

Investigating the effect of carbon black on chemical fractions of lead and some physical properties of soil

ABSTRACT

Heavy metals exist in soil in various chemical forms, and this distribution of chemical forms affects their reactivity, dynamics, and bioavailability. To investigate the effect of carbon black on the chemical distribution of lead and some physical properties of soil in contaminated soil, an experiment was conducted as a factorial in a completely randomized design with 3 contamination levels (0, 50, and 100 mg/kg) and 4 carbon black levels (0, 1, 2, and 4 % W/W) in 4 replications. Chemical fractions of lead was determined by Tessier method. Some physical properties of the soil, including the mean weight diameter (MWD) of soil aggregates and soil moisture at suctions of 0.1, 0.3, 0.5, 5, and 15 bars, were measured in different treatments. The application of carbon black significantly reduced lead in the exchangeable fraction by 4.49% and significantly increased other forms of lead in the soil (carbonates, bound to iron-manganese oxides, bound to organic matter, and residual). The highest soil aggregate stability was related to the 4% carbon black treatment, which increased aggregate stability by 21.05% compared to the control. It also significantly increased soil moisture at different suctions, except for the 15 bar suction. In general, it can be concluded that adding carbon black to the soil causes the transformation of elements from an unstable form (exchangeable form) to stable forms (forms bound to oxides and organic matter and residual), resulting in reduced metal mobility in the soil.

Keywords: *Chemical fractionation, Lead, Carbon black, Soil physical properties*

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Soil contamination with heavy metals, particularly lead, poses a global challenge with detrimental effects on human health and ecosystems. Traditional methods for removing heavy metals from soil are often costly and environmentally disruptive. Therefore, development of novel and sustainable approaches for stabilizing and reducing the bioavailability of lead in soil is of paramount importance. Carbon black, an industrial byproduct with a high specific surface area and strong adsorption properties, has garnered significant attention as a promising soil amendment. This study investigates the effect of carbon black on chemical fractions of lead, aggregate stability, and soil moisture retention curve in lead-contaminated soils, with the aim of gaining a better understanding of the role of this material in reducing the risks associated with lead contamination and improving soil quality.

Purpose

This research is conducted to investigate the effect of carbon black on chemical fractions of lead and some physical properties of soil.

Research Method

To investigate the effect of carbon black on chemical fractions of lead and some physical properties of soil, an experiment was conducted in a factorial design with a completely randomized layout involving two factors. The factors included lead (zero (control), 50, and 100 mg per kg from lead nitrate) and carbon black (zero (control), 1%, 2%, and 4% w/w). The required amount of soil for the study was collected from a depth of 0 to 30 centimeters. The chemical fractions of lead was measured using the Tessie sequential extraction procedures method and atomic absorption spectrometry. The mean weight diameter (MWD) of soil aggregates was evaluated using mechanical shaker and soil moisture at suctions of 0.1, 0.3, 0.5, 5, and 15 bars were measured using pressure plates for determination of soil moisture retention curve. Subsequently, using the Van Genuchten-Mualem model in the RETC software, the moisture content of the soil samples in different treatments was estimated at various potentials. Data analysis for this experiment was performed using SAS software. Averages were compared using Tukey's method at a significance level of 5%. Excel software was used to create the charts.

Results

Carbon black application significantly reduced extractable lead compared to the control. Carbon black application caused a notable change in the chemical fractions of lead in the soil. Specifically, increasing carbon black levels at 1, 2 and 4% resulted in an increase in stable and less/unavailable forms of lead (bound to iron-manganese oxides, bound to organic matter, and residual) and a decrease in readily available forms of lead (soluble and exchangeable) compared to the control. These changes is related to reduce risk of lead transfer into the food chain. Furthermore, carbon black, particularly at the 4% level, improved soil aggregate stability. The soil

water retention curve was also affected by carbon black, increasing the water holding capacity of the soil. These positive changes can contribute to improved soil structure.

Conclusion

The results of this study indicate that carbon black can be used as an effective amendment for lead-contaminated soils. By changing the chemical fractions of lead, improving soil aggregate stability, and increasing water retention capacity, carbon black can help reduce the environmental risks associated with lead and improve soil quality. These findings could be utilized in the development of sustainable strategies for managing contaminated soils and protecting natural resources.

Author Contributions

Conceptualization, N.M and N.R.; methodology, N.M, N.R, N.E and M.A.; software, N.R, N.E and M.A.; validation, N.R, N.E and M.A.; formal analysis, N.M; investigation, N.R, N.E and M.A.; resources, N.R, N.E and M.A.; data curation, N.M.; writing-original draft preparation, N.M.; writing-review and editing, N.R, N.E and M.A.; visualization, N.R.; supervision, N.R.; project administration, N.R.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data will be made available on request.

Acknowledgements

The authors are thankful to the Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan for providing the research facilities needed for this study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

بررسی اثر دوده کربن بر توزیع شیمیایی سرب و برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک

چکیده

فلزات سنگین به شکل‌های شیمیایی مختلف در خاک حضور دارند که این موضوع بر واکنش‌پذیری، پویایی و فراهمی زیستی آن‌ها تأثیرگذار است. به منظور بررسی اثر دوده کربن بر توزیع شیمیایی سرب و برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک در خاک آلوده به سرب، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با ۳ سطح آلودگی (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم) و ۴ سطح دوده کربن (صفر، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی) در ۴ تکرار انجام شد. توزیع شیمیایی سرب در خاک به روش تیسر تعیین گردید. برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک از جمله میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD) و رطوبت خاک در مکش‌های ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۱۵ بار در تیمارهای مختلف اندازه‌گیری شد. کاربرد دوده کربن موجب کاهش معنی‌دار سرب در بخش تبدلی به مقدار ۴/۴۹ درصد و افزایش معنی‌دار دیگر شکل‌های سرب در خاک (کربناته، متصل به اکسید آهن-منگنز، متصل به ماده آلی و باقیمانده) گردید. بیشترین پایداری خاکدانه مربوط به تیمار ۴ درصد دوده کربن بود و دوده کربن در این سطح، پایداری خاکدانه را ۲۱/۰۵ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد؛ همچنین موجب افزایش معنی‌دار رطوبت خاک در مکش‌های مختلف به جزء مکش ۱۵ بار گردید. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که افزودن دوده کربن به خاک، موجب تغییر شکل شیمیایی سرب از شکل ناپایدار (قابل تبادل) به اشکال با پایداری بیشتر مانند متصل به اکسیدها، ماده آلی و باقیمانده می‌گردد و در نتیجه تحرک فلز در خاک کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: توزیع شیمیایی، سرب، دوده کربن، ویژگی‌های فیزیکی خاک

مقدمه

آلودگی خاک به فلزات سنگین به علت اثرات نامطلوب بر سلامت زیست بوم و امنیت غذایی، به یک نگرانی جهانی تبدیل شده است. فلزات سنگین از نظر زیستی غیرقابل تجزیه می‌باشند و می‌توانند به مدت طولانی در محیط باقی مانده و توسط گیاهان جذب و وارد زنجیره غذایی انسان گردند (بقائی و میرزایی، ۱۳۹۸). تقریباً ۲۰ میلیون هکتار از زمین‌های کشاورزی در سرتاسر جهان توسط فلزات سنگین آلوده شده‌اند (Liu et al., 2018). قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض فلزات سنگین می‌تواند منجر به بدخیمی‌ها، اختلالات خواب و غیره شود (Zhang et al., 2022). سرب همانند بیشتر فلزات سنگین بسیار سمی بوده و برخلاف آلاینده‌های آلی، غیرقابل تجزیه است و تمایل دارد در بافت‌های سلولی موجودات زنده تجمع یابد (Zhang and Zhang, 2022; Shi et al., 2009)؛ به طوری که با تجمع در سلول‌های گیاهی منجر به ایجاد اختلال در فعالیت‌های متابولیکی از جمله فعالیت‌های فیزیولوژیکی، زیستی، فتوسنتز، تأخیر رشد، کلروز، کاهش عملکرد، ریزش زودرس برگ، از دست دادن فعالیت آنزیم‌ها و حتی مرگ گیاه می‌گردد (Sharma et al., 2020). این فلز، نقش بیولوژیکی مشخصی در جانداران ندارد و در محیط زیست یکی از پایداری‌ترین و مقاوم‌ترین آلاینده‌ها محسوب می‌شود. میزان تحرک و پتانسیل ایجاد سمیت و خطر برای سلامتی انسان به اشکال شیمیایی فلزات سنگین که به فازهای مختلف ماتریکس خاک پیوند یافته‌اند، بستگی دارد (Jafarabadi et al., 2018). بررسی توزیع شیمیایی به ارزیابی فراهمی زیستی فلزات سمی کمک می‌کند، که خود به پتانسیل آنها برای جذب توسط موجودات زنده و ایجاد اثرات نامطلوب بر سلامتی اشاره دارد (Sparks

(et al., 2023). با شناسایی بخش‌های مرتبط با فراهمی زیستی بیشتر، می‌توان خطرات بالقوه زیست‌محیطی را ارزیابی کرده و اقدامات اصلاحی را بر این اساس اولویت‌بندی کرد (Zeng et al., 2023). بررسی توزیع شیمیایی امکان شناسایی اشکال خاص فلز، از جمله یون‌های قابل تبادل، شکل متصل به کربنات‌ها، اکسیدها، مواد آلی و همچنین شکل باقیمانده را فراهم می‌کند. نظر به اهمیت توجه به حضور سرب و ترکیبات آن در محیط زیست و توانایی سرب در ایجاد سمیت برای اکوسیستم و جامعه انسانی، همواره نیاز است گونه‌های شیمیایی و نحوه توزیع و قابلیت دسترسی زیستی آن مورد بررسی قرار گیرد (Khalid et al., 2018). تنها شکل‌هایی از سرب که به صورت محلول هستند و یا قابلیت محلول شدن را دارند می‌توانند از طریق گیاه جذب و وارد زنجیره غذایی گردند. بررسی مقادیر کل موجود از این عنصر در خاک و بخشی که می‌تواند به اشکال محلول‌تر تبدیل شود، بسیار با اهمیت است. روش استخراج متوالی تسیر که توسط شیمیدان کلادایی کلود تسیر و همکارانش در سال ۱۹۷۹ توسعه داده شد، جزء به جزء شدن فلزات در خاک‌ها و رسوبات را طی پنج مرحله متوالی با استفاده از معرف‌های مختلف برای استخراج فلزات متصل به فازهای مختلف مانند تبدالی، کربنات، اکسید آهن-منگنز، آلی و باقیمانده ارزیابی می‌کند و همچنان محبوب‌ترین و پرکاربردترین تکنیک برای ارزیابی تحرک عناصر کمیاب در خاک و رسوبات است (Ali et al., 2024). فلزات موجود در بخش‌های تبدالی و متصل به کربنات، متحرک‌تر و زیست‌فراهم‌تر هستند، در حالی که فلزات موجود در بخش باقیمانده کمتر توسط موجودات زنده جذب می‌شوند. اگرچه این روش مراحل متعدد و ابزارهای تخصصی برای توصیف جامع را شامل می‌شود، اما برای ارزیابی فلزات سمی در خاک و رسوبات بسیار مهم است (Yang et al., 2022). روش‌های استخراج متوالی مانند روش تسیر و BCR^۱ بیش از ۸۵ درصد فلز را بازیابی می‌کنند و انحراف معیار و فواصل اطمینان، قابلیت اعتماد به ارزیابی توزیع شیمیایی فلز در نمونه‌ها را تضمین می‌کنند (Ali et al., 2024). البته اثرات ماتریکس جامد مانند تغییر در ترکیب خاک، کانی‌شناسی، محتوای مواد آلی و pH، می‌توانند بر راندمان استخراج تأثیرگذار باشد و هنگام مقایسه داده‌ها، تفاوت ایجاد کنند (Islam et al., 2023).

در دهه‌های اخیر روش‌های گوناگونی برای جذب و حذف فلزات سنگین به وسیله مواد اصلاحی از محیط‌های مختلف مورد توجه قرار گرفته است که استفاده از جاذب‌های آلی از جمله موادی با پایه‌های آلی-طبیعی یا سنتزی مانند بیوپلار، کربن فعال، کربن سیاه و دوده کربن را شامل می‌شود. استفاده از جاذب‌های مبتنی بر کربن برای کاربردهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است؛ این مواد همچنین نقش مهمی در ترسیب کربن، رشد گیاهان و به حداقل رساندن گرمایش جهانی دارند (Naghdi et al., 2018). جاذب‌هایی مانند کربن فعال، اکسید آهن مسطح، سیلیکاژل، زئولیت و آتاپولگایت و همچنین نانوفیبرهای مبتنی بر کربن، در مقایسه با بیوپلار و

¹ European Community Bureau of Reference

نانوبیوچارها ظرفیت جذب و گزینش پذیری کمتری دارند (Ramadan et al., 2020). کربن فعال که با نام زغال فعال نیز شناخته می‌شود، به عنوان یک ماده جامد کربنی سیاه با ویژگی‌های خاص، یعنی مساحت سطح ویژه بالا و توزیع ایده‌آل اندازه منافذ تعریف می‌شود که با دارا بودن گروه‌های عاملی سطحی واکنش‌پذیری سطحی آن ارتقا یافته است (Brito et al., 2023). مقرون به صرفه بودن و تطبیق‌پذیری کربن فعال معمولاً نیازهای تکنولوژیکی و زیست‌محیطی را برآورده می‌کند (Samsudin et al., 2025). در سال‌های اخیر تلاش‌های فراوانی صورت گرفته که از مواد اولیه کم هزینه برای تولید جاذب‌ها استفاده شود. دوده کربن، پودری به شدت سیاه‌رنگ است که به عنوان یک عامل تقویت‌کننده یا رنگدانه ضروری در محصولات لاستیکی عمل می‌کند. به ساده‌ترین بیان، دوده کربن اساساً کربن عنصری به شکل ذرات بسیار ریز با ساختار مولکولی آمورف است. امروزه بیشتر دوده کربن تولید و استفاده شده با فرآیند کوره ساخته می‌شود که در این فرآیند، دوده کربن با قرار گرفتن فرآورده‌های نفتی سنگین در دمای بسیار بالا در فرآیند احتراق ناقص کنترل شده در شرایط کمبود اکسیژن، تولید می‌شود (ICC, 2020). دوده کربن و کربن فعال هر دو جاذب‌های مهمی هستند که نسبت به حجم خود مساحت سطح بالایی دارند که به ماده اجازه می‌دهد تا حداکثر امکان به عنوان جاذب به طور مطلوب عمل کند؛ این ترکیبات را ترکیبات کربن پاراکریستالی می‌نامند. مهمترین تفاوت بین آنها این است که نسبت مساحت سطح به حجم دوده کربن کمتر از کربن فعال است. جذب فلزات سنگین توسط جاذب‌ها آلی مانند بیوجاد و دوده کربن به عنوان یک فرآیند کلیدی در مدیریت آلودگی خاک و کاهش خطرات زیست‌محیطی آن شناخته می‌شود (Liu et al., 2018). دوده کربن دارای ویژگی‌های منحصر به فردی است که آن را به یک جاذب مؤثر برای فلزات سنگین تبدیل می‌کند. ویژگی‌های فیزیکی متفاوت و حضور گروه‌های عاملی متنوع مانند کربوکسیل، فنول و لاکتون‌ها بر سطح اصلاح‌کننده‌های آلی باعث اثرگذاری متفاوت آن‌ها می‌گردد (Ye et al., 2025).

پایداری خاکدانه‌ها یکی از ویژگی‌های مهم ارزیابی عملکرد خاک است که جهت تعیین کیفیت فیزیکی خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد (Osooli et al., 2021). منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع از جمله مهمترین خصوصیات هیدرولیکی خاک هستند. این خصوصیات نه تنها در رابطه با مدیریت آب و خاک، بلکه در مورد برخی خصوصیات فیزیکی همانند تخلخل خاک و توزیع اندازه منافذ و رطوبت قابل استفاده، اطلاعات مفیدی ارائه می‌دهند (Bahrami and Aghamir, 2020). حضور کربن در خاک می‌تواند منجر به بهبود پایداری خاکدانه‌ها، افزایش ظرفیت نگهداری آب و تغییر در منحنی رطوبتی خاک شود (Thao et al., 2024).

با توجه به روند روزافزون آلودگی خاک‌های کشاورزی به فلزات سنگین و اثرات مخرب آن بر سلامت محیط‌زیست و محصولات کشاورزی، شناسایی و به‌کارگیری روش‌های کارآمد برای اصلاح خاک‌های آلوده و کاهش غلظت و اثر آلاینده‌ها در محیط خاک امری

ضروری است. بنابراین هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر دوده کربن بر توزیع شیمیایی سرب و تحلیل تغییرات ناشی از آن در ارتباط با برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌باشد. این پژوهش با استفاده از تکنیک‌های تحلیلی، به منظور تبیین سازوکارهای مؤثر دوده کربن در تثبیت سرب و بهبود خصوصیات فیزیکی خاک آلوده طراحی شد تا بتواند راهکاری در راستای اصلاح خاک‌های آلوده ارائه دهد.

روش شناسی

نمونه برداری خاک

جهت اجرای پژوهش، نمونه خاک از لایه سطحی (صفر تا ۳۰ سانتی‌متری) مزرعه آزمایشی دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان برداشت شد.

طراحی آزمایش

به منظور بررسی اثر دوده کربن بر توزیع شیمیایی سرب، آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور و چهار تکرار در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان در زمستان سال ۱۴۰۲ انجام گرفت. فاکتورهای این آزمایش عبارتند از آلودگی سرب (صفر (شاهد)، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و دوده کربن (صفر (شاهد)، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی).

بررسی ویژگی‌های اولیه خاک

پس از هواخشک کردن خاک و عبور از الک ۲ میلی‌متر، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی شامل، بافت خاک به روش هیدرومتر (Bowyoucos, 1962)، pH به روش گل اشباع، هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع (EC_e) (USDA, 1954)، کربن آلی به روش هضم تر (Walkley and Black, 1934)، فسفر قابل جذب به روش بی‌کربنات سدیم (Olsen et al., 1954)، پتاسیم قابل جذب به روش استات آمونیوم (Hanway and Heider, 1952)، آهک به روش تیتراسیون با اسید (Sherrod et al., 2002) و سرب کل به روش هضم با تیزاب سلطانی (ISO 11466, 1995) اندازه‌گیری شدند.

آماده سازی تیمارها

جهت آلوده‌سازی خاک، پس از ارزیابی مقدار کل سرب موجود در خاک، از نمک نترات سرب ($Pb(NO_3)_2$) برای رساندن غلظت به سطوح مورد نظر استفاده و پس از انجام محاسبات به صورت جامد به یک کیلوگرم خاک اضافه و مخلوط شد. سپس دوده کربن (کد تجاری بین‌المللی N-330؛ تولید شرکت کربن ایران) در سطوح مورد نظر به نمونه‌های خاک اضافه گردید. پس از ۳ ماه، خاک مورد

نظر برای آنالیز و تعیین شکل‌های شیمیایی سرب به آزمایشگاه منتقل شد. جهت بررسی توزیع شکل‌های شیمیایی سرب در خاک از روش عصاره‌گیری متوالی ارائه شده به وسیله روش تسیر و همکاران (۱۹۷۹) استفاده شد (Tessier et al., 1979) (جدول ۱). غلظت سرب در عصاره‌های به دست آمده از هر مرحله از عصاره‌گیری متوالی با استفاده از دستگاه جذب اتمی (مدل Contr AA300) قرائت شد.

جدول ۱. خلاصه روش عصاره‌گیری متوالی تسیر و همکاران (۱۹۷۹) جهت تعیین توزیع شیمیایی سرب در خاک

شکل شیمیایی	مرحله	روش عصاره‌گیری	دما (درجه سانتیگراد)	زمان (ساعت)
تبادلی	۱	۱ گرم خاک + ۸ میلی‌لیتر کلرید منیزیم (۱ مولار $MgCl_2$) (pH=۷)	۲۵	۱
پیوند شده با کربنات‌ها	۲	۸ میلی‌لیتر استات سدیم ($C_2H_3NaO_2$) ۱ مولار (pH=۵)	۲۵	۵
پیوند شده با اکسیدهای آهن و منگنز	۳	۲۰ میلی‌لیتر هیدروکسیل آمین هیدروکلراید ($NH_2OH.HCl$) ۰/۰۴ مولار (در اسید استیک ۲۵٪)	96 ± 3	۶
پیوند شده با ماده آلی	۴	۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک (HNO_3) ۰/۰۲ مولار + ۸ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن (H_2O_2) ۳۰٪ (pH=۲) + ۵ میلی‌لیتر استات آمونیوم (CH_3COONH_4) ۳/۲ مولار (در اسید نیتریک ۲۰٪)	85 ± 2	۵/۵
باقیمانده	۵	اسید هیدروکلریک-اسید نیتریک ($HCl:HNO_3$) (نسبت حجمی ۳ به ۱)	۱۳۰	۲

بررسی ویژگی‌های فیزیکی خاک

جهت بررسی اثر تیمار دوده کربن بر ویژگی‌های فیزیکی خاک، دو ویژگی مهم شامل میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شد. این ارزیابی‌ها به درک بهتر تأثیر دوده کربن بر پایداری ساختاری خاک و توانایی آن در بهبود ویژگی حفظ آب در خاک کمک می‌نماید. به منظور اندازه‌گیری میانگین وزنی قطر خاکدانه $^{(3)}$ (MWD) از روش الک تر استفاده شد. به این منظور ابتدا خاک هوا خشک شده از الک ۴ میلی‌متر عبور داده شد. سپس نمونه خاک در سری الک‌ها (به ترتیب از بالا به پایین ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱۲۵، ۰/۰۶۳، ۰/۰۵۳ و ۰/۰۴۵ میلی‌متر) به شکل یکنواخت ریخته شده و به درون آب به صورت بالا و پایین تکان داده شد تا خاکدانه‌ها تحت تأثیر تنش قرار گیرند. ارتفاع آب بر روی الک‌ها به نحوی تنظیم شد که خاکدانه‌های موجود بر روی الک بالایی در مدت زمان الک کردن و هنگامی که الک‌ها به بالاترین نقطه می‌رسند، اندکی از آب خارج شده و زمانی که به پایین‌ترین نقطه می‌رسند،

³ Mean Weight Diameter

اندکی توسط آب پوشانده شوند. مدت زمان الک کردن ۳ دقیقه در نظر گرفته شد. سپس الک‌ها به آرامی از آب خارج گردید و خاکدانه‌های باقیمانده روی هر الک شسته و در آن در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد خشک شدند. سپس میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به عنوان شاخص ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها محاسبه گردید (رابطه ۱).

$$MWD = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه، W_i نسبت جرم خشک خاکدانه روی هر الک به جرم کل خاک و X_i میانگین قطر خاکدانه‌های باقیمانده بر روی هر الک بر حسب میلی‌متر می‌باشد (Blake and Hartge, 1986). برای تعیین منحنی رطوبتی خاک، رطوبت نمونه‌های خاک تیمارهای دارای دوده کربن و بدون دوده کربن در مکش‌های ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۵ و ۱۵ بار با استفاده از دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری شد (Klute and Dirksen, 1986). سپس از مدل وگنوختن-معلم (Van Genuchten M.Th., 1980) در نرم‌افزار RETC (جدیدترین نسخه نرم‌افزار تحلیل منحنی رطوبتی و رسانایی هیدرولیکی خاک (۲۰۱۵؛ ۶/۰۲)) استفاده و میزان رطوبت نمونه‌های خاک تیمارهای مختلف، در سایر مکش‌ها مطابق با رابطه ۲ برآورد شد.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s + \theta_r)}{(1 + (\frac{h}{h_a})^n)^m} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه، θ_r رطوبت باقیمانده خاک، θ_s رطوبت اشباع خاک، h_a مکش ورود هوا، n و m ضرایب تجربی معادله هستند (Van Genuchten M.Th., 1980).

تجزیه آماری داده‌ها توسط نرم‌افزار SAS نسخه ۹٫۴ انجام و تأثیر تیمارهای آزمایشی با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد بررسی شد. نرم‌افزار Excel برای رسم نمودارها مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

ویژگی‌های اولیه خاک

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۲ ارائه شده است. خاک مورد بررسی دارای ۴۵ درصد شن، ۳۴ درصد سیلت و ۲۱ درصد رس بوده و بافت آن "لوم" تشخیص داده شد. این بافت عموماً برای کشاورزی مناسب در نظر گرفته می‌شود، زیرا تعادل بین زهکشی و نگهداشت آب ایجاد می‌کند، هرچند نسبت بالای شن ممکن است ظرفیت نگهداری آب و مواد غذایی را کاهش دهد (Brady

(and Weil, 2016). مقدار شوری خاک ۱/۸ دسی‌زیمنس بر متر است که نشان‌دهنده شرایط بدون محدودیت شوری است. پ-هاش خاک برابر با ۷/۲ است که نشان‌دهنده شرایط تقریباً خنثی است. در این محدوده pH، دسترسی به بیشتر عناصر غذایی برای گیاهان مناسب است، اما مقدار بالای آهک در خاک می‌تواند باعث کاهش تحرک برخی از عناصر غذایی گردد؛ وجود آهک در خاک برای بافر اسیدیته، تشکیل و تثبیت خاکدانه‌ها، تثبیت ماده آلی، فعالیت‌های میکروبی و آنزیمی، چرخه و در دسترس بودن مواد مغذی، و نفوذپذیری آب و بهره‌وری گیاه مهم است (Raza et al., 2020). وجود آهک ممکن است از طریق تغییر مؤثر در بافت خاک و از طریق تغییر ساختار و منافذ خاک، احتباس آب را تغییر دهد (Bagnall et al., 2022). غلظت فسفر در خاک ۹/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم است که نشان‌دهنده سطح نسبتاً خوبی از این عنصر غذایی است؛ دسترسی محدود به فسفر در خاک، چالش‌های قابل توجهی را برای بهره‌وری محصولات کشاورزی ایجاد می‌کند، به ویژه هنگامی که گیاهان در معرض تنش‌های غیرزیستی قرار می‌گیرند (Khan et al., 2023). غلظت پتاسیم در خاک ۱۶۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم است که نشان‌دهنده سطح کافی از این عنصر غذایی است؛ پتاسیم در تنظیم تعادل آب و مقاومت گیاهان به تنش‌ها نقش دارد (Rawat et al., 2022). مقدار بسیار پایین کربن آلی (۰/۰۶ درصد) یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های این خاک است، زیرا محتوای مواد آلی نقش حیاتی در بهبود ساختار خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و مواد غذایی و تحریک فعالیت ریزجانداران مفید خاک دارد (Voltr et al., 2021).

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اولیه خاک

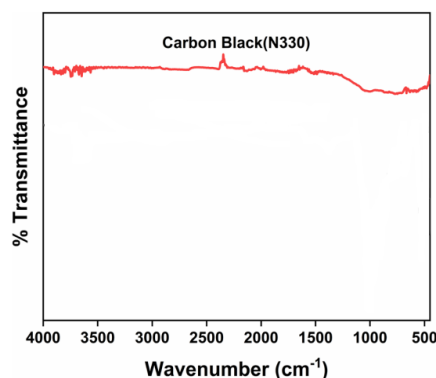
شن	سیلت	رس	بافت خاک	pH	هدایت	ظرفیت	آهک	کربن	پتاسیم	فسفر	سرب کل
Sand	Silt	Clay			الکتریکی	تبادل		الی	قابل جذب	قابل	
(%)	(%)	(%)	-	-	(dS/m)	کاتیونی	(%)	(%)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
۴۵	۳۴	۲۱	لوم	۷/۲	۱/۸	۱۱/۲	۳۹	۰/۰۶	۱۶۲	۹/۵	۵/۵

ویژگی‌های دوده کربن

دوده کربن^۴ ماده‌ای با ساختار نانوکروی، سطح ویژه بالا (حدود ۷۰ تا ۱۵۰ مترمربع بر گرم) و تخلخل زیاد است که چگالی ظاهری آن بین ۰/۱ تا ۰/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب گزارش شده است. این ویژگی‌ها، همراه با پایداری شیمیایی بالا و حضور گروه‌های عاملی فعال در سطح، موجب شده دوده کربن در بهبود خواص فیزیکی خاک و کاهش تحرک آلاینده‌ها، به‌ویژه فلزات سنگین، نقش مؤثری ایفا کند (Kumar and Nagendran, 2012; Bucur and Maniu, 2020). دوده کربن N-330 بر اساس دستورالعمل‌های استاندارد ASTM دارای میانگین قطر ذرات برابر با ۳۳ نانومتر و pH برابر با ۷/۴۲ می‌باشد (Paul et al., 2023). ترکیب شیمیایی دوده کربن N-

^۴ Carbon Black

330 بوسیله دستگاه CHNS به صورت میانگین سه روش استاندارد تعیین شده توسط ASTM D5373، ASTM D4239 و ASTM D3172-07 انجام و نتیجه میانگین سه آزمایش بر مبنای درصد وزنی، ۹۴/۲۴ درصد کربن، ۰/۴۴۶ درصد هیدروژن، ۰/۱۳ درصد نیتروژن و ۰/۳۴۸ درصد سولفور نشان داده شد. طیف‌های مادون قرمز دوده کربن تجاری N-330 در شکل ۱ نشان داده شده است؛ پیک اطراف 3612 cm^{-1} نشان‌دهنده ارتعاش کششی پیوندهای O-H است و پیک مشخصه اطراف 2920 cm^{-1} به ارتعاش کششی پیوندهای CH- نسبت داده می‌شود (Wang et al., 2019) که ساختار حلقوی را در دوده کربن اثبات می‌کند (Paul et al., 2023).

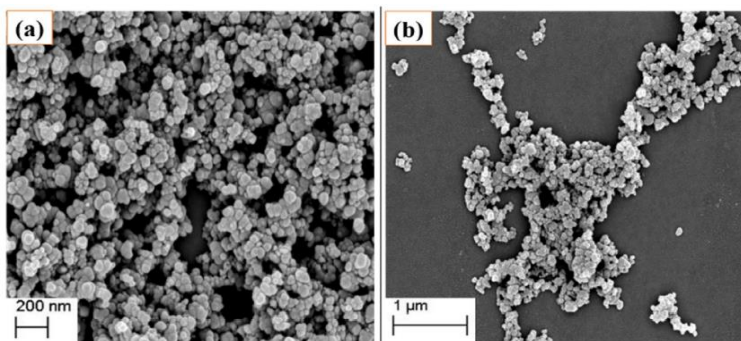


شکل ۱. طیف‌های FT-IR دوده کربن N-330 (Paul et al., 2023)

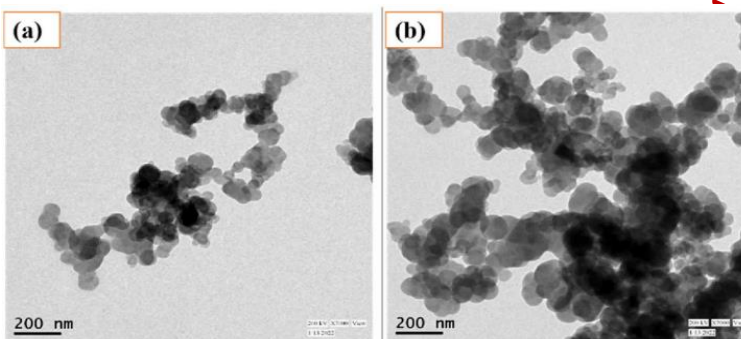
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۵ از دوده کربن N-330 در شکل ۲ نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد دوده کربن دارای شکل کروی یا بیضوی و تجمع بسیاری از کره‌های کوچک است. شکل ۲ (a-b) نشان دهنده تصاویر میکروسکوپی هستند که به ترتیب با بزرگنمایی ۲۵۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ از دوده کربن N-330 گرفته شده‌اند. از تصاویر می‌توان دریافت که دوده کربن N-330 دارای شکل کروی، اندازه یکنواخت و توزیع باریک است و شکاف‌های بین دو توده کاملاً یکسان است (Paul et al., 2023). مورفولوژی میکروسکوپ الکترونی عبوری^۶ دوده N-330 در شکل ۳ (a-b) ارائه شده است. سطح ذرات دوده تجاری N-330 کاملاً صاف است و دارای ساختار دانه‌ای ریز است. کلوخه‌های N-330 ریز و دارای شکل شاخه‌ای همگن هستند. هیستوگرام مساحت سطح محاسبه شده از تصویر TEM دوده کربن N-330 در شکل ۴ نشان داده شده است. اندازه و حجم توده‌ها و کلوخه‌ها توسط ساختار دوده کربن تعریف می‌شود؛ وجود تعداد زیادی از ذرات در هر توده به عنوان ساختار بالا مشخص می‌شود، در حالی که ساختار پایین به سطح ضعیف تجمع مربوط است (Kyari et al., 2005).

^۵ FESEM

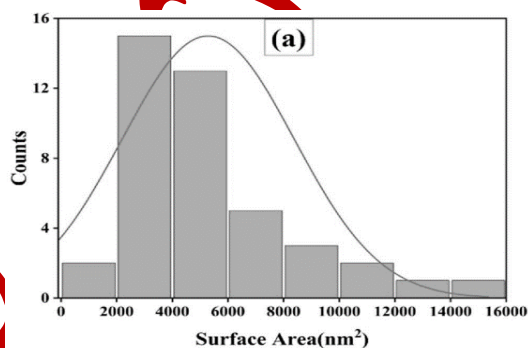
^۶ TEM



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) دوده کربن N-330 (Paul et al., 2023)



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) دوده کربن N-330 (Paul et al., 2023)



شکل ۴. هیستوگرام مساحت سطح محاسبه شده از تصویر TEM دوده کربن N-330 (Paul et al., 2023)

تأثیر تیمارها بر توزیع شیمیایی سرب

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها بر شکل‌های شیمیایی سرب در خاک (جدول ۳) نشان داد که اثر متقابل دوده کربن و آلودگی خاک در سطح احتمال یک درصد بر شکل‌های شیمیایی سرب در بخش تبدیلی، کربناته، اکسید آهن-منگنز، متصل به مواد آلی و باقیمانده معنی‌دار بود.

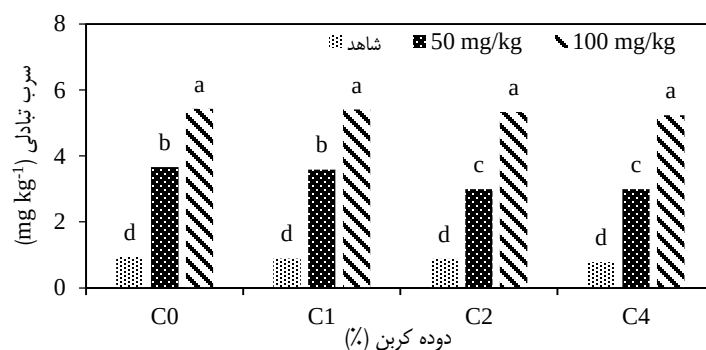
جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس اثر فاکتورهای مورد بررسی بر شکل‌های شیمیایی سرب در خاک

میانگین مربعات (MS)						
منابع تغییر	درجه آزادی	تبادلی	متصل به کربنات	متصل به اکسیدهای آهن و منگنز	متصل به مواد آلی	باقیمانده
دوده کربن	۳	۰/۳۲**	۳/۶۶**	۱/۰۵**	۴/۰۹**	۰/۹۰**
آلودگی خاک	۲	۴۸/۷۳**	۳۶۳/۹۵**	۲۹۶/۳۷**	۱۴۴/۷۳**	۹۸۷/۶۸**
دوده کربن × آلودگی خاک	۶	۰/۱۲**	۲/۰۳**	۰/۷۲**	۱/۵۳**	۰/۲۲**
خطا	۳۶	۰/۰۱۱	۰/۰۳۶	۰/۰۳۸	۰/۰۶	۰/۰۶
ضریب تغییرات		۴/۱۹	۲/۷۹	۳/۲۱	۵/۰۶	۹/۳۵

** معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد، * معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد و NS عدم معنی‌دار بودن

بخش تبادلی: فلزات سنگین موجود در خاک به شکل‌های شیمیایی مختلف وجود دارند که از میان آن‌ها، فرم‌های محلول و تبادلی به دلیل تحرک‌پذیری بالا و قابلیت جذب سریع توسط گیاهان جاذب اهمیت هستند. اشکال محلول فلزات مستقیماً در محلول خاک قرار دارند و برای جذب فوری در دسترس ریشه گیاهان قرار می‌گیرند. جذب سریع این فلزات می‌تواند باعث تجمع آن‌ها در گیاهان و انتقال به زنجیره غذایی شود که خطرات زیست‌محیطی و بهداشتی جدی ایجاد می‌کند (Zhang et al., 2023). اثر کاربرد دوده کربن بر تغییرات غلظت در بخش محلول و تبادلی سرب در شکل ۵ نشان داده شده است. با کاربرد دوده کربن، غلظت بخش محلول و تبادلی سرب کاهش معنی‌داری یافته است. نتایج نشان دادند کاربرد دوده کربن در سطح ۲ و ۴ درصد موجب کاهش معنی‌دار غلظت سرب در سطح آلودگی ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گردیده است که این کاهش برای سطح آلودگی ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش معنی‌داری را نشان نمی‌دهد. بیشترین کاهش غلظت بخش محلول و تبادلی سرب در سطوح مختلف آلودگی (۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب در خاک)، مربوط به تیمار دوده کربن در سطوح ۲ و ۴ درصد وزنی بود. غلظت سرب در این بخش در سطح آلودگی ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ۴ درصد دوده کربن، از مقدار اولیه برابر با ۵/۴۵ به ۵/۲۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافت که معادل کاهش ۳/۶۳ درصد بود که صرفاً از لحاظ عددی این کاهش قابل ملاحظه است. همچنین غلظت سرب در سطح آلودگی ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و سطوح ۲ و ۴ درصد از مقدار اولیه برابر با ۳/۶۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ۲/۹۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافت که معادل کاهش ۲۲/۰۷ درصد بود (شکل ۵). اصلاح‌کننده‌های آلی این توانایی را دارند که با بهبود ویژگی‌های خاک مانند تغییر pH، محتوای مواد آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی بر کاهش زیست‌فراهمی فلزات سنگین اثرگذار باشند (Yu et al., 2025). تثبیت فلزات سنگین می‌تواند به وسیله برهمکنش بین فلز و اصلاح‌کننده‌ها مانند ایجاد کمپلکس با گروه‌های عاملی گوناگون سطح اصلاح‌کننده، جذب اختصاصی و غیراختصاصی و ایجاد رسوب صورت گیرد، که این موارد موجب کاهش تحرک فلزات می‌گردند (Liang et al., 2017). افزودن

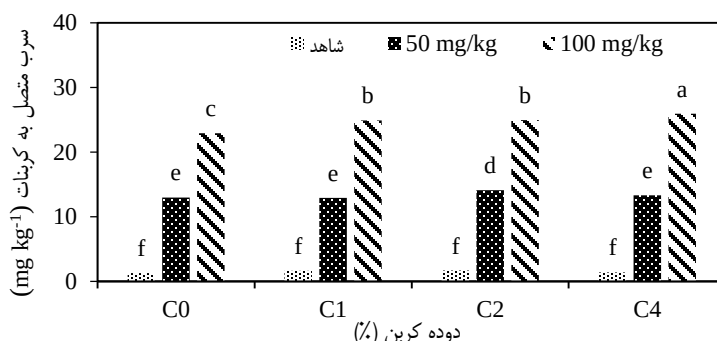
اصلاح‌کننده‌های آلی موجب کاهش بخش تبادلی سرب و افزایش آن در سایر بخش‌ها گردید که علت آن وجود گروه‌های عاملی و ساختار کمپلکسی عنوان شد (Cui et al., 2016)؛ که با نتایج این پژوهش مطابقت داشت. کاربرد بیوچار کاه برنج در خاک‌های آلوده به سرب، باعث کاهش غلظت سرب قابل دسترس به میزان ۲۳/۶ درصد شد (Zhang et al., 2020).



شکل ۵. مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف دوده کربن و آلودگی خاک بر سرب تبادلی خاک- میانگین‌های با حروف مشترک در سطح ۵ درصد آزمون توکی اختلاف معنی‌داری با هم ندارند. C0: شاهد، C1: یک درصد دوده کربن، C2: دو درصد دوده کربن، C4: چهار درصد دوده کربن

بخش کربنات: نتایج نشان داد استفاده از دوده کربن در سطوح مختلف (۱، ۲ و ۴ درصد) موجب افزایش معنی‌دار غلظت سرب در بخش کربناتی نسبت به تیمار شاهد گردید (شکل ۶). بیشترین افزایش غلظت فلز سرب در بخش متصل به کربنات‌ها در سطوح آلودگی ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب در خاک، مربوط به تیمار ۲ و ۴ درصد وزنی دوده کربن مشاهده شد، که به ترتیب از مقدار اولیه ۱۲/۹۵ و ۲۲/۹۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ۱۴/۱ و ۲۵/۹۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش یافت که معادل افزایش به ترتیب ۱۴/۴۰ و ۳۳/۸۲ درصد نسبت به تیمار شاهد بوده است. به علاوه نتایج اثرات متقابل نشان داد که با افزایش سطح آلودگی، غلظت سرب کربناتی افزایش یافت، همچنین در هر سطح آلودگی، افزایش مقدار دوده کربن موجب افزایش غلظت سرب در این بخش گردید (شکل ۶). در بین عوامل مؤثر بر جذب و نگهداری فلز، ظرفیت تبادل کاتیونی، مساحت سطح ویژه و محتوای کربنات نقش‌های حیاتی ایفا می‌کنند و محتوای کربنات بیشترین تأثیر را دارد (Heidari et al., 2025). سرب یکی از عناصری است که تمایل زیادی به واکنش با کربنات کلسیم از خود نشان می‌دهد، به همین علت میزان نسبی آن در بخش کربناتی به خصوص در خاک‌های با pH بالا، زیاد است (Piri et al., 2020). اختلاط بلندمدت اصلاح‌کننده‌های آلی با خاک، میزان ماده آلی و pH خاک را به طور قابل توجهی افزایش داد و پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک را بهبود بخشید (Aranyos, 2025). افزایش pH خاک که معمولاً همراه با افزودن اصلاح‌کننده‌های آلی با بازی (pH دوده کربن برابر با ۷/۴۲) رخ می‌دهد، نقش کلیدی در تثبیت فلزات سنگین ایفا می‌کند. در pH‌های بالا، سرب به صورت کمپلکس‌های پایدارتر کربناتی و هیدروکسیدی است که این امر موجب کاهش حلالیت و انتقال آن در خاک می‌شود. در مطالعه‌ای با بررسی اثر بیوچار بر توزیع شیمیایی فلزات سنگین گزارش شد که افزودن بیوچار موجب کاهش فلزات در بخش تبادلی

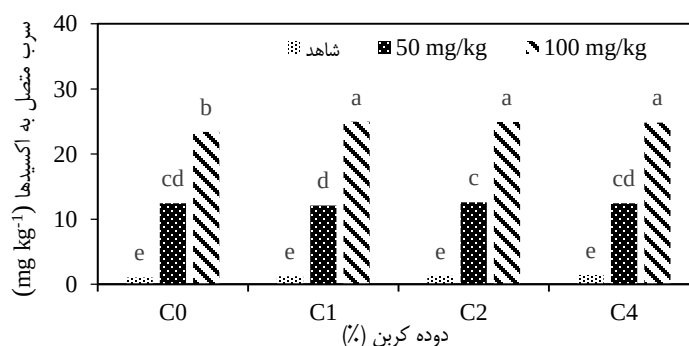
خاک شد در حالی که فلزات متصل به بخش کربناتی افزایش یافت؛ اصلاح‌کننده‌ها می‌توانند با افزایش pH و کاهش فلزات استخراج شده با کلرید کلسیم به طور مستقیم بخش قابل دسترس فلزات را به بخش پایدارتر تبدیل کنند (Meng et al., 2018).



شکل ۶. مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف دوده کربن و آلودگی خاک بر سرب کربناته خاک- میانگین‌های با حروف مشترک در سطح ۵ درصد آزمون توکی اختلاف معنی‌داری با هم ندارند. (C0: شاهد، C1: یک درصد دوده کربن، C2: دو درصد دوده کربن، C4: چهار درصد دوده کربن)

بخش متصل به اکسیدها: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) نشان داد که اثرات اصلی و متقابل تیمارها بر غلظت شکل متصل به اکسیدهای آهن و منگنز سرب در سطح احتمال ۱ درصد از نظر آماری معنی‌دار بود. با افزودن دوده کربن در سطوح ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی، غلظت سرب پیوند شده با اکسیدهای آهن و منگنز به طور معنی‌داری افزایش یافت که این افزایش نسبت به شاهد حدود ۱۶/۶۸ درصد و مربوط به تیمار ۴ درصد وزنی بود. بین سه سطح ۱، ۲ و ۴ درصد دوده کربن، تفاوت آماری معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۷). فلزات سنگین در خاک به صورت ترکیبات مختلف (اکسیدی، کربناتی، آلی و تبادل) توزیع می‌شوند. افزایش غلظت سرب پیوند شده با اکسیدهای آهن و منگنز با کاربرد دوده کربن نشان‌دهنده آن است که سرب از شکل‌های با قابلیت دسترسی زیستی بالا (فرم محلول و تبدلی)، به شکل‌های با قابلیت دسترسی پایین‌تر (شکل‌های متصل به اکسیدهای آهن و منگنز)، انتقال یافته است. بخش اکسیدی خاک ممکن است ظرفیت محدودی برای تثبیت سرب داشته باشد و پس از پر شدن این ظرفیت، سرب اضافی به بخش‌های دیگر منتقل شود (Smith et al., 2022). این توزیع نامتقارن فلزات می‌تواند منجر به عدم افزایش معنی‌دار سرب در بخش اکسیدی با افزودن دوده کربن شود. عوامل کلیدی مؤثر بر توزیع فلزات سنگین در خاک‌های سطحی شامل اکسیدهای آهن، pH، کربن آلی کل، ظرفیت تبادل کاتیونی و شدت هوازدگی هستند (Liu et al., 2025). ظرفیت تبادل کاتیونی خاک عامل مهمی در جذب و نگهداری فلزات سنگین است. از آنجایی که مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی یک متغیر وابسته است، مقدار آن به محتوای کانی‌های رسی، مواد آلی، کوددهی و مقدار pH بستگی دارد. هرگونه تغییر در خواص خاک منجر به تغییر در مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی و در نتیجه تغییر در ویژگی خاک در ارتباط با نگهداشت عناصر می‌گردد (Ćirić et al., 2023). خاک‌هایی که ظرفیت تبادل کاتیونی پایینی دارند (در این پژوهش خاک دارای ظرفیت تبادل کاتیونی برابر با ۱۱/۲ بود که بر اساس مقدار تعریف شده (Hazelton and Murphy, 2007) در سطح

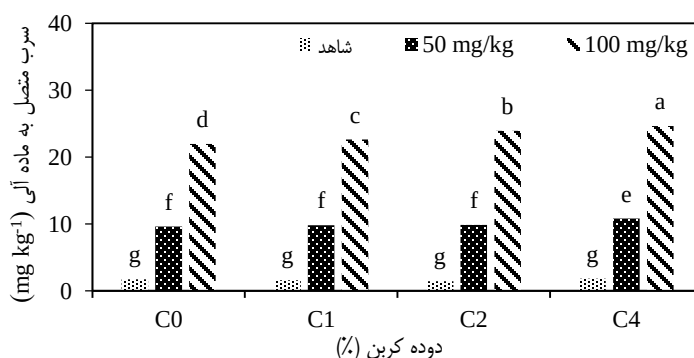
کیفی کم قرار دارد)، توانایی محدودی در جذب سطحی و نگاهداشت فلزات دارند. اصلاح‌کننده‌های آلی با ظرفیت تبادل یونی و آهن بالا باعث افزایش تبادل یونی و تثبیت فلز و توزیع مجدد آن می‌گردند (Haghighatjou and Shirvani, 2022). کاربرد بیوجار باگاس نیشکر در یک خاک آلوده به سرب موجب تغییر توزیع شکل‌های شیمیایی و افزایش غلظت سرب پیوند شده با مواد آلی، اکسیدهای آهن - منگنز و کربناته و کاهش شکل تبادلی آن در خاک گردید (Ahmad et al., 2017). اصلاح‌کننده‌های بر پایه کربن مانند دوده کربن نیز می‌توانند اثرات مشابهی بر این بخش داشته باشند. ظرفیت جذب قوی اصلاح‌کننده‌های آلی برای بی‌حرکت کردن فلز و همچنین انتقال فلز از فاز متحرک به فاز پایدار ممکن است ناشی از ویژگی فیزیکی - شیمیایی مطلوب آن‌ها باشد. مساحت سطح ویژه بالا و تخلخل می‌تواند به جذب فیزیکی یون‌های فلزی کمک کند و گروه‌های عاملی متعدد می‌توانند میل ترکیبی بالایی نسبت به فلزات سنگین داشته باشند (Himawan et al., 2020). علاوه بر این، محتوای بالای آهن و مواد مغذی، واکنش‌های هم‌رسوبی و تشکیل کمپلکس بین آهن و سایر عناصر را افزایش می‌دهد که این امر همچنین باعث تثبیت فلز در خاک و انتقال آن از بخش محلول به بخش‌های پایدارتر پیوند شده با اکسیدهای آهن و منگنز و همچنین بخش باقیمانده شده است (Masocha et al., 2022).



شکل ۷. مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف دوده کربن و آلودگی خاک بر سرب متصل به اکسیدها- میانگین‌های با حرف مشترک در سطح ۵ درصد آزمون توکی اختلاف معنی‌داری با هم ندارند. (C0: شاهد، C1: یک درصد دوده کربن، C2: دو درصد دوده کربن، C4: چهار درصد دوده کربن)

بخش متصل به ماده آلی: بر اساس نتایج به دست آمده افزایش سطح دوده کربن باعث افزایش میزان سرب متصل به ماده آلی گردید (شکل ۸). در سطح آلودگی ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در سطح ۴ درصد دوده کربن اختلاف معنی‌دار با تیمار شاهد گزارش شد؛ در حالی که در سطح آلودگی ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب، تفاوت بین همه سطوح دوده کربن و تیمار شاهد معنی‌دار بوده و افزایش مقدار دوده کربن از ۱ به ۴ درصد وزنی نیز باعث ایجاد تغییر معنی‌دار در میزان سرب متصل به ماده آلی گردید. بیشترین غلظت سرب متصل به ماده آلی در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، مربوط به تیمار ۴ درصد دوده کربن با مقدار ۲۴/۶۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم ثبت شد که حدود ۱۲/۱۹ درصد بیشتر از شاهد بود. همچنین در همین سطح از آلودگی، برای سطوح ۱ و ۲ درصد دوده کربن به ترتیب مقادیر برابر با ۲۲/۶۱ و ۲۳/۹۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شد که نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۲/۹۱ و ۸/۸۳ درصد افزایش را نشان داد.

اصلاح‌کننده‌های آلی با توجه به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خود به صورت‌های متفاوت باعث تغییر توزیع شیمیایی فلزات می‌شوند. اصلاح‌کننده‌های آلی غنی از نیتروژن و pH پایین باعث بی‌حرکت شدن و توزیع مجدد فلزات از طریق تشکیل کمپلکس و جذب سطحی می‌شوند (Hamzah et al., 2024). مواد آلی با ظرفیت تبادل کاتیونی کم و pH کمی بازی رسوب فلز را تسهیل کرده و منجر به توزیع مجدد و بی‌حرکت شدن آن می‌شود (Wei et al., 2023). در پژوهشی گزارش شد افزودن اصلاح‌کننده آلی (بیوکامپوزیت) به خاک به طور خاص، بخش تبدلی و پیوند شده با کربنات را برای مس ۴۵ درصد، کادمیوم ۷۱ درصد، سرب ۴۱ درصد و روی ۲۴ درصد کاهش داد و به طور مؤثر خطر زیست‌محیطی آنها را محدود کرد. علاوه بر این، توزیع مجدد سرب و روی را به بخش پیوند شده با اکسیدهای آهن و منگنز، مس و سرب را به بخش پیوند شده با مواد آلی و مس، نیکل و کادمیوم را به بخش باقیمانده افزایش داد که نشان‌دهنده تثبیت بیشتر است. بالاترین راندمان بی‌حرکت‌سازی برای کادمیوم (۵۳/۹ درصد) و سرب (۵۲/۳ درصد) مشاهده شد که اثربخشی اصلاح‌کننده آلی را در کاهش تحرک فلزات سنگین تأیید می‌کند (Gusiatin et al., 2025). در بررسی توزیع شیمیایی فلزات سنگین به روش تسیر گزارش شد اصلاح‌کننده‌های آلی به طور قابل توجهی بخش‌های تبدلی سرب و روی را به ترتیب تا ۷۱/۸ و ۶۱/۵ درصد کاهش دادند، در حالی که حضور آنها در بخش‌های پایدارتر شامل پیوند شده با مواد آلی و باقیمانده افزایش یافت (Vuong et al., 2025). هرچه سطح ویژه، گروه‌های عاملی و ارزش غذایی اصلاح‌کننده آلی بیشتر باشد، نقش آن در توزیع مجدد فلز و بی‌حرکت شدن آن بیشتر خواهد بود که منجر به ماندگاری طولانی‌مدت در خاک آلوده می‌گردد (Rumi et al., 2025).

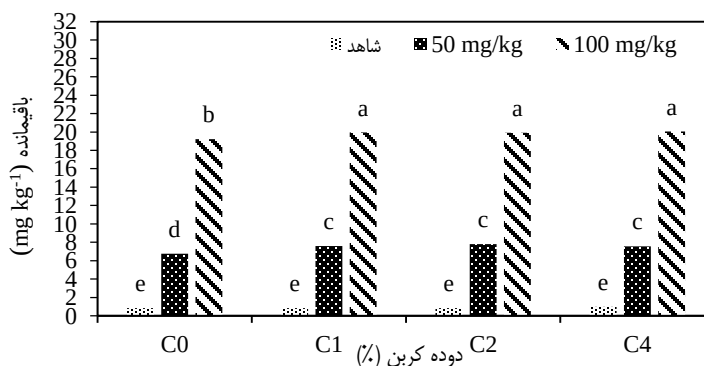


شکل ۸. مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف دوده کربن و آلودگی خاک بر سرب متصل به ماده آلی خاک- میانگین‌های با حروف مشترک در سطح ۵ درصد آزمون توکی اختلاف معنی‌داری با هم ندارند. (C0: شاهد، C1: یک درصد دوده کربن، C2: دو درصد دوده کربن، C4: چهار درصد دوده کربن)

باقیمانده: کاربرد دوده کربن به طور معنی‌داری منجر به افزایش غلظت سرب در بخش باقیمانده شد که نشان‌دهنده تثبیت مؤثر سرب در این بخش است. این افزایش در هر دو سطح آلودگی (۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب در خاک) مشاهده گردید. در سطح آلودگی ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، ۴ درصد وزنی دوده کربن غلظت سرب در بخش باقیمانده را به میزان ۲۰/۰۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش داد که نسبت به تیمار شاهد (۱۹/۲۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) افزایشی معادل ۴/۲۴ درصد را نشان می‌دهد. به طور مشابه، در سطح

آلودگی ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، تیمار ۴ درصد وزنی دوده کربن غلظت سرب در بخش باقیمانده را به ۷/۵۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش داد، که این مقدار نسبت به تیمار شاهد (۶/۷۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) افزایشی معادل ۱۲/۰۱ درصد بود (شکل ۹).

در دو سطح آلودگی، در سایر سطوح دوده کربن (۱ و ۲ درصد)، نتایج مشابهی مشاهده شد و تفاوت معنی‌داری با تیمار ۴ درصد وجود نداشت. با این حال، در تمامی سطوح، افزایش غلظت سرب در بخش باقیمانده در مقایسه با تیمار شاهد معنی‌دار بود (شکل ۹). نکته قابل توجه آن است که در هر سطح از آلودگی، تفاوت معنی‌داری در غلظت سرب بخش باقیمانده بین سطوح مختلف کاربرد دوده کربن مشاهده نشد و افزایش غلظت به طور عمده نسبت به تیمار شاهد رخ داده بود. بررسی اثرات متقابل نشان داد که با افزایش سطح آلودگی سرب در خاک، میزان سرب تثبیت‌شده در بخش باقیمانده نیز افزایش می‌یابد و افزودن دوده کربن نیز همواره به افزایش غلظت سرب در این بخش نسبت به نمونه‌های شاهد منجر شده است (شکل ۹). نتایج نشان داد کاربرد بیوپار لجن فاضلاب در خاک آلوده، با انتقال کادمیوم و سرب به بخش باقیمانده، باعث کاهش زیست‌فراهمی این دو فلز در خاک شده است (Karimi et al., 2019). مطالعات تفکیکی فلزات سمی نشان می‌دهد که افزودنی‌هایی مانند زغال چوب منجر به توزیع مجدد آرسنیک، کادمیوم و سرب از فاز سمی فلز (فاز تبادلی و کربناتی) به فاز کم‌سمی‌تر (فاز باقیمانده) شده‌اند. با افزایش میزان زغال چوب اضافه شده، روند کاهشی در تحرک فلزات سمی مشاهده شد که نشان‌دهنده کاهش احتمالی فراهمی زیستی فلزات سمی در غلظت‌های بالاتر زغال چوب است. این امر به معنای کاهش تهدیدات زیست‌محیطی و آلودگی توسط فلزات سمی بر کشاورزان، میکروارگانیسم‌ها و محصولات کشاورزی است (Ugbune et al., 2025). توزیع شیمیایی سرب و کادمیوم تحت تأثیر چهار اصلاح‌کننده آلی بررسی و نتایج حاکی از بی‌حرکت شدن فلزات با تغییر گونه‌های شیمیایی آنها بود (Rumi et al., 2025). نسبت کادمیوم و سرب در بخش زیست‌فراهم (محلول و تبادلی) کاهش یافت، در حالی که نسبت آنها در بخش‌های کم‌تحرک‌تر پیوند شده با اکسیدهای آهن و منگنز و بخش باقیمانده به دلیل افزودن اصلاح‌کننده افزایش یافت (Islam et al., 2024).



شکل ۹. مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف دوده کربن و آلودگی خاک بر سرب باقیمانده خاک - میانگین‌های با حروف مشترک در سطح ۵ درصد آزمون توکی اختلاف معنی‌داری با هم ندارند. - (C0: شاهد، C1: یک درصد دوده کربن، C2: دو درصد دوده کربن، C4: چهار درصد دوده کربن)

اثر تیمارها بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک

نتایج تجزیه واریانس اثر سطوح مختلف دوده کربن بر میزان پایداری خاکدانه و رطوبت نمونه‌های خاک در مکش‌های ۰/۳، ۰/۱، ۰/۵ و ۵ و ۱۵ بار در جدول (۴) نشان داده شده است. با توجه به نتایج، اثر دوده کربن بر میزان پایداری خاکدانه و رطوبت در مکش‌های ۰/۳، ۰/۱، ۰/۵ و ۵ بار در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد. اثر معنی‌داری دوده کربن بر میزان رطوبت خاک در مکش ۱۵ بار مشاهده نگردید.

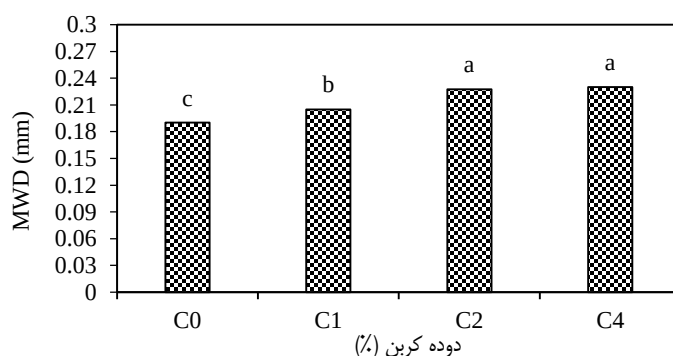
جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس اثر سطوح مختلف دوده کربن بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک

منابع تغییر	درجه آزادی	رطوبت در مکش ۰/۱ بار	رطوبت در مکش ۰/۳ بار	رطوبت در مکش ۰/۵ بار	رطوبت در مکش ۵ بار	رطوبت در مکش ۱۵ بار	رطوبت اشباع	پایداری خاکدانه
دوده کربن	۳	۰/۰۰۴۰**	۸/۳۱۷**	۰/۰۰۱۴**	۰/۰۰۱۰**	۰/۰۰۱۴ ^{ns}	۰/۰۰۳۷**	۰/۰۰۱۴**
خطا	۱۲	۱/۳۱۲	۳/۱۲۵	۸/۹۵۸	۶/۲۵۰	۰/۰۰	۵/۶۲۵	۰/۰۰۰۰۱
ضرب تغییرات		۱/۷۷۹	۰/۲۲	۰/۶۰	۰/۴۱	۰/۸۶	۱/۲۸	۰/۰۰

** معنی‌داری در سطح ۱ درصد، * معنی‌داری در سطح ۵ درصد و ^{ns} عدم معنی‌دار بودن

مقایسه میانگین میزان پایداری خاکدانه (MWD) نمونه‌های خاک در سطوح مختلف دوده کربن نشان داد کاربرد دوده کربن در سطوح مختلف (۱، ۲ و ۴ درصد) باعث افزایش پایداری خاکدانه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، تیمار ۴ درصد دوده کربن موجب افزایش پایداری خاکدانه به مقدار ۲۱/۰۵ درصد نسبت به شاهد گردید که در مقایسه با سطوح دیگر دوده کربن بیشترین مقدار افزایش را از نظر آماری نشان می‌دهد (شکل ۱۰). گزارش شده است کربن آلی به عنوان عامل اتصال‌دهنده عمل نموده و باعث بهبود وضعیت خاکدانه‌سازی می‌شود. میان پایداری خاکدانه و مواد آلی همبستگی معنی‌داری وجود دارد؛ به این علت که کربن آلی به خصوص کربوهیدرات‌ها عامل اصلی اتصال و پیوند ذرات خاک و خاکدانه‌سازی به شمار می‌روند (حاج‌عباسی و همکاران، ۱۳۸۶). در پژوهشی با اعمال تیمار زغال زیستی در نمونه‌های خاک، میزان تخلخل کل و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها افزایش و مقاومت فروری خاک کاهش یافت (Osooli et al., 2021). همچنین در پژوهشی دیگر استفاده از بیوپار ذرت منجر به کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش پایداری خاکدانه‌ها شد (Lu et al., 2014). استفاده از اصلاح‌کننده‌های بر پایه کربن موجب کاهش ۷ تا ۱۴ درصدی جرم مخصوص ظاهری و افزایش قابل توجه (۳۸ درصد) پایداری خاکدانه‌ها گردید (Hejazi et al., 2025). کربن موجود در خاک، باعث اتصال ذرات می‌شوند که این فرایند باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌گردد (Lehmann and Jeseeph, 2015). دوده کربن با داشتن سطح ویژه حدود ۷۰ تا ۱۵۰ مترمربع بر گرم و تخلخل بالا، به جذب و حفاظت از کربوهیدرات‌های طبیعی موجود در خاک (تولید شده توسط میکروب‌ها، ریشه‌ها و تجزیه مواد آلی) کمک می‌نماید. پایداری شیمیایی بالا و حضور گروه‌های عاملی فعال در سطح

می‌تواند در ارتقاء کیفیت خاک مؤثر باشد (Bucur and Maniu, 2020; Kumar and Nagendran, 2012). اصلاح‌کننده‌های حاوی کربن به واسطه افزایش تخلخل و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، پایداری خاکدانه را بهبود داده و شرایط زیستی مناسبی برای رشد گیاهان فراهم می‌نماید (Yang et al., 2020). استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی موجب افزایش پایداری خاکدانه، ذخیره سازی کربن آلی و تغییرات مثبت در ساختار جوامع میکروبی خاک می‌شوند (Sun et al., 2023). مواد آلی باعث ایجاد تغییرات مثبت در توزیع کربن در اندازه‌های مختلف خاکدانه‌ها می‌شوند (Wu et al., 2024). بنابراین، دوده کربن به طور غیرمستقیم و از طریق تقویت نقش کربوهیدرات‌های بومی خاک، به پایداری خاکدانه‌های خاک کمک می‌کند؛ نه اینکه خود منبع مستقیم کربوهیدرات باشد.

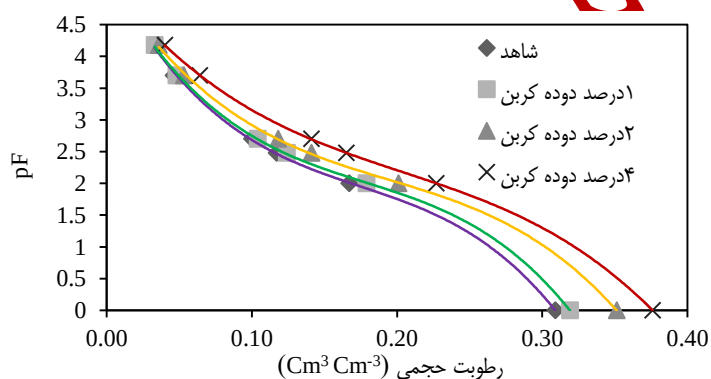


شکل ۱۰. مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف دوده کربن بر میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD) - میانگین‌های با حروف مشترک در سطح ۵ درصد آزمون توکی اختلاف معنی‌داری با هم ندارند. - (C0: شاهد، C1: یک درصد دوده کربن، C2: دو درصد دوده کربن، C4: چهار درصد دوده کربن)

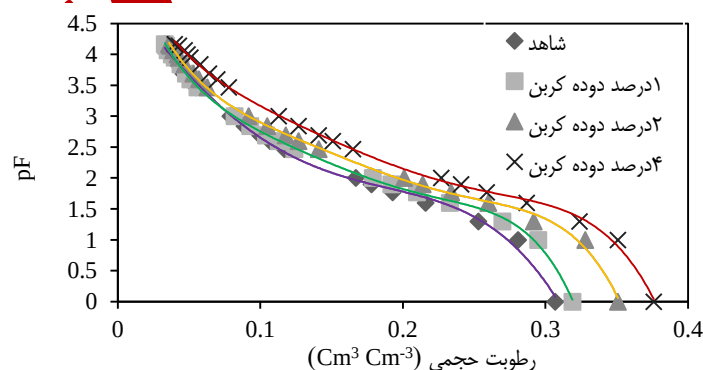
منحنی رطوبتی نمونه‌های خاک در تیمارهای مختلف دوده کربن بر اساس نقاط (مکش‌های) اندازه‌گیری شده و برآورد آن‌ها با مدل ونگنوختن-معلم به ترتیب در اشکال ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. در سطوح مختلف دوده کربن، میزان رطوبت خاک در مکش‌های مختلف نسبت به شاهد افزایش یافت. دوده کربن دارای ساختار متخلخل و سطح ویژه بالاست که نقش مهمی در جذب و نگهداری آب ایفا می‌کند؛ همچنین، چگالی پایین دوده کربن که در مطالعات مختلف بین ۰/۱ تا ۰/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب گزارش شده است، نشان‌دهنده وجود فضای خالی قابل توجه در ساختار آن می‌باشد که می‌تواند ظرفیت نگهداری آب را افزایش دهد (Kumar and Nagendran, 2012). در پژوهشی استفاده از مواد اصلاح‌کننده آلی ظرفیت نگهداری آب خاک را بین ۱۵ تا ۴۰ درصد افزایش داد (Hussain and Ravi, 2022). بنابراین مواد اصلاح‌کننده باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک شده و ظرفیت نگهداشت رطوبت خاک را بهبود می‌بخشند (Sun et al., 2025). افزایش رطوبت در تیمارهای حاوی دوده کربن را می‌توان به تخلخل، سطح ویژه بالا و چگالی کم کربن سیاه نسبت داد.

نتایج حاصل از تحقیق حاضر در راستای یافته‌ها و پژوهش‌های پیشین قرار داشته و نشان می‌دهد که دوده کربن می‌تواند به عنوان یک افزودنی مؤثر برای بهبود سطوح رطوبتی خاک در شرایط مختلف استفاده شود. با این وجود، برای درک بهتر فرایندهای دقیق تأثیر دوده کربن، انجام اندازه‌گیری‌های مستقیم ویژگی‌های فیزیکی آن در تحقیقات آتی توصیه می‌شود.

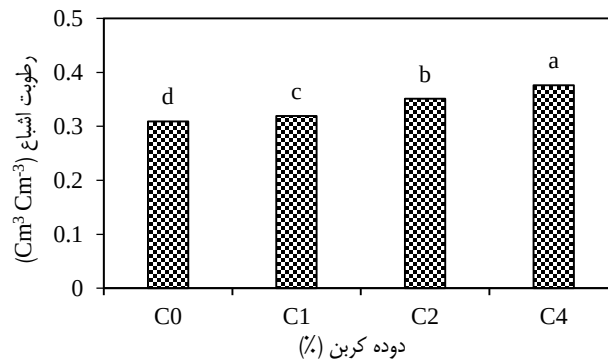
نتایج حاصل از بررسی اثر سطوح مختلف دوده کربن بر رطوبت اشباع خاک نشان داد که افزودن دوده کربن به خاک، به‌طور معنی‌داری رطوبت اشباع را افزایش می‌دهد. تیمار ۱ درصد دوده کربن، افزایش ۳/۲۳ درصدی در رطوبت اشباع نسبت به نمونه شاهد را نشان داد. این افزایش برای تیمارهای ۲ و ۴ درصد دوده کربن به ترتیب برابر با ۱۳/۵۹ و ۲۱/۶۸ درصد بود. بیشترین میزان افزایش رطوبت اشباع مربوط به تیمار ۴ درصد دوده کربن بود که موجب افزایش ۰/۰۶ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب رطوبت اشباع در مقایسه با نمونه شاهد گردید. این یافته‌ها حاکی از آن است که افزایش درصد دوده کربن در خاک، با افزایش رطوبت اشباع خاک همراه است (شکل ۱۳). نتایج سایر تحقیقات نیز مؤید افزایش رطوبت اشباع با مصرف بیوپچار به دلیل وجود کربن آلی است (Thao et al., 2024).



شکل ۱۱. منحنی رطوبتی خاک بر اساس نقاط اندازه‌گیری شده برای سطوح مختلف دوده کربن

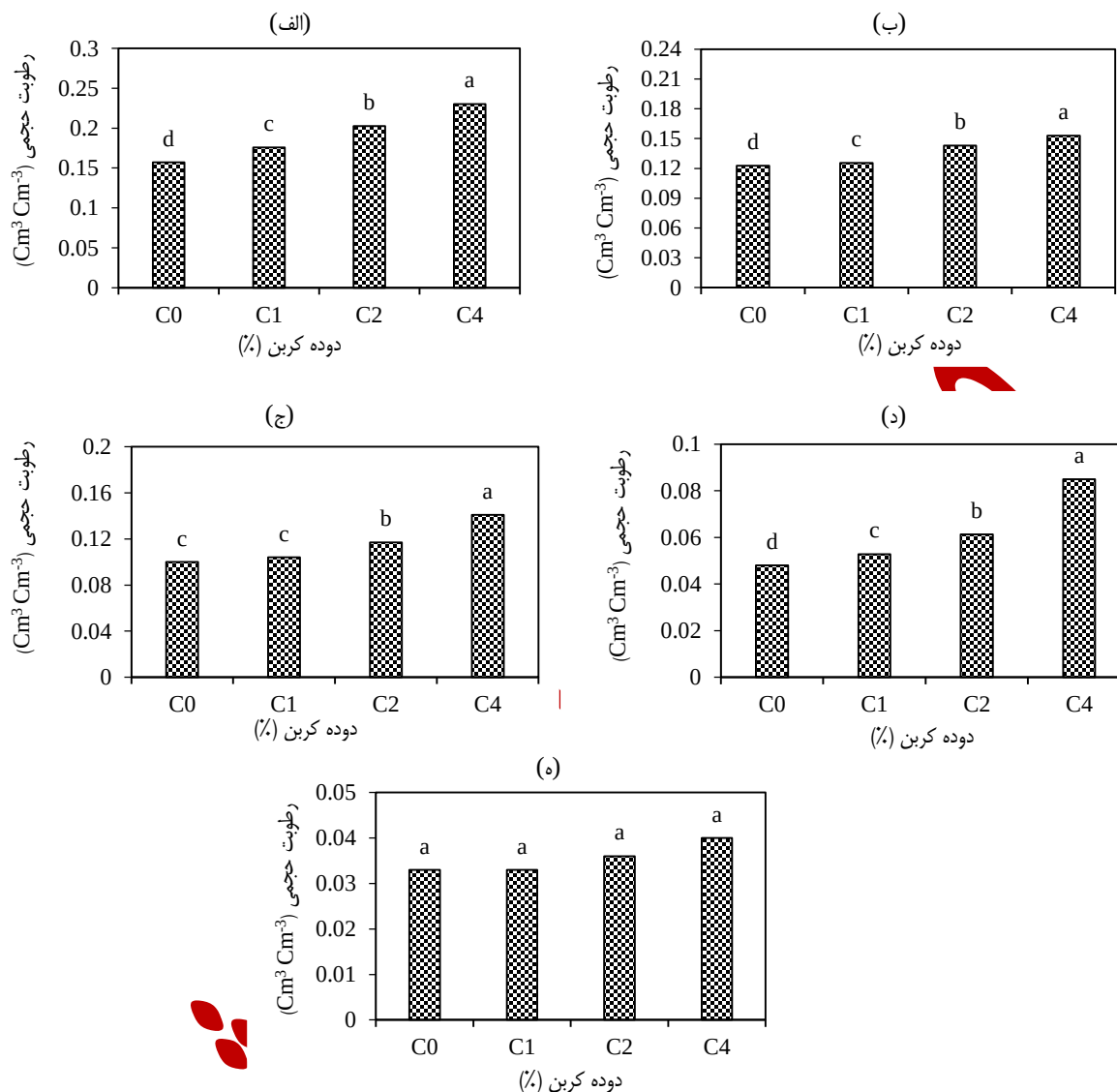


شکل ۱۲. منحنی رطوبتی خاک بر اساس معادله وانگنوختن - معلم برای سطوح مختلف دوده کربن



شکل ۱۳. مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف دوده کربن بر رطوبت اشباع خاک - میانگین‌های با حروف مشترک در سطح ۵ درصد آزمون توکی اختلاف معنی‌داری با هم ندارند. - (C0: شاهد، C1: یک درصد دوده کربن، C2: دو درصد دوده کربن، C4: چهار درصد دوده کربن)

نتایج مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف دوده کربن بر رطوبت خاک نشان داد که افزودن دوده کربن در تمامی سطوح آزمایش (۱، ۲ و ۴ درصد) باعث افزایش معنی‌دار رطوبت خاک در مکش‌های ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۵ بار نسبت به نمونه شاهد گردید. با این حال، تأثیر دوده کربن بر رطوبت خاک در مکش ۱۵ بار از نظر آماری معنی‌دار نبود. بیشترین افزایش رطوبت خاک در تیمار ۴ درصد دوده کربن مشاهده شد. در این تیمار، رطوبت خاک در مکش‌های ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۵ بار به ترتیب به میزان ۰/۰۷، ۰/۰۳، ۰/۰۴ و ۰/۰۳ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت (شکل ۱۴). به طور کلی با توجه به نتایج به دست آمده، تأثیر افزایش سطوح مختلف کاربرد دوده کربن بر میزان رطوبت خاک در مکش‌های مختلف و میزان رطوبت خاک از محدوده رطوبت اشباع تا مکش ۵ بار به دلیل بهبود ساختمان خاک معنی‌دار بود، اما در مکش ۱۵ بار تغییر معنی‌داری در میزان رطوبت خاک مشاهده نشد. در پژوهشی دیگر عدم تأثیر معنی‌دار بیوپار بر میزان رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم گزارش شد (نسیمی و همکاران، ۱۳۹۸). کربن آلی، منافذ ذخیره و انتقال خاک را با تشکیل منافذ ثانویه و تغییر اندازه و تراکم خاکدانه‌های خاک، افزایش می‌دهد. این تغییرات در ساختمان و منافذ خاک، باعث افزایش ذخیره آب قابل دسترس و پتانسیل انتقال آب و عناصر غذایی می‌شود. از سوی دیگر، رفتار رطوبتی خاک در مکش‌های ماتریک بالا، تحت کنترل بافت خاک و منافذ ریز آن قرار داشته اما در مکش‌های کم، میزان رطوبت خاک تحت تأثیر ساختمان خاک و تخلخل درشت آن می‌باشد (خادم و همکاران، ۱۳۹۶). تأثیر افزودن بیوپار بر میزان رطوبت خاک در کلاس‌های بافتی خاک و مکش‌های مختلف متفاوت می‌باشد. در پژوهشی بیشترین و کمترین تأثیر کربن آلی بر میزان رطوبت خاک در مکش‌های بالا (۱۵ بار) به ترتیب در خاک‌های شنی و رسی گزارش شد (Ouyang et al., 2013).



شکل ۱۴. مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف دوده کربن بر رطوبت خاک در مکش‌های ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ سانتی‌متر- میانگین‌های با حروف مشترک در سطح ۵ درصد آزمون توکی اختلاف معنی‌داری با هم ندارند. -C0: شاهد، C1: یک درصد دوده کربن، C2: دو درصد دوده کربن، C4: چهار درصد دوده کربن- (الف: رطوبت در مکش ۰/۱ بار، ب: رطوبت در مکش ۰/۳ بار، ج: رطوبت در مکش ۰/۵ بار، د: رطوبت در مکش ۱ بار، ه: رطوبت در مکش ۱۵ بار)

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، تأثیر کاربرد دوده کربن بر تحرک سرب در خاک آلوده بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن دوده کربن، به ویژه در سطوح وزنی ۲ و ۴ درصد، باعث کاهش بخش تبدلی (قابل تحرک) به میزان حدود ۵ تا ۲۲ درصد در خاک گردید. این اثر مثبت به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی دوده کربن و اثرگذاری آن بر افزایش بخش‌های اکسیدی، آلی و باقیمانده خاک است که به تثبیت بهتر سرب کمک می‌کند. علاوه بر این، کاربرد دوده کربن به خصوص در سطح ۴ درصد وزنی باعث افزایش پایداری خاکدانه‌ها به

میزان حدود ۲۱ درصد و بهبود قابل توجه منحنی رطوبتی خاک در راستای ارتقای ویژگی‌های فیزیکی خاک گردید. به طور کلی، دوده کربن با داشتن ویژگی‌های منحصر به فردی همچون سطح ویژه بالا، ساختار متخلخل، گروه‌های عاملی، ظرفیت جذب بالا و مقاومت مناسب در برابر تجزیه زیستی، می‌تواند به عنوان یک ماده اصلاح‌کننده مؤثر در بهبود کیفیت خاک‌های آلوده به سرب، به حفظ پایدار فلزات و کاهش سطح خطر زیست‌محیطی و غذایی در مناطق کشاورزی کمک کند. با این وجود، برای ارزیابی کاربرد عملی و گسترده‌تر این نتایج، انجام مطالعات میدانی در مقیاس مزرعه ضروری است.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان به دلیل فراهم آوردن امکانات انجام این پژوهش در قالب پایان‌نامه، تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

بقائی، امیر حسین و میرزایی، راحله (۱۳۹۸). اثر کاربرد کود گاوی و خاک‌اره بر کاهش پتانسیل خطرپذیری سرب ناشی از مصرف جعفری. تحقیقات نظام سلامت. ۱۵ (۲)، ۹۱-۹۸.

حاج عباسی، محمد علی؛ بسالت پور، اصغر و مللی، احمد رضا (۱۳۸۶). اثر تبدیل مراتع به اراضی کشاورزی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های جنوب و جنوب غربی اصفهان. علوم آب و خاک. ۱۱ (۴۲)، ۵۲۵-۵۳۴.

خادم، الهیار؛ رئیس، فائز و بهشارتی، حسین (۱۳۹۶). مروری بر اثرات کاربرد بیوجار بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک. مدیریت اراضی. ۵ (۱)، ۱۳-۳۰.

نسیمی، پریا؛ کریمی، احمد و متقیان، حمید رضا (۱۳۹۸). آثار بیوجار برگ خرما بر هدایت هیدرولیکی اشباع و ضرایب رطوبتی خاک لوم ر سی شنی. مجله پژوهش آب ایران. ۱۳ (۲)، ۱۶۱-۱۷۱.

Ahmad, M., Lee, S.S., Lee, S.E., Al-Wabel, M.I., Tsang, D.C.W., and Ok, Y.S. (2017). Biochar-induced changes in soil properties affected immobilization/ mobilization of metals/metalloids in contaminated soils. Journal of Soils and Sediments, 17(3): 717-730.

Ali, J., Tuzen. M., Shaikh, Qurat-ul-ain, Jatoi, W. B., Feng, X., Sun, G., and Saleh, T. A. (2024). A review of sequential extraction methods for fractionation analysis of toxic metals in solid environmental matrices, TrAC Trends in Analytical Chemistry, 173, 117639, ISSN 0165 9936.

Aranyos, J. T. (2025). Assessing the long-term effect of different organic amendments on the quality of acidic sandy soil. Soil Science Society of America Journal, 89, 20788.

Baghaie, AH, and Mirzaei, R. (2019). Effect of cow manure and sawdust on decreasing the potential risk of lead due to parsley consumption, 15(2): 91-8. (In Persian).

Bagnall, D.K., Morgan, C.L.S., Cope, M. et al (2022). Carbon-sensitive pedotransfer functions for plant available water. *Soil Science Society of America Journal*, 86 (3) 612-629.

Bahrami, A., and Aghamir, F. (2020). Simulation of vadose zone flow processes via inverse modeling of modified multistep outflow for fine-grained soils. *Soil Science Society of America Journal*, 84 (5) 1592-1605.

Blake, G. R., and Hartge, K. (1986). Bulk density. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, (5), 363-375.

Bowyoucos, G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, 56: 464-465.

Brady, N. C., and Weil, R. R. (2016). *The Nature and Properties of Soils*. Pearson Education.

Brito, C. H. V., Gloria, D. C. S., Santos, E. B., Domingues, R. A., Valente, G. T., Vieira, N. C. S., and Gonçalves, M. (2023). Porous activated carbon/graphene oxide composite for efficient adsorption of pharmaceutical contaminants. *Chemical Engineering Research and Design*, 191, 387-400.

Bucur, C. B., and Maniu, M. (2020). Structural and morphological characterization of carbon black materials. *Applied Surface Science*, 507, 145150.

Ćirić, V., Prekop, N., Šeremešić, S., Vojnov, B., Pejic, B., Radovanović, D., and Marinkovic, D. (2023). The implication of cation exchange capacity (CEC) assessment for soil quality management and improvement. *The Journal Agriculture and Forestry*. 69. 10.17707/AgricultForest.69.4.08.

Cui, L., Pan, G., Li, L., Bian, R., Liu, X., Yan, J., Quan, G., Ding, G., Chen, T., Liu, Y., Yin, C., Wei, C., Yang, Y., and Hussain, Q. (2016). Continuous immobilization of cadmium and lead in biochar amended contaminated paddy soil: A five-year field experiment. *Ecological Engineering*, 93:1-8.

Gusiatin, M.Z., Mazur, Z. and Radziemska, M. (2025). Application of an organic-mineral biocomposite for sustainable remediation of post-industrial soil contaminated with potentially toxic elements (PTEs). *Environmental Geochemistry and Health* 47, 168.

Haghighatjou, M., and Shirvani, M. (2020). Sugarcane bagasse biochar: preparation, characterization, and its effects on soil properties and zinc sorption-desorption. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 51, 1391–1405.

Hajabbasi, M.A., Besalatpour, A., and Melali, A.R. (2008). Impacts of converting rangelands to cultivated land on physical and chemical properties of soils in west and southwest of Isfahan. *Journal of Water and Soil Science*, 11(42): 525-534. (In Persian).

Hamzah, H.T., Sridevi, V., Surya, D.V., Palla, S., Yadav, A., and Rao, P.V. (2024). Conventional and microwave-assisted acid pretreatment of tea waste powder: analysis of functional groups using FTIR. *Environmental Science and Pollution Research*. 31, 57523–57532.

Hanway, J.J., and Heidel, H. (1952). Soil analysis methods as used in Iowa state college soil testing laboratory Iowa agric. 57(1): 187-193.

Hazelton, P. A., and Murphy, B. W. (2007). 'Interpreting Soil Test Results What Do All The Numbers Mean' CSIRO Publishing: Melbourne

Heidari, S.A., Amiri, M., Harifi, A. et al. (2025) Effect of thermal treatment on stabilization and solidification of heavy metal contaminated clayey soil. *Scientific Reports*. 15, 17197.

Hejazi Mahabadi, SH., Shorafa, M., Motesharezadeh, B, and Etesami, H. (2025). Mitigating soil compaction and enhancing corn (*Zea mays* L.) growth through biological and non-biological amendments. *Affiliations Expand*, 18; 25(1):74.

Himawan, S.P., Suntoro, S., and Rahardjo, S.B. (2020). Characterization and performance of low cost amendments to immobilize lead in contaminated soil. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 858, 012012.

Hussain, R. and Ravi, K. (2022). Investigating soil properties and vegetation parameters in different biochar-amended vegetated soil at large suction for application in bioengineered structures. *Scientific Reports* volume 12: 21261.

Iran Carbon Company (ICC). (2020). Products Brochure. <https://iran-carbon.com/>.

Islam, M.R., Singh, B., and Dijkstra, F.A. (2023). Microbial carbon use efficiency of glucose varies with soil clay content: a meta-analysis. *Applied Soil Ecology*, 181 - 104636.

Islam, M.S., Rezwani, F., Kashem, M.A., Moniruzzaman, M., Parvin, A., Das, S., and Hu, H. (2024). Impact of a phosphate compound on plant metal uptake when low molecular weight organic acids are present in artificially contaminated soils. *Environmental Advances*, 15, 100468.

ISO 11466. (1995). Soil Quality - Extraction of Trace Elements Soluble in Aqua Regia, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland. In.

Jafarabadi, A.R., Bakhtiari, A.R., Span`o, N., and Cappello, T. (2018). First report of geochemical fractionation distribution, bioavailability and risk assessment of potentially toxic inorganic elements in sediments of coral reef Islands of the Persian Gulf, Iran, *Marine Pollution Bulletin*, 137 -185.

Karimi, F., G. Rahimi, Z. Kolahchi, A. Khademi, and J. Nezhad. (2019). Using Industrial Sewage Sludge-Derived Biochar to Immobilize Selected Heavy Metals in a Contaminated Calcareous Soil. *Waste Biomass Valorization*. 11: 2825–2836.

Khadem, E., Raeisi, F., and Besharati, H. (2017). A review of the effects of biochar application on physical, chemical, and biological properties of soil. *Journal of Land Management*, 5(1), 13-30. (In Persian).

Khalid, N., Hussain, M., Young, H.S., Ashraf, M., Hameed, M., and Ahmad, R. (2018). Lead concentrations in soils and some wild plant species along two busy roads in Pakistan. *B.E.C.T.* 100:250-258.

Khan, F., Siddique, A. B., Shabala, S., Zhou, M., and Zhao, C. (2023). Phosphorus Plays Key Roles in Regulating Plants' Physiological Responses to Abiotic Stresses. *Plants*, 12(15), 2861.

Klute, A., and Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, (5): 687-734.

Kumar, A., and Nagendran, A. (2012). Carbon black: A review on its properties and applications. *Materials Science and Engineering: B*, 177(20), 1787–1796.

Kyari, M., Cunliffe, A., and Williams, PT. (2005). Characterization of oils, gases, and char in relation to the pyrolysis of different brands of scrap automotive tires. *Energy Fuels* 19:1165–1173.

Lehmann, J. and Joseph, S. (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. Routledge.

Liang, J., Yang, Z., Tang, L., Zeng, G., Yu, M., Li, X., Wu, H., Qian, Y., Li, X., and Luo, Y. (2017). Changes in heavy metal mobility and availability from contaminated soil. *Chemosphere*, (181):281-288.

- Liu, L., Li, W., Song, W., and Guo, M. (2018). Remediation techniques for heavy metal contaminated soils: Principles and applicability. *Science of the Total Environment*, 633, 206-219.
- Liu, Y., Lonappan, L., Brar, SK., and Yang, S. (2018). Impact of biochar amendment in agricultural soils on the sorption, desorption, and degradation of pesticides: A review. *Science of the Total Environment*. 645: 60–70.
- Liu, Z., Zhang, X., Wang, Y., and Wen, Y. (2025). Distributions and Influencing Factors of Heavy Metals in Soils from Zhenjiang and Yangzhou, China. *Minerals*, 15(2), 171.
- Lu, S.G., Sun, F.F. and Zong, Y.T. (2014). Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). *Catena*, (114): 37-44.
- Masocha, B.L., Dikinya, O., and Moseki, B. (2022). Bioavailability and contamination levels of Zn, Pb, and Cd in sandy-loam soils. *Botsw. Environmental Earth Sciences*, 81. [https://doi.org/ 10.1007/s12665-021-10129-3](https://doi.org/10.1007/s12665-021-10129-3).
- Meng, J., Tao, M., Wang, L., Liu, X., and Xu, J. (2018). Changes in heavy metal bioavailability and speciation from a Pb-Zn mining soil amended with biochars from co-pyrolysis of rice straw and swine manure. *Science of the Total Environment*, (633):300-307.
- Nasimi, P., Karimi, A., and Motaghian, HR. (2020). Effects of Biochar produced from date palm's leaves on saturated hydraulic conductivity and soil moisture coefficients of sandy clay loam soil. *Iranian Water Research Journal*, 13(3): 161-171. (In Persian).
- Olsen, S. R., Cole, C. V., F. S. Watanabe, and Dean, L. A. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *USDA Circular No. 939*, 1-18.
- Osooli, H., Karimi, A., Shirani, H. and Tabatabaie, S.H. (2021). Effect of type, amount and biochar particles size on porosity, penetration resistance and stability of aggregates in a calcareous soil. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, (11): 113-128.
- Ouyang, L., Wang, F., Tang, J., Yu, L. and Zhang, R. (2013). Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. *Journal of soil science and plant nutrition*. 13. 991-1002.
- Paul, S., Rahaman, M., Ghosh, S.K. et al. (2023). Recycling of waste tire by pyrolysis to recover carbon black: an alternative reinforcing filler. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 25, 1470-1481.
- Piri, M., Sepehr, E., Samadi, A., Farhadi, K.H., and Alizadeh, M. (2020). Contaminated soil amendment by diatomite: chemical fractions of zinc, lead, copper and cadmium. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(5): 1191-1200.
- Ramadan, M. M., Asran-Amal, and Abd-Elsalam, K. A. (2020). Micro/nano biochar for sustainable plant health: Present status and future prospects. In: *Carbon Nanomaterials for Agri-Food and Environmental Applications*, pp. 323-357.
- Rawat, J., Pandey, N., and Saxena, J. (2022). Role of Potassium in Plant Photosynthesis, Transport, Growth and Yield. In *Book*, 1-14.
- Raza, S., Miao, N., Wang, P. et al. (2020). Dramatic loss of inorganic carbon by nitrogen-induced soil acidification in Chinese croplands. *Global Change Biology*, 26:3738-3751.
- Rumi, F. A., Islam, M. S., and Kashem, M. A. (2025). Role of different organic amendments on Cd and Pb bioavailability, uptake, and growth by *Ipomoea aquatica*. *Environmental Challenges*, 101266.

Samsudin, F., Mahardika, M., Razali, N., and Mohamad Kassim, M. H. (2025). Activated Carbon: Past, Present and Future Trends in Sustainable Applications and the Role of Artificial Intelligence - A Comprehensive Review. *PaperASIA*, 41(4b), 314-331.

Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Ramakrishnan, M., Singh Sidhu, G. P., Bali, A. S., and Zheng, B. (2020). Photosynthetic response of plants under different abiotic stresses: a review. *Journal of Plant Growth Regulation*, (39): 509-531.

Sherrod, L.A., Dunn, G., and Peterson, G.A. (2002). A simple method for estimating calcium carbonate content of soils by using a pressure calcimeter. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33(11-12), 1941-1951.

Shi, W., Shao, H., Li, H., Shao, M. and Du, S. (2009). Progress in the remediation of hazardous heavy metal-polluted soils by natural zeolite. *Journal of Hazardous Materials*, (170): 1-6.

Smith, J. A., Brown, L. M., and Lee, K. (2022). Mechanisms of heavy metal immobilization in carbonate-rich soils. *Environmental Chemistry*, 19(3), 456-470.

Sparks, D.L., Singh, B., and Siebecker, M.G. (2023). *Environmental Soil Chemistry*, third ed., vol. 2, pp. 1-9.

Sun, J., Lu, X., Chen, G., Luo, N., Zhang, Q., and Li, X. (2023). Biochar promotes soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration and regulates microbial community structures in Mollisols from northeast China. Volume 9, issue 1, *SOIL*, 9, 261-275.

Sun, M., Shuanxi Fan, Sh., and Zhang, N. (2025). Effects of biochar combined with the application of plant ash and effective microorganisms on the soil in the vegetable facility. *Scientific Reports* volume 15: 15824.

Tessier, A., Campbell, P.G.C., and Bisson, M. (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, (51): 844-851.

Thao, T., Gonzales, M., Ryals, R., Dahlquist-Willard, R., Gerardo, C., Teamrat, D. and Ghezzehei, A. (2024). Biochar impacts on soil moisture retention and respiration in a coarse-textured soil under dry conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 88 (6) 1919-1931.

Ugbune, U., Edo, G.I., Arwenaghegha, J.O. et al. (2025). Production, characterization and application of charcoal on soil nutrients enhancement and remediation of soil toxic metals. *Proc. Indian National Science Academy* <https://doi.org/10.1007/s43538-025-00397-z>.

United States Department of Agriculture (USDA). (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. Agriculture handbook No. 60. Riverside, CA: United States Salinity Laboratory.

Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892-898.

Voltr, V., Menšík, L., Hlisnikovský, L., Hruška, M., Pokorný, E., and Pospíšilová, L. (2021). The Soil Organic Matter in Connection with Soil Properties and Soil Inputs. *Agronomy*, 11(4), 779.

Vuong, T. X., Nguyen, D. Ph., Nguyen, V. H. N., Pham, T. T. H., and Nguyen, T. T. T. (2025). Immobilization of lead and zinc in contaminated soil using taro stem-derived biochar and apatite amendments: a comparative study of application ratios and pyrolysis temperatures-Electronic supplementary information (ESI) available. 15 (15): 11975-12000.

Walkley, A., and Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.

Wang, M., Zhang, L., Li, A., et al. (2019). Comparative pyrolysis behaviors of tire tread and side wall from waste tire and characterization of the resulting chars. *Journal of Environmental Management* 232:364- 371.

Wei, T., Li, H., Yashir, N., Li, X., Jia, H., Ren, X., Yang, J., and Hua, L. (2023). Effects of urease- producing bacteria and eggshell on physiological characteristics and Cd accumulation of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) plants. *Environmental Science and Pollution Research*. 29, 63886-63897.

Wu, J., Tong, W., Jiang, J., Yang, H., Li, Z., Xu, C., Lin, Zh., and Chai, Y. (2024). Application of rice straw biochar increases soil aggregate stability and carbon and nitrogen distribution in paddy soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 30(3): 457-468.

Yang, J., Wang, Y., Gao, X., Zuo, R., Song, L., Jin, C., Wang, J., and Teng, Y. (2022). Vanadium: a review of different extraction methods to evaluate bioavailability and speciation, *Minerals*, 12 - 642.

Yang, J., Wu, L., and Zhang, Y. (2020). Effect of biochar application on physicochemical and hydraulic properties of loess. *Advances in Civil Engineering*, 4592092. <https://doi.org/10.1155/2020/4592092>.

Ye, L., Gao, G., Li, F., Sun, Y., Yang, S., Qin, Q., and Sun, L. (2025). A comprehensive review on biochar-based materials for the safe utilization and remediation of heavy metal-contaminated agricultural soil and associated mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 116179.

Yu, Q., Gao, B. and Zhang, X. (2025). Agricultural wastes improve soil quality and enhance the phytoremediation efficiency of economic crops for heavy metal-contaminated soils in mining areas. *Environmental Geochemistry and Health*, 47, 65.

Zeng, J., Tabein, C.B., Gao, W., Tang, L., Luo, X., Ke, W., Jiang, J., and Xue, S. (2023). Heterogeneous distributions of heavy metals in the soil-groundwater system empowers the knowledge of the pollution migration at a smelting site. *Chemical Engineering Journal*, 454 - 140307.

Zhang, H., Shao, J., Zhang, S., Zhang, X., and Chen, H., (2020). Effect of phosphorus-modified biochars on immobilization of Cu (II), Cd (II), and As (V) in paddy soil. *Journal of Hazardous Materials*, (390): 121-349.

Zhang, M., and Pu, J. (2011). Mineral materials as feasible amendments to stabilize heavy metals in polluted urban soils. *Journal of Environmental Sciences*, 23: 607-615.

Zhang, P., Xue, B., Jiao, L., Meng, X., Zhang, L., Li, B., and Sun, H. (2022). Preparation of ball milled phosphorus-loaded biochar and its highly effective remediation for Cd- and Pb-contaminated alkaline soil. *Science of the Total Environment*, 813, 152648.

Zhang, T, and Zhang, H. (2022). Microbial consortia are needed to degrade soil pollutants. *Microorganisms*, 10(2): 261.

Zhang, Y., Liu, H., and Wang, S. (2023). Bioavailability and environmental risk assessment of heavy metals in contaminated soils: Role of soluble and exchangeable fractions. *Environmental Pollution*, 315, 120408.