran.
22. Hejazizadeh, A., Gholamalizadeh Ahangar, A., & Ghorbani, M. (2016). Effect of biochar on lead and cadmium uptake from applied paper factory sewage sludge by sunflower (Helianthus annuus L.). Water and Soil Science, 26(1–2), 259–271. [In Persian]
23. Houben, D., Evrard, L., & Sonnet, P. (2013). Beneficial effects of biochar application to contaminated soils on the bioavailability of Cd, Pb, and Zn and the biomass production of rapeseed (Brassica napus L.). Biomass and Bioenergy, 57, 196–204. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.07.014
24. Hu, Y., Liu, X., Bai, J., Shih, K., Zeng, E. Y., & Cheng, H. (2013). Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that underwent rapid industrialization and urbanization. Environmental Pollution, 181, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.05.037
25. Jalalipour, S., Gholamalizadeh Ahangar, A., & Lakzian, A. (2013). Effect of biochar application on quantitative characteristics of sunflower (*Helianthus annuus*) in cadmium-contaminated soils [Paper presentation]. *2nd National Conference on New Approaches in Agriculture*, Mashhad, Iran.
26. Jia, L., Wang, W., Li, Y., & Yang, L. (2010). Heavy metals in soil and crops of an intensively farmed area: A case study in Yucheng city, Shandong province, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 7(2), 395–412. https://doi.org/10.3390/ijerph7020395
27. Jiang, J., Xu, R., Jiang, T., & Li, Z. (2012). Immobilization of Cu(II), Pb(II), and Cd(II) by the addition of rice straw-derived biochar to a simulated polluted Ultisol. Journal of Hazardous Materials, 229–230, 145–150. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.05.063
28. Khan, M. I., Fatma, M., Per, T. S., Anjum, N. A., & Khan, N. A. (2015). Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. Frontiers in Plant Science, 6, 462. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00462
29. Kim, K. H., Kim, J.-Y., Cho, T.-S., & Choi, J. W. (2012). Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (Pinus rigida). Bioresource Technology, 118, 158–162. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.031

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.44]

30. Lehmann, J., Gaunt, J., & Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—A review. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 11(2), 403–427. https://doi.org/10.1007/s11027-005-9006-5
31. Liu, T., Liu, B., & Zhang, W. (2014). Nutrients and heavy metals in biochar produced by sewage sludge pyrolysis: Its application in soil amendment. Polish Journal of Environmental Studies, 23(1), 271–275.
32. Lone, M. I., He, Z., Stoffella, P. J., & Yang, X. (2008). Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: Progresses and perspectives. Journal of Zhejiang University SCIENCE B, 9(3), 210–220. https://doi.org/10.1631/jzus.B0700060
33. Martins, G. C., Penido, E. S., Alvarenga, I. F. S., Teodoro, J. C., Bianchi, M. L., & Guilherme, L. R. G. (2018). Amending potential of organic and industrial by-products applied to heavy metal-rich mining soils. Ecotoxicology and Environmental Safety, 162, 581–590. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.06.075
34. Moore, F., González, M. E., Khan, N., Curaqueo, G., Sanchez-Monedero, M., Rillig, M. C., Morales, E., Panichini, M., Mutis, A., & Jorquera, M. (2018). Copper immobilization by biochar and microbial community abundance in metal-contaminated soils. Science of the Total Environment, 616–617, 960–969. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.192
35. Moshtagh, R., Moradi, N., & Gholami, H. (2022). Investigation of the role of biochar from eggplant plant residues and shrimp waste on some soil stability characteristics. Environmental Erosion Research, 12(1), 1–17. https://doi.org/10.22034/jdmal.2022.563479.1398 [In Persian]
36. Motaghian, H. R., Kabiri, P., & Hosseinpur, A. (2018). Phytoremediation potential of maize (Zea mays L.) using biochars produced from walnut leaves in a contaminated soil. Journal of Water and Soil Conservation, 25(4), 133–152. https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.14953.3008
37. Moyo, M., Lindiwe, S. T., Sebata, E., Nyamunda, B. C., & Guyo, U. (2016). Equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies on biosorption of Cd(II) from aqueous solution by biochar. Research on Chemical Intermediates, 42(2), 1349–1362. https://doi.org/10.1007/s11164-015-2183-7
38. Najafi, Z., Golchin, A., Alamdari, P., & Askari, M. S. (2020). The effects of chitosan composites on the concentrations of cadmium and some nutrients of lettuce plant. Iranian Journal of Soil and Water Research, 51(7), 1605–1622. https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.295558.668468 [In Persian]
39. Namgay, T., Singh, B., & Singh, B. P. (2010). Influence of biochar application to soil on the availability of As, Cd, Cu, Pb, and Zn to maize (Zea mays L.). Soil Research, 48(7), 638–647. https://doi.org/10.1071/SR10049
40. O'Connor, D., Peng, T., Zhang, J., Tsang, D. C. W., Alessi, D. S., Shen, Z., Bolan, N. S., & Hou, D. (2018). Biochar application for the remediation of heavy metal polluted land: A review of in situ field trials. Science of the Total Environment, 618, 815–826. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.063
41. Pagotto, C., Rémy, N., Legret, M., & Le Cloirec, P. (2001). Heavy metal pollution of road dust and roadside soil near a major rural highway. Environmental Technology, 22(3), 307–319. https://doi.org/10.1080/09593332208618270
42. Paz-Ferreiro, J., Lu, H., Fu, S., Méndez, A., & Gascó, G. (2014). Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: A review. Solid Earth, 5(1), 65–75. https://doi.org/10.5194/se-5-65-2014
43. Radziemska, M., Vaverková, M. D., Adamcová, D., Brtnický, M., & Mazur, Z. (2019). Valorization of fish waste compost as a fertilizer for agricultural use. Waste and Biomass Valorization, 10(9), 2537–2545. https://doi.org/10.1007/s12649-018-0273-2
44. Rahimi, T., Moezzi, A., & Hojatti, S. (2019). Effect of biochar and nickel levels on concentration of nickel and some micronutrients in corn. Iranian Journal of Soil Research, 32(4), 527–536. https://doi.org/10.22092/ijsr.2019.118560 [In Persian]
45. Ryan, J., Estefan, G., & Rashid, A. (2007). Soil and plant analysis laboratory manual (2nd ed.). International Center for Agricultural Research in the Dry Areas.
46. Sekabira, K., Oryem-Origa, H., Mutumba, G., Kakudidi, E., & Basamba, T. A. (2011). Heavy metal phytoremediation by Commelina benghalensis (L.) and Cynodon dactylon (L.) growing in urban stream sediments. International Journal of Plant Physiology and Biochemistry, 3(8), 133–142.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.44]

47. Sharma, P., & Dubey, R. S. (2005). Lead toxicity in plants. Brazilian Journal of Plant Physiology, 17(1), 35–52. https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100004
48. Szalinska, E., Ganczarczyk, K., Fryer, B. J., & Haffner, G. D. (2006). Distribution of heavy metals in sediments of the Detroit River. Journal of Great Lakes Research, 32(3), 442–454. https://doi.org/10.3394/0380-1330(2006)32[442:DOHMIS]2.0.CO;2
49. Tan, X., Liu, Y., Gu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Sun, Z., & Yang, Z. (2015). Immobilization of Cd(II) in acid soil amended with different biochars with a long term of incubation. Environmental Science and Pollution Research, 22(16), 12597–12604. https://doi.org/10.1007/s11356-015-4549-8
50. Valizadeh Ghale Beig, A., Nemati, S. H., Emami, H., & Aroie, H. (2019). The effect of cutflower-rose waste biochar on morphological traits and heavy metals in lettuce (Lactuca sativa L. cv. Syaho). Journal of Soil and Plant Interactions, 10(4), 21–35. https://doi.org/10.47176/jspi.10.4.10573
51. Wang, N., Xue, X., Juhasz, A. L., Chang, Z., & Li, H. (2017). Biochar increases arsenic release from an anaerobic paddy soil due to enhanced microbial reduction of iron and arsenic. Environmental Pollution, 220(Pt A), 514–522. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.089
52. Woldetsadik, D., Drechsel, P., Keraita, B., Marschner, B., Itanna, F., & Gebrekidan, H. (2016). Effects of biochar and alkaline amendments on cadmium immobilization, selected nutrient and cadmium concentrations of lettuce (Lactuca sativa) in two contrasting soils. SpringerPlus, 5(1), 397. https://doi.org/10.1186/s40064-016-2032-z
53. Wong, S. C., Li, X. D., Zhang, G., Qi, S. H., & Min, Y. S. (2002). Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta, South China. Environmental Pollution, 119(1), 33–44. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00303-1
54. Xu, M., Wu, J., Luo, L., Yang, G., Zhang, X., Peng, H., Yu, X., & Wang, L. (2018). The factors affecting biochar application in restoring heavy metal-polluted soil and its potential applications. Chemistry and Ecology, 34(3), 177–197. https://doi.org/10.1080/02757540.2017.1410543
55. Xu, C., Chen, H., Xiang, X., Zhu, H., Wang, S., Zhu, Q., Huang, D., You, H., & Zhu, Y. (2018). Effect of peanut shell and wheat straw biochar on the availability of Cd and Pb in a soil–rice (Oryza sativa L.) system. Environmental Science and Pollution Research, 25(2), 1147–1156. https://doi.org/10.1007/s11356-017-0591-6
56. Yu, Z., Qiu, W., Wang, F., Lei, M., Wang, D., & Song, Z. (2017). Effects of manganese oxide-modified biochar composites on arsenic speciation and accumulation in an indica rice (Oryza sativa L.) cultivar. Chemosphere, 168, 341–349. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.118
57. Zhang, M., Shan, S., Chen, Y., Wang, F., Yang, D., Ren, J., Lu, H., Ping, L., & Chai, Y. (2019). Biochar reduces cadmium accumulation in rice grains in a tungsten mining area—Field experiment: Effects of biochar type and dosage, rice variety, and pollution level. Environmental Geochemistry and Health, 41(1), 43–52. https://doi.org/10.1007/s10653-018-0122-7
58. Zacchini, M., Pietrini, F., Mugnozza, G. S., Iori, V., Pietrosanti, L., & Massacci, A. (2009). Metal tolerance, accumulation, and translocation in poplar and willow clones treated with cadmium in hydroponics. Water, Air, and Soil Pollution, 197(1–4), 23–34. https://doi.org/10.1007/s11270-008-9788-7
59. Zibaei, Z., Ghasemi, R., & Ostovar, P. (2017). Effects of rice husk biochar and residues on growth and chemical composition of bean in a sewage sludge-treated calcareous soil. Journal of Natural Environment, 70(4), 869–880. https://doi.org/10.22059/jne.2017.224190.1305

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.44]