



Investigation of Biochar Application and Different Levels of Irrigation on Physico-chemical Properties and Microbial Respiration of Cadmium Contaminated Soil in Tomato Cultivation

Tara Jamili¹, Afsaneh Alinejadian-Bidabadi², Abbas Maleki³, Mohamad Feizian⁴, Omid Ali Akbarpour⁵

1. Soil Science Department, Faculty of Agriculture and Natural resources , Lorestan University, Iran, Email:

jamili.ta@fa.lu.ac.ir

2. Corresponding author, Soil Science Department, Faculty of Agriculture and Natural resources, Lorestan University, Iran,

Email: alinezhadian.a@lu.ac.ir

3. Water Engineering Department , Faculty of Agriculture and Natural resources, Lorestan University, Iran, Email:

maleki.a@lu.ac.ir

4. Soil Science Department, Faculty of Agriculture and Natural resources, Lorestan University, Iran, Email:

feizian.m@lu.ac.ir

5. Agronomy and Plant Breeding Department, Faculty of Agriculture and Natural resources , Lorestan University, Iran,

Email: akbarpour.aa@lu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: March. 14, 2022

Received: May. 17, 2022

Accepted: May. 18, 2022

Published online: June. 22, 2022

Keywords:

Carbon sequestration,
Heavy metals,
Soil quality,
Rice bran,
Soil moisture depletion

ABSTRACT

Soil pollution with heavy metals and moisture stress are the main threats to food security in the world. The aim of this study was to investigate the effect of biochar on physico-chemical properties and soil microbial respiration in reducing cadmium (Cd) stress in tomatoes, and to determine the optimal irrigation level for plant growth. A factorial-based experiment in a randomized complete block design using three levels of rice bran (0 (B₀), 3 (B₃), and 6 (B₆) ton/ha) and seven irrigation levels (50 (L₅₀), 60 (L₆₀), 70 (L₇₀), 80 (L₈₀), 90 (L₉₀), 100 (L₁₀₀), and 110 (L₁₁₀) percent of full irrigation (L₁₀₀) based on soil moisture depletion, respectively were performed on tomato cultivation in the research greenhouse, Faculty of Agriculture, Lorestan University, in 2019. The results showed that the best treatments in improving soil physical properties (bulk density, total porosity, mean weight diameter, water-stable aggregates, and stability index), soil nutrients (nitrogen, phosphorus, potassium, iron, manganese, zinc, and copper), and increasing soil microbial respiration, were L₉₀B₆, L₁₀₀B₆, and L₁₁₀B₆ treatments. The best tomato fruit yield with 1459.00, 1588.70, and 1610.30 g plant⁻¹ was observed in L₉₀B₆, L₁₀₀B₆, and L₁₁₀B₆ treatments, respectively, which have not significantly different. In addition, Cd concentration in tomato fruit in these treatments was 0.02 mg/kg, which is lower than that of the global average (FAO/WHO), while in treatments B₀ and B₃, severe toxicity of tomato fruit and reduced yield were observed. Therefore, in the irrigation level of %90 percent of soil moisture depletion (L₁₀₀) with the application of 6 ton/ha rice husk biochar (B₆), minimum Cd stress and maximum yield for the plant were observed, and more water consumption was prevented.

Cite this article: Jamili, T., Alinejadian-Bidabadi, A., Maleki, A., Feizian, M., & Akbarpour, O. A. (2022) Investigation of Biochar Application and Different Levels of Irrigation on Physico-chemical Properties and Microbial Respiration of Cadmium Contaminated Soil in Tomato Cultivation, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (5),937-956.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.340509.669232>



بررسی کاربرد بیوجار و سطوح مختلف آبیاری بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و تنفس میکروبی خاک آلوده به کادمیوم در کشت گوجه فرنگی

تارا جمیلی^۱، افسانه عالی نژادیان بیدآبادی^۲، عباس ملکی^۳، محمد فیضیان^۴ و امید علی اکبرپور^۵

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران. ایمیل: jamili.ta@fa.lu.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران. ایمیل: alinezhadian.a@lu.ac.ir

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران. ایمیل: maleki.a@lu.ac.ir

۴. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران. ایمیل: feizian.m@lu.ac.ir

۵. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران. ایمیل: akbarpour.aa@lu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۲۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۵/۱

واژه‌های کلیدی:

کربن اندوزی،

فلزات سنگین،

کیفیت خاک،

سبوس برنج،

تخلیه رطوبتی خاک

آلودگی خاک به فلزات سنگین و تنش رطوبتی از عوامل اصلی تهدیدکننده امنیت غذایی در جهان هستند. هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر بیوجار بر ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی و تنفس میکروبی خاک در کاهش تنش کادمیوم در گیاه گوجه فرنگی و تعیین سطح آبیاری بهینه رشد گیاه بود. آزمایش بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با کاربرد سه سطح بیوجار سبوس برنج (صفر (B0)، ۳ (B3) و ۶ (B6) تن در هکتار) و هفت سطح آبیاری (۵۰ (L50)، ۶۰ (L60)، ۷۰ (L70)، ۸۰ (L80)، ۹۰ (L90)، ۱۰۰ (L100) و ۱۱۰ (L110) درصد آبیاری کامل (L100) بر اساس تخلیه رطوبتی خاک) در کشت گیاه گوجه فرنگی در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان در سال ۱۳۹۸ اجرا شد. نتایج نشان داد که بهترین تیمارها در بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک (جرم مخصوص ظاهری، تخلخل خاک، پایداری خاکدانه‌ها، درصد خاکدانه‌های پایدار و شاخص پایداری خاکدانه‌ها)، عناصر غذایی خاک (نیترژن، فسفر، پتاسیم، آهن، منگنز، روی و مس) و افزایش تنفس میکروبی خاک، تیمارهای L100B6، L90B6 و L110B6 بودند. بهترین عملکرد میوه گوجه فرنگی با ۱۴۵۹/۰۰، ۱۵۸۸/۷۰ و ۱۶۱۰/۳۰ گرم در بوته، به ترتیب در تیمارهای L100B6، L90B6 و L110B6 مشاهده گردید که با یکدیگر اختلاف معنی‌داری نداشتند. به علاوه، غلظت کادمیوم در میوه گوجه فرنگی در این تیمارها ۰/۰۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که کمتر از میانگین استاندارد جهانی (FAO/WHO) است. در حالی که در تیمارهای B0 و B3، سمیت شدید میوه گوجه فرنگی و کاهش عملکرد دیده شد. بنابراین در سطح آبیاری ۹۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک با کاربرد ۶ تن در هکتار از بیوجار سبوس برنج، حداقل تنش کادمیوم و حداکثر عملکرد گیاه مشاهده گردید و از مصرف آب بیشتر جلوگیری به عمل آمد.

استناد: جمیلی، تارا؛ عالی نژادیان بیدآبادی، افسانه؛ ملکی، عباس؛ فیضیان، محمد؛ و اکبرپور، امیدعلی (۱۴۰۱). بررسی کاربرد بیوجار و سطوح مختلف آبیاری بر ویژگی‌های

فیزیکوشیمیایی و تنفس میکروبی خاک آلوده به کادمیوم در کشت گوجه فرنگی. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۵)، ۹۵۶-۹۳۷.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.340509.669232>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

آلودگی خاک به فلزات سنگین یکی از مشکلات زیست محیطی در جهان می‌باشد که تحت تأثیر عواملی از جمله افزایش فعالیت‌های انسانی، فوران آتشفشان‌ها و هوادیدگی مواد مادری ایجاد می‌شود (Liu et al., 2020; Wang et al., 2021). کادمیوم به عنوان یک فلز سنگین پرخطر برای انسان‌ها و گیاهان شناخته می‌شود و هنگامی که غلظت این فلز از حد بحرانی در محیط فراتر رود، می‌تواند برای انسان و دیگر موجودات خطر آفرین شود (Zwolak et al., 2019; Chen et al., 2021). کادمیوم یک عنصر غیرضروری و غیرقابل تجزیه زیستی با اثرات نامطلوب بر اکوسیستم و کیفیت خاک می‌باشد که در جذب عناصر ضروری توسط گیاه و در نتیجه رشد گیاه محدودیت ایجاد می‌کند (Majeed et al., 2021). با افزایش غلظت کادمیوم در خاک، جذب این فلز توسط گیاه افزایش می‌یابد (Mehrab et al., 2021)، در این راستا، تجمع کادمیوم در بافت‌های گیاهی می‌تواند باعث ایجاد اختلالات فیزیکی و بیوشیمیایی از طریق کلروز، نکروز و هموستاز یونی شود (Chen et al., 2020; Mehrab et al., 2021).

جهت کاهش تنش فلزات سنگین بر گیاه، روش‌های اصلاحی برای تثبیت این فلزات در خاک و کمک به مهار جذب فلزات سنگین توسط ریشه گیاه وجود دارد (Dhaliwal et al., 2020; Khosropour et al., 2021). یکی از روش‌های اصلاحی که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است استفاده از بیوجار می‌باشد. بیوجار، زغال تولید شده از زیست توده گیاهان و ضایعات کشاورزی در عدم حضور اکسیژن و یا حداقل حضور اکسیژن می‌باشد. به دلیل سرعت تجزیه آهسته بیوجار در مقایسه با سایر مواد آلی، این ترکیب دارای ظرفیت زیادی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای آزاد شده از بقایا از جمله دی‌اکسیدکربن و متان می‌باشد و می‌تواند سبب کربن‌اندوزی گردد (Khosropour et al., 2021). از منظر کشاورزی، یکی از مزایای بیوجار، مدیریت پسماندهای کشاورزی است (Khosropour et al., 2021). به علاوه، بیوجار به دلیل ماهیت قلیایی، چگالی بار الکترونگاتیو، تخلخل و سطح ویژه بالا، به صورت یک جاذب برای حذف یون‌های فلزات سنگین عمل کرده و از طریق کاهش فراهمی زیستی فلزات سنگین و تثبیت آن‌ها، در بهبود حاصلخیزی خاک مؤثر می‌باشد (Majeed et al., 2021). کاربرد بیوجار در خاک می‌تواند از طریق افزایش تخلخل خاک، سبب نگهداشت آب در خاک و افزایش کارایی مصرف آب شود و همچنین شرایط تنش رطوبتی را برای گیاه کاهش دهد (Hale et al., 2021). با این وجود، توانایی بهبود خاک با کاربرد بیوجار، به شدت به خواص خاک، نوع ماده اولیه که بیوجار از آن تهیه شده است، مقدار بیوجار مصرفی و دمای پیرولیز آن بستگی دارد (Karimi et al., 2020; Huang et al., 2021).

گوجه فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) با بیش از سه هزار گونه، با توزیع گسترده‌ی جهانی و ارزش اقتصادی فراوان، یکی از محبوب‌ترین سبزی‌ها و میوه‌های فصل گرم محسوب می‌شود. این گیاه به دلیل ارزش غذایی و تجاری بالا و همچنین تولید گسترده در جهان، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Melomey et al., 2019). گوجه فرنگی سرشار از ویتامین، مواد معدنی، اسیدهای آمینه مهم، فیبرهای غذایی و قند می‌باشد که به تغذیه مناسب و سالم کمک می‌کند (Dad et al., 2021). با توجه به این مورد که سمیت کادمیوم در خاک با تغییر برخی ویژگی‌های خاک می‌تواند اثر منفی بر کیفیت گیاه گوجه فرنگی داشته باشد، اصلاح خاک آلوده در کشت این گیاه امری ضروری به نظر می‌رسد. کاربرد مواد اصلاحی مانند بیوجار، احتمالاً با تغییر برخی خصوصیات خاک، بر کاهش تنش سمیت کادمیوم بر گیاه مؤثر می‌باشد. یکی از ضایعات کشاورزی فراوان و ارزان قیمت که می‌تواند جهت تهیه بیوجار مورد استفاده قرار گیرد سبوس برنج می‌باشد که بیوجار تولید شده از آن به عنوان جاذب فلزات سنگین عمل می‌کند (Xu et al., 2013). با این وجود هنوز مطالعات جامعی در رابطه با اثر بیوجار سبوس برنج بر خصوصیات خاک در سطوح مختلف آبیاری و جذب کادمیوم در گیاه گوجه فرنگی صورت نپذیرفته است. بنابراین، پژوهش حاضر با اهداف (۱) مطالعه ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و تنفس میکروبی خاک آلوده به کادمیوم در سطوح مختلف آبیاری با کاربرد بیوجار سبوس برنج در کشت گوجه فرنگی و (۲) برآورد تجمع کادمیوم در میوه گوجه فرنگی و تأثیر آن بر عملکرد گوجه فرنگی انجام شد.

مواد و روش‌ها

نمونه برداری و تجزیه خاک

این پژوهش در زمستان و بهار سال ۱۳۹۸ در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان به صورت گلدانی روی گیاه گوجه فرنگی انجام شد. برای اجرای این پژوهش، نمونه خاک سطحی از عمق ۳۰ سانتی‌متری مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان

جمع‌آوری گردید. نمونه خاک پس از هوا خشک شدن، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد و برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن مورد اندازه‌گیری قرار گرفت (جدول ۱). بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، مقادیر pH گل اشباع توسط pH متر و هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC_e) با هدایت سنج (Thomas, 1996)، ظرفیت تبادل کاتیونی از طریق جایگزینی استات آمونیوم (Sumner and Miller, 1996)، کربن آلی به روش والکی و بلاک (Walkley and Blake, 1934)، کربنات کلسیم معادل از طریق تیتراسیون با استفاده از سدیم استات مورد اندازه‌گیری قرار گرفت (Carter and Gregorich, 2008). همچنین نیتروژن کل با استفاده از دستگاه کج‌دال (مدل PDU_VB500، کشور ایران) (Brennan et al, 1993)، فسفر قابل جذب به روش اولسن و با کمک دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل PhotonixAr2015، کشور ایران) (Olsen, 1954)، پتاسیم قابل جذب به روش آمونیوم استات با دستگاه شعله سنجی (مدل Corning 410، کشور انگلستان) (Nelson and Sumner, 1996)، کلسیم و منیزیم محلول به روش کمپلکسومتری تعیین گردید (Carter and Gregorich, 2008). جرم مخصوص ظاهری خاک به روش سیلندر (Blake and Hartg, 1986) و رطوبت ظرفیت زراعی بصورت وزنی با کمک دستگاه صفحات فشاری مورد اندازه‌گیری قرار گرفت (Mehrab and Chorom, 2014). تنفس میکروبی خاک با روش گردآوری دی اکسید کربن آزاد شده در هیدروکسید سدیم و تیتراسیون برگشتی مقدار باقی‌مانده‌ی آن با اسیدکلریدریک (Anderson, 1982) و همچنین از عصاره‌گیر DTPA جهت اندازه‌گیری شکل قابل دسترس فلزات آهن، منگنز، روی، مس و کادمیوم استفاده شد (Lindsay and Norvel, 1978) و غلظت این فلزات با دستگاه جذب اتمی شعله‌ای (مدل FS AA 240، کشور آمریکا) با دقت در حد ppm، مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. خاک مورد مطالعه دارای بافت لوم رسی شنی و دارای ویژگی‌های خاک آهکی و کربن آلی کم بود (جدول ۱).

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

ویژگی	واحد	مقدار
بافت خاک	-	لوم رسی شنی
رس	%	۲۶/۷
سیلت	%	۱۵
شن	%	۵۸/۳
رطوبت ظرفیت مزرعه	%	۲۳
جرم مخصوص ظاهری	$g\ cm^{-3}$	۱/۴۰
pH	-	۷/۶۱
هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC_e)	$dS\ m^{-1}$	۰/۷۹
ظرفیت تبادل کاتیونی	$cmol\ +\ kg^{-1}$	۲۳/۱۴
کربن آلی	%	۰/۲۵
کربنات کلسیم معادل	%	۲۳/۰
نیتروژن کل	%	۰/۰۳
فسفر قابل جذب	$mg\ kg^{-1}$	۱/۱
پتاسیم قابل جذب	$mg\ kg^{-1}$	۱۴۴/۰
کلسیم	$meq\ L^{-1}$	۶/۵۳
منیزیم	$meq\ L^{-1}$	۲/۹۱
آهن قابل دسترس	$mg\ kg^{-1}$	۱/۲۴
منگنز قابل دسترس	$mg\ kg^{-1}$	۰/۵۵
روی قابل دسترس	$mg\ kg^{-1}$	۱/۰۸
مس قابل دسترس	$mg\ kg^{-1}$	۰/۴۲۷
کادمیوم قابل دسترس	$mg\ kg^{-1}$	<۰/۰۰۹

تهیه و آماده‌سازی و آنالیز بیوجار

از سبوس برنج به‌منظور تهیه بیوجار استفاده گردید. مقدار مورد نیاز از سبوس برنج از کارخانه‌های شالیکوبی مزارع برنج‌کاری شهرستان ویسیان که در محدوده‌ی غرب شهر خرم آباد (۲۴ کیلومتری دانشکده کشاورزی) قرار دارند، جمع‌آوری شد. بقایای سبوس برنج با آب معمولی و سپس با آب مقطر شسته شد و هوا خشک گردید و پس از عبور از الک چهار میلی‌متری، آن‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار داده شدند. جهت تهیه بیوجار، از کوره الکتریکی در عدم حضور اکسیژن استفاده شد و به منظور ایجاد

شرایط بدون اکسیژن از جریان گاز نیتروژن استفاده گردید (Cantrell *et al.*, 2012). به منظور تولید بیوچار، بقایای آون خشک شده سبوس برنج، به مدت ۴ ساعت در کوره الکتریکی در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس با نرخ افزایش دمای ۵ درجه سلسیوس در دقیقه قرار داده شد (Cantrell *et al.*, 2012). پس از خنک شدن بیوچار، برخی ویژگی آن مورد اندازه‌گیری قرار گرفت (جدول ۲). مقدار pH و EC بیوچار در محلول ۱ به ۱۰ (بیوچار به آب مقطر) بدست آمد (Singh *et al.*, 2017). ظرفیت تبادل کاتیونی آن از طریق روش اصلاح شده جایگزینی استات آمونیوم (Domingues *et al.*, 2017) و کربن آلی بیوچار به روش والکی و بلاک (Walkley and Black, 1934) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. غلظت فلزات آهن، منگنز، روی، مس و کادمیوم پس از هضم خاکستر بقایا در اسیدنیتریک غلیظ و آب‌اکسیژنه (Singh *et al.*, 2017) و با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. غلظت نیتروژن کل با دستگاه کجلدال (Brennan *et al.*, 1993)، فسفر قابل جذب با استفاده از عصاره‌گیری با نیترات آمونیوم با دستگاه اسپکتروفوتومتر (Olsen, 1954)، غلظت پتاسیم قابل جذب به کمک دستگاه شعله سنجی (Nelson and Summer, 1996) و کلسیم و منیزیم محلول به روش کمپلکسومتری (Carter and Gregorich, 2008) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. همچنین عملکرد بیوچار (Y_B) از تقسیم وزن بیوچار تهیه شده (W_B) به وزن آون خشک بقایای خام (W_R) مطابق رابطه ۱ بدست آمد (Singh *et al.*, 2017).

$$Y_B (\%) = \frac{W_B (g)}{W_R (g)} \times 100 \quad \text{رابطه ۱}$$

جدول ۲. ویژگی‌های بیوچار تهیه شده

مقدار	واحد	ویژگی
۸/۵۱	-	pH
۱/۰۱	dS m ⁻¹	هدایت الکتریکی (EC)
۳۴/۰۱	cmol+ kg ⁻¹	ظرفیت تبادل کاتیونی
۳۳/۵۸	%	کربن آلی
۱/۱۹	%	نیتروژن کل
۰/۴۰	g kg ⁻¹	فسفر کل
۲۰/۰۳	g kg ⁻¹	پتاسیم کل
۱/۹۰	meq L ⁻¹	کلسیم
۰/۸۲	meq L ⁻¹	منیزیم
۱۴۰/۳	mg kg ⁻¹	آهن کل
۹۵/۴	mg kg ⁻¹	منگنز کل
۴/۲	mg kg ⁻¹	روی کل
۲/۳	mg kg ⁻¹	مس کل
-	mg kg ⁻¹	کادمیوم کل

طرح آزمایشی و آماده سازی گلدان‌ها

پژوهش حاضر به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در خاک آلوده به کادمیوم در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان در سال ۱۳۹۸ اجرا گردید. فاکتورهای آزمایشی شامل؛ (۱) سطوح آبیاری (در هفت سطح ۵۰ (L₅₀)، ۶۰ (L₆₀)، ۷۰ (L₇₀)، ۸۰ (L₈₀)، ۹۰ (L₉₀)، ۱۰۰ (L₁₀₀) و ۱۱۰ (L₁₁₀) درصد، بر اساس تخلیه رطوبتی خاک) و (۲) بیوچار سبوس برنج (در سه سطح صفر (B₀)، ۳ (B₃) و ۶ (B₆) تن در هکتار) بودند. آزمایش حاضر با ۲۱ تیمار در ۸۴ گلدان انجام شد و از تیمار بدون کاربرد بیوچار (B₀) به عنوان تیمار شاهد استفاده گردید.

جهت آماده‌سازی گلدان‌ها، ابتدا خاک در مقدار مورد نیاز کشت گیاه گوجه فرنگی از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و در مقادیر ۱۰ کیلوگرمی جهت استفاده در گلدان‌ها توزین شد. سپس مقادیر بیوچار مطابق تیمارهای آزمایشی به خاک‌های توزین شده اضافه گردید. همچنین از محلول نمک نیترات کادمیوم (Cd(NO₃)₂) با غلظت ۵ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک برای آلوده کردن خاک استفاده شد (gharahi, 2022). پس از اسپری محلول نیترات کادمیوم به خاک‌های توزین شده حاوی بیوچار، نمونه‌های خاک به خوبی مخلوط گردید و به‌منظور طی کردن دوره خوابانیدن، به مدت ۶۰ روز در دمای ۳ ± ۲۲ و رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت زراعی قرار داده شدند. همچنین جهت ایجاد شرایط همگن در خاک‌های آلوده، نمونه‌های خاک دو مرتبه در هفته به خوبی مخلوط شدند (Biria *et al.*, 2017). پس از اتمام دوره

خوابانیدن، خاک ها به گلدان های مناسب منتقل و در گلخانه قرار داده شدند.

کشت گوجه فرنگی و اعمال سطوح آبیاری

کشت نشاء گوجه فرنگی (رقم هیراد) در گلخانه انجام شد و نشاءها پس از گذشت ۲۱ روز به گلدان های اصلی منتقل گردیدند. پس از اختلاط خاک و بیوچار و اضافه نمودن آن به گلدان ها، گلدان ها به صورت کامل اشباع گردیدند. سپس روی گلدان ها جهت جلوگیری از تبخیر آب پوشانده شد. خروج آب ثقیلی از انتهای گلدان در بازه های زمانی مشخص اندازه گیری گردید و حدوداً بعد از گذشت ۲۴ ساعت خروج آب ثقیلی متوقف گردید. وزن گلدان در این حالت به عنوان وزن در حالت ظرفیت زراعی در نظر گرفته شد (pourmansour et al., 2019). زمان انتقال نشاءها به گلدان ها، رطوبت خاک بصورت وزنی در حد رطوبت ظرفیت زراعی تنظیم گردید، سپس در هر گلدان دو نشاء گوجه فرنگی با طول اندام هوایی ۱۰ سانتی متر کاشته شد. به منظور کشت گیاه از گلدان های ۱۰ کیلوگرمی استفاده گردید و جهت جلوگیری از تنش تغذیه ای، مقادیر عناصر غذایی مورد نیاز نیتروژن، فسفر و پتاسیم براساس نتایج آزمون خاک محاسبه و به ترتیب به میزان ۵۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار از منابع کود اوره، سوپر فسفات تریپل و سولفات پتاسیم قبل از انتقال نشاء گوجه فرنگی، به خاک گلدان ها اضافه شد. جهت اطمینان از استقرار کامل گیاهان، اعمال سطوح آبیاری پس از گذشت سه هفته از انتقال نشاءها به گلدان های اصلی آغاز شد و تا پایان دوره رشد به مدت ۱۲۰ روز ادامه یافت. در طی دوره رشد گیاه، عملیات وجین علف های هرز بعد از اولین آبیاری تا مرحله برداشت به صورت دستی انجام گردید. همچنین جهت مدیریت آفات و بیماری های قارچی از سموم مرتبط استفاده گردید. پس از طی دوره ۴ ماهه رشد گوجه فرنگی، میوه رسیده گیاه گوجه فرنگی برداشت شد. (شکل ۱)



شکل ۱. مراحل آماده سازی خاک و کشت گوجه فرنگی

به دلیل هدایت الکتریکی مناسب آب گلخانه (۴۵۰ میکروموس بر سانتی متر) و همچنین واقعی تر کردن محیط رشد گیاه به شرایط رشدی آن در گلخانه های تولیدی و مزارع گوجه فرنگی، از آب موجود در سیستم لوله کشی گلخانه استفاده شد. آبیاری تمام گلدان ها براساس تخلیه رطوبتی انجام شد. به این صورت که پس از استقرار گیاه و جهت اعمال تیمارهای آبیاری، مقدار آب مورد نیاز گیاه در شرایط ظرفیت زراعی (رطوبت ۲۳ درصد) به عنوان ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه (L₁₀₀) در نظر گرفته شد و میزان آب مورد نیاز در سایر تیمارهای آبیاری (L₅₀، L₆₀، L₇₀، L₈₀، L₉₀، L₁₀₀ و L₁₁₀) به ترتیب با اعمال ضرایب ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹ و ۱/۱ نسبت به تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی (L₁₀₀) محاسبه و به گلدان ها اضافه گردید. هر ۳ روز یک مرتبه عمل آبیاری گلدان ها انجام شد تا کمبود آب نسبت به سطوح مختلف آبیاری مورد نظر تأمین شود.

تجزیه گیاه و خاک

پس از برداشت گیاه، عملکرد میوه گوجه فرنگی از حاصل ضرب تعداد میوه در بوته به وزن میوه محاسبه شد. همچنین جهت اندازه گیری غلظت کادمیوم در میوه گوجه فرنگی، میوه خشک و سپس پودر گردید و یک گرم از آن به عنوان نمونه برداشت شد. نمونه گیاه با ۱۰ میلی لیتر از اسید نیتریک غلیظ و ۲/۶ میلی لیتر آب اکسیژنه طی ۲ ساعت در بن ماری با دمای ۶۵ درجه سلسیوس هضم گردید (Abdel-Shafey et al., 1994) و غلظت کادمیوم در عصاره استخراج شده با جذب اتمی مورد اندازه گیری قرار گرفت.

به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک پس از برداشت گیاه، خاک هر گلدان هوا خشک شد و نمونه‌هایی از خاک جهت تجزیه به آزمایشگاه منتقل شد. تمام ویژگی‌های شیمیایی خاک و همچنین جرم مخصوص ظاهری خاک به روش‌های گفته شده در تجزیه خاک اولیه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل؛ درصد تخلخل کل (F) با استفاده از جرم مخصوص ظاهری و حقیقی، پایداری خاکدانه‌ها (MWD) و درصد خاکدانه‌های پایدار (WSA) به روش الک تر (Hillel, 1980) و همچنین شاخص پایداری خاکدانه‌ها (SI) که خطر تخریب ساختمان خاک در اثر کشت و کار را نشان می‌دهد با استفاده از مقدار کربن آلی و درصد رس و سیلت (Pieri, 1992) و با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه شدند:

$$F = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}\right) \times 100 \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن F درصد تخلخل کل خاک، ρ_b جرم مخصوص ظاهری خاک (از تقسیم جرم خاک خشک بر حجم کل خاک) و ρ_s جرم مخصوص حقیقی خاک می‌باشند. جرم مخصوص حقیقی خاک از روش پیکنومتر، $2/65$ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد.

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i \quad \text{رابطه ۳}$$

که در این رابطه \bar{x}_i میانگین قطر خاکدانه‌های باقی مانده بر روی هر الک i (میانگین قطر منافذ الک بالایی و پایینی)، n تعداد الک‌ها و w_i نسبت وزن خاکدانه‌های روی هر الک به وزن کل خاک به کار برده شده در ابتدای آزمایش پس از کسر ذرات شن و سنگ ریزه می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه شد:

$$w_i = \frac{w_i - w_{i(s)}}{w_t - \sum_{i=1}^n w_{i(s)}} \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن w_i وزن ذرات باقی مانده در دامنه i ، $w_{i(s)}$ وزن ذرات شن و سنگریزه در دامنه i و w_t وزن آون خشک خاک می‌باشد.

$$WSA = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^5 w_i}{w} \quad \text{رابطه ۵}$$

که در این رابطه w جرم کل خاکدانه است.

$$SI = 100 \times \frac{1.7240C}{(\text{Silt} + \text{Clay})} \quad 0 \leq SI \leq \infty \quad \text{رابطه ۶}$$

در این رابطه، OC میزان کربن آلی خاک، و $(\text{Silt} + \text{Clay})$ مجموع درصد رس و سیلت خاک است. مقدار SI بزرگتر از ۹ درصد، نمایانگر پایداری خاکدانه‌ها می‌باشد.

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه‌های آماری داده‌ها، به وسیله نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۲) انجام شد و نمودارها توسط نرم‌افزار Excel رسم شدند. همچنین مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن و در سطح احتمال ۵ درصد محاسبه گردید.

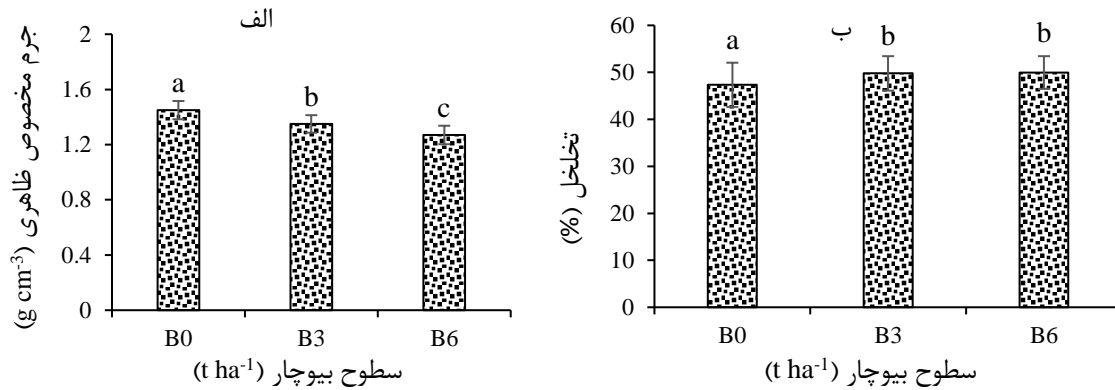
نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی خاک

جرم مخصوص ظاهری و تخلخل خاک

نتایج نشان داد که سطوح آبیاری نتوانست بر تغییرات جرم مخصوص ظاهری و تخلخل خاک اثر معنی‌داری داشته باشد در حالی که با افزودن مقادیر بیوچار به خاک، جرم مخصوص ظاهری و تخلخل خاک به ترتیب به صورت معنی‌داری کاهش و افزایش یافتند (شکل ۲ الف و ب). بطور میانگین جرم مخصوص ظاهری خاک در تیمارهای B_3 و B_6 در مقایسه با تیمار شاهد (B_0) به ترتیب $6/9$ و $12/9$ درصد کاهش یافت. درحالی که میانگین مقدار تخلخل خاک در تیمارهای B_3 و B_6 به ترتیب $5/1$ و $5/5$ درصد بیش‌تر از تیمار B_0 بود. کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک و افزایش تخلخل کل خاک در اثر کاربرد بیوچار را می‌توان به ویژگی‌های منحصر به فرد بیوچار بویژه منافذ بالای آن و تأثیر آن بر کاهش تراکم ذرات خاک نسبت داد. ظرفیت تبادل کاتیونی بالای بیوچار مورد استفاده ($34 \text{ cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$ ، جدول ۱) نیز مؤید منافذ زیاد و سطوح تبدیلی بالای بیوچار می‌باشد. بیوچار یک ترکیب آلی است که با افزایش خاکدانه‌سازی می‌تواند ساختمان فیزیکی خاک را بهبود بخشد (Zhang et al., 2020a). Zhang et al. (2020b) نیز با انجام پژوهشی تأثیر کاربرد بیوچار کاه و کلش گندم بر ویژگی‌های فیزیکی خاک در شرایط سطوح مختلف آب آبیاری را بررسی کردند. به‌طور مشابه با پژوهش حاضر، نتایج مطالعه آن‌ها نیز

نشان داد اثر سطوح مختلف آبیاری بر جرم مخصوص ظاهری و تخلخل خاک معنی‌دار نبود درحالی که کاربرد بیوچار سبب افزایش معنی‌دار تخلخل خاک و کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک شد. نتایج پژوهش Liang *et al.* (2021) نیز در یک خاک قلیایی تیمار شده با بیوچار، کاهش معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری خاک و افزایش معنی‌دار تخلخل خاک را نشان داد.



شکل ۲. مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای مختلف بیوچار بر جرم مخصوص ظاهری (الف) و تخلخل خاک (ب) B₀، B₃ و B₆ به ترتیب کاربرد صفر، سه و شش تن بیوچار در هکتار می‌باشند.

پایداری خاکدانه‌ها (MWD)، درصد خاکدانه‌های پایدار (WSA) و شاخص پایداری خاکدانه‌ها (SI)

مقایسه میانگین اثر متقابل تیمارها نشان داد که با کاهش سطح آب آبیاری در هر سه سطح کاربرد بیوچار، مقادیر MWD، WSA و SI به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (جدول ۳). در سطوح آبیاری مختلف، MWD تحت تأثیر کاربرد B₆ (۱۸/۶ تا ۲۱/۹ درصد) و B₃ (۹/۷ تا ۱۱/۰ درصد) در مقایسه با B₀ افزایش نشان داد. مقادیر WSA نیز در تمامی سطوح آب آبیاری، در B₃ و B₆ در مقایسه با B₀ به‌طور معنی‌داری (۱۱/۱ تا ۳۵/۶۶ درصد) بیش‌تر بود. همچنین بررسی تیمارهای حاوی بیوچار نشان داد که در تمامی سطوح آب آبیاری، SI در تیمارهای B₆ (۱۹/۲ تا ۵۱/۲ درصد) بیش‌تر از تیمارهای B₃ بود (جدول ۳).

افزایش MWD در اثر کاربرد بیوچار، نشان‌دهنده توانایی بیوچار در بهبود نیروی چسبندگی بین ذرات خاک است (Tian *et al.*, 2020). دو عامل اساسی که در تشکیل و پایداری خاکدانه نقش دارند شامل عوامل چسباننده ذرات به یکدیگر و زمان لازم برای تأثیر عوامل یادشده می‌باشند. هرچه فعالیت این دو عامل بیش‌تر باشد و شرایط خاکدانه‌سازی بیشتر مهیا گردد، استحکام خاکدانه‌ها افزایش یافته و از درصد تخریب آن‌ها کاسته خواهد شد. یکی از دلایل افزایش MWD در اثر کاربرد سطوح مختلف بیوچار این است که در حضور بیوچار ذرات معدنی خاک می‌توانند با سهولت بیشتری از طریق نیروهای فیزیکی، شیمیایی و فعالیت‌های میکروبی به هم متصل و خاکدانه را تشکیل دهند (Zhang *et al.*, 2020a). در این راستا کربن آلی موجود در بیوچار می‌تواند لیگاند‌های آلی را به‌همراه پیوند با کاتیون‌های چند ظرفیتی در سطح ذرات خاک تشکیل دهد که ترکیب ذرات آلی و معدنی سبب تشکیل خاکدانه‌های ریز و سپس خاکدانه‌های درشت و مقاوم می‌شود (Tian *et al.*, 2020). ماده آلی با اتصال ذرات خاک به یکدیگر و همچنین افزایش جمعیت و فعالیت میکروبی خاک، در افزایش چسبندگی بین ذرات خاک و پایداری ساختمان خاک نقش داشته و سبب افزایش WSA می‌شود (Bai *et al.*, 2019)، با این وجود در شرایط رطوبتی مناسب، احتمالاً تأثیر مواد آلی در چسبندگی و خاکدانه‌سازی بهبود می‌یابد. مصرف بیوچار در افزایش MWD، WSA و SI از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، به طوری که در مقادیر بالاتر مصرف بیوچار در خاک، مقادیر این شاخص‌ها بصورت معنی‌داری افزایش می‌یابند (Fu *et al.*, 2021; Ibrahim *et al.*, 2021). Tian *et al.* (2020) با انجام پژوهشی گزارش کردند کاربرد بیوچار گاه و گلیس برنج تهیه شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس، سبب افزایش MWD (۱۴/۲۸ تا ۱۵/۸۵ درصد) و WSA (۳۶/۲۶ تا ۴۶/۲۲ درصد) در مقایسه با تیمار شاهد شد. در مطالعات دیگر نیز با کاربرد بیوچار تهیه شده از پوسته بادام زمینی و بقایای ذرت تولید شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس، افزایش معنی‌دار MWD در خاکدانه‌هایی با قطر ۰/۱ تا ۰/۴ میلی‌متر گزارش شد (Ibrahim *et al.*, 2021; El Namas, 2020; Ren *et al.*, 2021). جهت مقایسه اثر بیوچار تولید شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس از ضایعات نخل خرما و کمپوست تولید شده از این ضایعات گزارش

نمودند که هر دو این مواد اصلاح کننده سبب افزایش MWD، WSA در خاک نسبت به شاهد گردید ولی با این وجود اثر بخشی بیوجار از کمپوست در افزایش این ویژگی‌ها بالاتر بود.

جدول ۳. تأثیر متقابل تیمارهای بیوجار و سطوح آبیاری بر MWD، WSA و SI

تیمارها	پایداری خاکدانه (mm)			درصد خاکدانه‌ی پایدار (%)			شاخص پایداری خاکدانه (%)		
	B ₆	B ₃	B ₀	B ₆	B ₃	B ₀	B ₆	B ₃	B ₀
L50	۱/۳۸ ^h	۱/۲۶ ⁿ	۱/۱۳ ^s	۱۵/۵۳ ^{defgh}	۱۴/۶۶ ^{ghij}	۱۲/۷۳ ^k	۰/۳۱ ^p	۱/۹۳ ^l	۲/۷۳ ^{de}
L60	۱/۴۰ ^f	۱/۲۸ ^l	۱/۱۶ ^r	۱۶/۷۳ ^{cd}	۱۴/۹۴ ^{efghi}	۱۳/۴۰ ^j	۰/۹۹ ^o	۱/۹۳ ^l	۲/۷۵ ^d
L70	۱/۴۳ ^e	۱/۳۲ ^k	۱/۱۹ ^q	۱۵/۶۰ ^{defg}	۱۴/۲۳ ^{de}	۱۳/۵۳ ^{ij}	۱/۱۳ ^m	۱/۹۳ ^l	۲/۹۰ ^c
L80	۱/۴۵ ^d	۱/۳۴ ^j	۱/۲۱ ^p	۱۸/۵۳ ^a	۱۶/۲۳ ^{de}	۱۳/۶۶ ^{ij}	۱/۴۵ ^m	۲/۲۵ ^h	۲/۹۰ ^c
L90	۱/۴۸ ^c	۱/۳۷ ⁱ	۱/۲۵ ^o	۱۸/۱۸ ^{ab}	۱۶/۲۶ ^{ghij}	۱۴/۲۶ ^{ghij}	۲/۰۰ ^k	۲/۳۸ ^g	۲/۹۳ ^c
L100	۱/۵۰ ^{ab}	۱/۳۸ ^{gh}	۱/۲۵ ^o	۱۸/۱۶ ^{ab}	۱۶/۰۶ ^{def}	۱۴/۱۶ ^{ghij}	۲/۰۹ ⁱ	۲/۷۰ ^e	۳/۸۹ ^a
L110	۱/۵۱ ^a	۱/۳۹ ^g	۱/۲۷ ^m	۱۸/۰۱ ^{abc}	۱۶/۰۱ ^{def}	۱۳/۶۹ ^{ij}	۲/۰۵ ^l	۲/۵۸ ^f	۳/۰۸ ^b

* در هر ستون اعدادی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند از لحاظ آماری در سطح پنج درصد معنی دار نیستند.

B₀، B₃ و B₆ به ترتیب کاربرد صفر، سه و شش تن بیوجار در هکتار و L50، L60، L70، L80، L90، L100 و L110 به ترتیب ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۱۰ درصد آبیاری کامل (L100) بر اساس تخلیه رطوبتی خاک می‌باشند.

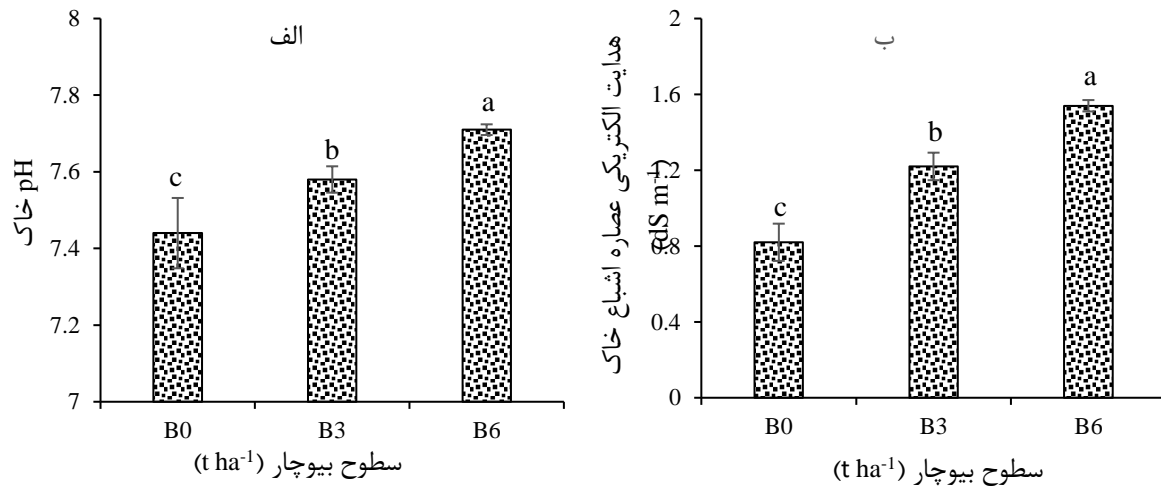
ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک

EC_e و pH

مطابق شکل ۳ الف، کاربرد بیوجار سبب افزایش معنی‌دار pH خاک گردید، به طوری که pH خاک در تیمارهای B₃ و B₆ با مقادیر متوسط ۷/۵۸ و ۷/۷۱ به ترتیب ۰/۱۳ و ۰/۲۶ واحد بیش‌تر از تیمار B₀ با pH برابر ۷/۴۴ است. در مطالعه حاضر از بیوجار سبوس برنج تهیه شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس با pH نسبتاً بالا (pH = ۸/۵۱) استفاده شد (جدول ۲)، بنابراین افزایش معنی‌دار pH خاک پس از کاربرد بیوجار در پایان دوره کشت را می‌توان به pH بالای بیوجار نسبت داد. Moradi and Karimi (2021) نیز گزارش کردند در اثر کاربرد بیوجار تهیه شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس در یک خاک آهکی آلوده به کادمیوم، pH خاک افزایش یافت. مطالعات همچنین نشان داده است که در شرایط pH نسبتاً بالای بیوجار، هیدروکسیدها و کربنات‌های موجود در زغال‌های زیستی می‌توانند سبب افزایش pH خاک شوند (Karimi et al., 2020). افزایش pH خاک در اثر کاربرد بیوجار می‌تواند به دلیل وجود کربنات‌های قلیایی، فلزات قلیایی خاکی و آنیون‌های آلی غالب در ترکیب خاکستر آن باشد (Moradi and Karimi, 2021; Karimi et al., 2020; Ghorbani et al., 2019). همچنین گزارش شده است که گروه‌های عاملی سطحی موجود در سطح بیوجار مانند گروه‌های عاملی فنولی و کربوکسیلی و توانایی آن‌ها در ایجاد پیوند با یون هیدروژن در فاز محلول خاک، احتمالاً در افزایش pH خاک در خاک‌های تیمار شده با بیوجار مؤثر می‌باشد (Salam et al., 2019).

کاربرد بیوجار در خاک همچنین سبب افزایش معنی‌دار در EC_e خاک شد. در تیمارهای B₃ و B₆ مقدار متوسط EC_e خاک به ترتیب ۱/۵۴ و ۱/۲۲ بود که این مقادیر به ترتیب ۰/۴۰ و ۰/۷۲ دسی‌زیمنس بر متر بیش‌تر از تیمار B₀ با EC_e برابر ۰/۸۲ دسی‌زیمنس بر متر اندازه‌گیری شدند (شکل ۳ ب). مطابق جدول ۲، بیوجار مورد استفاده دارای EC برابر با یک دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد که این امر توانسته است EC خاک در تیمارهای حاوی زغال زیستی را بصورت مؤثری افزایش دهد. افزایش EC_e خاک در اثر کاربرد بیوجار می‌تواند به دلیل آزاد شدن کاتیون‌های قلیایی موجود در ساختار زغال زیستی در محلول خاک باشد. زغال زیستی مورد استفاده در پژوهش حاضر حاوی پتاسیم قابل استفاده نسبتاً بالا (۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) است. از آنجا یون‌های قلیایی (بویژه پتاسیم) بر افزایش EC خاک بسیار مؤثر هستند (Meng et al., 2021)، بنابراین افزایش EC_e خاک پس از کاربرد بیوجار را می‌توان به غلظت نسبتاً بالای پتاسیم بیوجار نسبت داد. Meng et al. (2021) بیان کردند که با کاربرد بیوجار در خاک، EC خاک افزایش یافت. آن‌ها دلیل افزایش EC خاک را آزاد شدن کاتیون‌های قلیایی با پیوند ضعیفی در ساختار بیوجار گزارش نمودند. نتایج مطالعه Albert et al. (2021) نیز نشان داد کاربرد بیوجار کاه و کلش گندم سبب افزایش معنی‌دار EC یک خاک آهکی شد. همچنین در پژوهش حاضر، با کاربرد مقدار بیشتر بیوجار (B₆) تأثیر بیش‌تری در افزایش EC خاک نسبت به کاربرد کمتر آن (B₃) دیده شد. این نتیجه می‌تواند به دلیل مقدار بیش‌تر کاتیون‌های محلول در این تیمار و آزادسازی آن‌ها در محلول خاک باشد. این نتایج با یافته‌های Karimi et al. (2020) مشابه بود. آن‌ها با بررسی تأثیر سطوح ۱ و ۲ درصد

وزنی بیوجار تهیه شده از بقایای ذرت در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس بر ویژگی‌های شیمیایی یک خاک آهکی گزارش کردند که EC خاک با کاربرد بیوجار در سطح بالاتر (۲ درصد وزنی) بیش از کاربرد بیوجار در سطح پایین‌تر (۱ درصد وزنی) افزایش یافت.



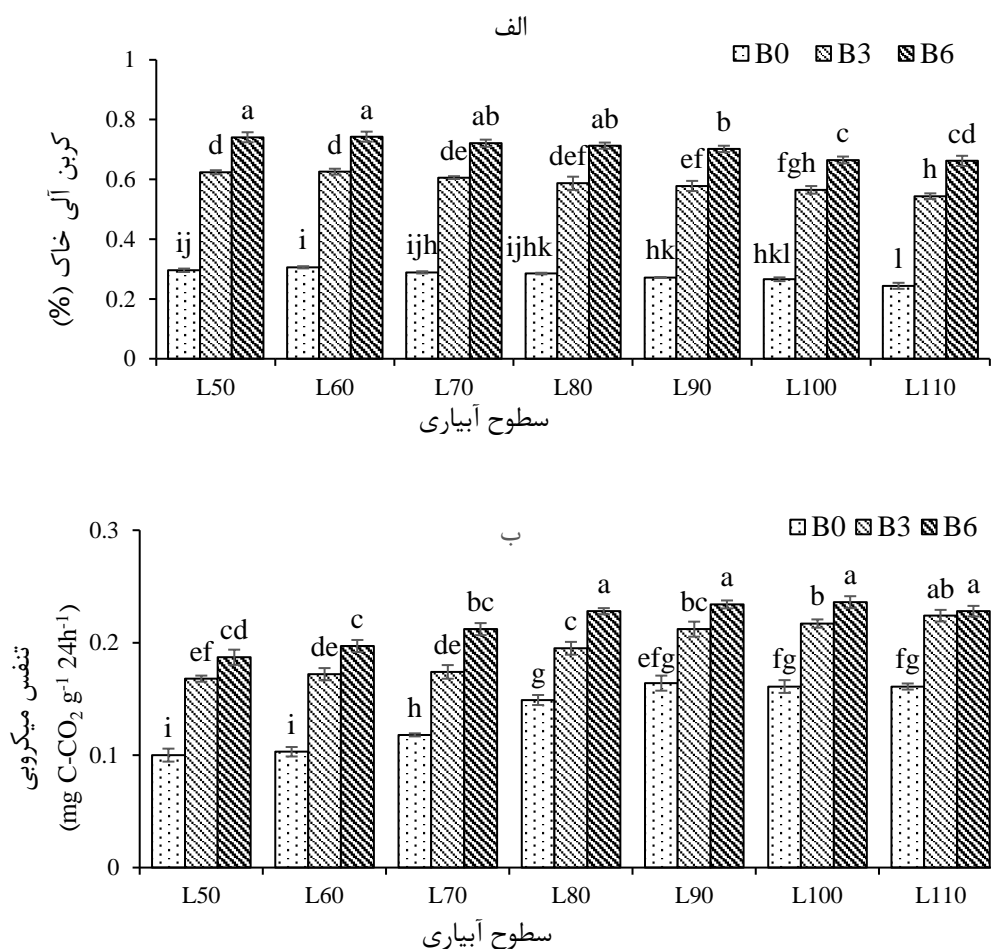
شکل ۳. مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای مختلف بیوجار بر pH (الف) و هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (ب) B₆ و B₃ و B₀ به ترتیب کاربرد صفر، سه و شش تن بیوجار در هکتار می‌باشند.

کربن آلی و تنفس میکروبی

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح آب آبیاری و کاربرد بیوجار نشان داد که در تیمارهای B₀، B₃ و B₆ با افزایش سطح آب آبیاری از ۵۰ تا ۱۱۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک، کربن آلی خاک به ترتیب ۱۰/۸، ۱۲/۹ و ۱۷/۲ درصد کاهش یافت (شکل ۴الف). در سطح آبیاری ۱۱۰ درصد مقادیر کربن آلی خاک برای تیمارهای B₃ و B₆ نسبت به تیمار B₀ به ترتیب ۲/۲ و ۲/۷ برابر و در سطح آبیاری ۵۰ درصد این مقادیر به ترتیب ۲/۱ و ۲/۵ برابر افزایش نشان داد. به‌طور کلی، افزایش کربن آلی خاک در اثر افزودن بیوجار به خاک را می‌توان به محتوای کربن بالای بیوجار (۳۳/۵۸ درصد؛ جدول ۲) نسبت داد. برخی مطالعات دیگر نیز افزایش کربن آلی خاک با افزودن بیوجار کاه و کلش گندم (Albert et al. 2021)، بقایای ذرت (Chen et al. 2021)، سبوس برنج (Ghorbani et al. 2019; Wang et al. 2021) به خاک را گزارش نمودند. همچنین در مطالعه حاضر، کاهش مقدار کربن آلی خاک در تیمار با سطح رطوبتی بالاتر مشاهده شد که این نتایج را می‌توان به افزایش نرخ تجزیه کربن آلی و در نتیجه هدررفت کربن آلی در خاک با افزایش رطوبت نسبت داد. به‌طوری که با افزایش فعالیت میکروبی در رطوبت و دمای مناسب رشد میکروارگانیسم‌ها، نرخ تجزیه کربن آلی در خاک با افزایش رطوبت نسبت داد. به‌طوری که با افزایش فعالیت میکروبی افزایش رطوبت از ۵۰ به ۸۵ درصد تخلیه رطوبتی خاک در زمین چمن، در تیمارهای حاوی بیوجار و کمپوست، میزان کربن کل و همچنین نسبت C:N کاهش یافت و در مقابل بیومس میکروبی افزایش یافت. بنابراین این نتایج را می‌تواند به دلیل تجزیه بخشی از کربن در خاک طی فعالیت میکروارگانیسم‌ها در خاک دانست.

مطابق نتایج شکل ۴ب، میزان تنفس میکروبی با افزایش سطح آبیاری افزایش یافت. بدین ترتیب در تیمارهای حاوی بیوجار با کاهش سطح آب آبیاری از ۱۰۰ تا ۵۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک، کاهش تنفس میکروبی در تیمار شاهد (۶۱ درصد) در مقایسه با تیمارهای B₃ (۲۲/۵ درصد) و B₆ (۲۰/۸ درصد) چشم‌گیرتر بود. نتایج همچنین نشان داد که تغییرات تنفس میکروبی خاک در سطوح آب آبیاری ۸۰ تا ۱۱۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک، در هیچ یک از تیمارهای بیوجار معنی‌دار نبود. شرایط خشکی و کاهش سطح رطوبتی خاک سبب نامساعد شدن شرایط رشد ریزجانداران خاک و از بین رفتن سلول‌های میکروبی (Zhang et al., 2020b) و در نتیجه کاهش شدت تنفس میکروبی می‌گردد. این نتایج مشابه یافته‌های Hale et al. (2021) است. آن‌ها از بیوجار تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس به میزان ۱۱/۲ و ۲۲/۴ تن در هکتار در خاک و در رطوبت‌های ۵۰ و ۸۵ درصد تخلیه رطوبتی خاک در زمین چمن استفاده نمودند و نشان دادند که با افزایش مقدار بیوجار و رطوبت در خاک، مقدار تنفس میکروبی و آنزیم‌ها در خاک بصورت معنی‌داری افزایش یافت. بعلاوه، بیوجار با اثر بر کاهش دسترسی برخی آلودگی‌ها و فلزات سنگین در خاک، می‌تواند به رشد و فعالیت میکروارگانیسم‌ها کمک کند. در پژوهش حاضر نیز احتمالاً با کاهش فراهمی کادمیوم در خاک در تیمارهای حاوی بیوجار، امکان فعالیت میکروارگانیسم‌ها و تنفس میکروبی افزایش یافته

است (شکل ۴ ب و جدول ۴). Moradi and Karimi (2021) نیز گزارش نمودند که کاربرد بیوجار بقایای ذرت سبب بهبود تنفس میکروبی خاک در یک خاک آهکی آلوده به کادمیوم شد. همچنین افزایش تنفس میکروبی خاک در اثر کاربرد بیوجار را می‌توان به وجود مواد فرار و ترکیبات جذب سطحی شده بر روی سطح بیوجار نسبت داد. بدین صورت که این ترکیبات می‌توانند به عنوان سوبسترای قابل دسترس برای جمعیت میکروبی خاک عمل نموده و سبب افزایش رشد و فعالیت میکروبی در خاک‌های تیمار شده با بیوجار شوند (Hale et al., 2021). همچنین بیوجار با داشتن ساختار متخلخل و سطح ویژه بالا می‌تواند به عنوان زیستگاه مناسبی برای میکروارگانیسم‌های خاک باشد و فعالیت میکروبی خاک را افزایش دهد (Fu et al., 2021). از دیگر دلایل افزایش تنفس میکروبی خاک در تیمارهای حاوی بیوجار را می‌توان به افزایش کربن آلی خاک (شکل ۴ الف)، افزایش عناصر غذایی قابل دسترس برای میکروارگانیسم‌های خاک و همچنین بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک در اثر افزودن بیوجار بیان نمود.



شکل ۴. تأثیر متقابل تیمارهای بیوجار و سطوح آبیاری بر کربن آلی (الف) و تنفس میکروبی خاک (ب)

ستون‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند از لحاظ آماری در سطح پنج درصد معنی دار نیستند.

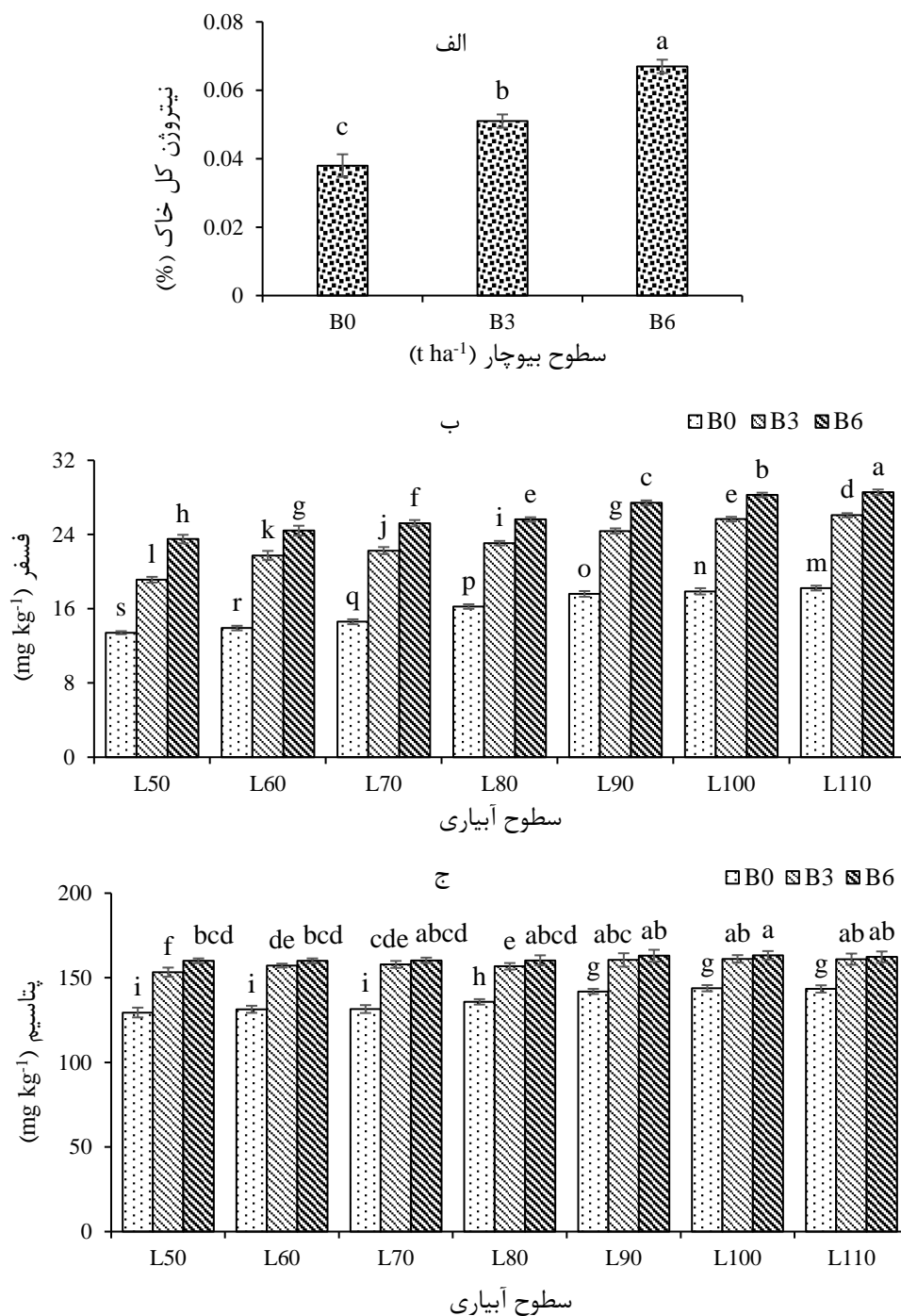
B₆ و B₃، B₀ به ترتیب کاربرد صفر، سه و شش تن بیوجار در هکتار و L₅₀، L₆₀، L₇₀، L₈₀، L₉₀، L₁₀₀ و L₁₁₀ به ترتیب ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۱۰ درصد آبیاری کامل (L₁₀₀) بر اساس تخلیه رطوبتی خاک می‌باشند.

نیترژن، فسفر و پتاسیم

در اثر کاربرد بیوجار در خاک، غلظت نیترژن کل خاک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و این مقدار در تیمارهای B₃ و B₆ به‌طور متوسط به ترتیب ۰/۶۷ و ۰/۵۱ درصد بود که این مقادیر نسبت به تیمار B₀ با ۰/۳۷ درصد نیترژن به ترتیب ۳/۳۴ و ۳/۷۶ درصد افزایش داشتند (شکل ۵ الف). افزایش غلظت نیترژن خاک در اثر افزودن بیوجار به خاک می‌تواند به دلیل وجود نیترژن در بیوجار (۱/۱۹ درصد؛ جدول ۲) و در نتیجه اضافه شدن نیترژن آن به خاک باشد. به‌طور کلی، بیوجار پتانسیل زیادی برای افزایش نیترژن خاک و کاهش تلفات نیترژن

در انواع مختلف خاک را دارا است (Liu et al., 2019). همچنین Zhang et al. (2021) و Hossain et al. (2020) در پژوهشی نشان دادند که کاربرد بیوپچار در خاک سبب افزایش مقدار نیتروژن خاک و کاهش آبشویی و تلفات گازی نیتروژن از خاک گردید. مطابق شکل ۵، در سطوح مختلف کاربرد بیوپچار، با افزایش سطح آب آبیاری از L_{50} تا L_{110} ، غلظت فسفر قابل استفاده خاک به طور معنی داری افزایش یافت. غلظت فسفر قابل استفاده خاک در سطح آب آبیاری ۱۰۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک، در B_0 ، B_3 و B_6 به ترتیب $33/2$ ، $34/1$ و $20/2$ درصد بیش تر از این مقدار در سطح آب آبیاری ۵۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک بود. همچنین نتایج نشان داد که در تمامی سطوح آب آبیاری، غلظت فسفر قابل استفاده خاک در تیمارهای حاوی بیوپچار به طور معنی داری بیش تر از تیمار بدون کاربرد بیوپچار بود (شکل ۵). در تمامی سطوح آب آبیاری تأثیر تیمار B_6 در افزایش غلظت فسفر قابل استفاده خاک ($56/6$ تا $75/2$ درصد)، بیش تر از تیمار B_3 ($42/5$ تا $43/1$ درصد) بود. در خاکها با درصد کربنات کلسیم بالا، بخش زیادی از فسفر کل خاک در سطح کانیهای رسی و کربنات کلسیم جذب شده و به شکل های نامحلول فسفات های کلسیم تبدیل می شود. بنابراین غلظت فسفر قابل دسترس برای گیاهان در خاک های آهکی، از جمله خاک مورد استفاده در مطالعه حاضر، بسیار کم می باشد. در این خاکها، کربنات کلسیم خاک، شیمی فسفر در خاک را کنترل می کند و غلظت فسفر قابل دسترس خاک برای گیاهان به شدت تحت تأثیر مقدار کربنات کلسیم خاک می باشد (Safian et al., 2020). افزایش غلظت فسفر قابل استفاده خاک در اثر افزایش سطح آب آبیاری در این مطالعه می تواند به دلیل کاهش احتمالی کربنات کلسیم خاک و در نتیجه انحلال ترکیبات فسفات های کلسیم بویژه تحت تأثیر فعالیت ریشه گیاه در ریزوسفر باشد. بعلاوه، بیوپچار احتمالاً با تحریک فعالیت میکروبی خاک، فسفر قابل استفاده در خاک را افزایش داده است. بیوپچار همچنین می تواند به عنوان منبع فسفر عمل کند و فسفر موجود در ترکیب خود را که در اثر تجزیه آزاد شده است، در اختیار گیاه قرار دهد (Karimi et al., 2020; Safian et al., 2020). بعلاوه، بیوپچار با کاهش فرآیند شستشو در خاک، دسترسی به فسفر را افزایش می دهد (Hossain et al., 2020). نتایج این پژوهش با نتایج Karimi et al. (2020) هم راستا بود. آن ها گزارش نمودند که در اثر افزودن بیوپچار تهیه شده از بقایای ذرت به یک خاک آهکی غلظت فسفر قابل استفاده خاک به طور معنی داری افزایش یافت.

مطابق نتایج شکل ۵، با افزایش سطح آبیاری و کاربرد بیوپچار، غلظت پتاسیم قابل استفاده خاک به صورت معنی داری افزایش یافت و بیشترین غلظت پتاسیم خاک در تیمارهای B_0 ، B_3 و B_6 در سطح آبیاری L_{100} مشاهده شد که نسبت به سطح آبیاری ۵۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک، به ترتیب ۱۱، ۵ و ۲ درصد افزایش یافتند. با این وجود، در غلظت پتاسیم خاک، با کاربرد تیمارهای مختلف بیوپچار بین سطوح آبیاری L_{90} ، L_{100} و L_{110} ، اختلاف معنی داری مشاهده نگردید. بیش تر بودن فراهمی پتاسیم در تیمارهای سطح بالای آب آبیاری در مقایسه با سطوح پایین تر آن، می تواند به این دلیل باشد که با کاهش سطح رطوبت و خشک شدن خاک، کلوتیدهای رس با قدرت بیش تری پتاسیم را به سطح خود جذب کرده و سبب تثبیت آن می شوند و بدین ترتیب غلظت پتاسیم تبادل خاک در تیمارهای با سطح رطوبتی بالاتر در مقایسه با تیمارهای سطح رطوبتی کم تر، بیشتر خواهد بود. همچنین، تیمارهای B_3 و B_6 نسبت به تیمار شاهد توانسته اند غلظت پتاسیم را در شرایط تنش رطوبتی افزایش دهند. به طوری که غلظت پتاسیم قابل استفاده خاک در سطح آبیاری ۵۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک در تیمارهای B_3 و B_6 نسبت به تیمار B_0 به ترتیب $18/5$ و $23/6$ درصد افزایش یافته است، در حالی که این مقادیر در سطح رطوبتی ۱۰۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک به ترتیب ۱۲ و $13/5$ درصد می باشد (شکل ۵). یکی از دلایل افزایش پتاسیم قابل استفاده خاک در اثر کاربرد بیوپچار، به دلیل آزاد شدن پتاسیم موجود در محتوای خاکستر بیوپچار می باشد. مطابق جدول ۲، بیوپچار مورد استفاده دارای ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم پتاسیم به شکل قابل استفاده می باشد که پس از کاربرد بیوپچار در خاک احتمال آزادسازی آن از ترکیب بیوپچار وجود دارد. بعلاوه، فعالیت میکروبی بیش تر در تیمارهای کاربرد بیوپچار و آزاد شدن اسیدهای آلی توسط ریزجانداران خاک و به دنبال آن افزایش آزادسازی پتاسیم غیرتبادل و ساختمانی در خاک می تواند از دیگر دلایل افزایش پتاسیم قابل استفاده خاک در اثر کاربرد بیوپچار باشد. Hossain et al. (2020) گزارش نمودند که بیوپچار با تخلخل و بار سطحی بالایی که دارد سبب بهبود ظرفیت نگهداری مواد مغذی خاک از جمله نیتروژن، فسفر و پتاسیم می گردد. نتایج مطالعه Karimi et al. (2020) نیز نشان داد کاربرد بیوپچار بقایای ذرت در یک خاک آهکی سبب افزایش معنی دار پتاسیم قابل دسترس خاک شد.



شکل ۵. تأثیر متقابل تیمارهای بیوجار و سطوح آبیاری بر عناصر نیتروژن (الف)، فسفر (ب) و پتاسیم (ج) خاک ستون‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند از لحاظ آماری در سطح پنج درصد معنی دار نیستند.

B₀، B₃ و B₆ به ترتیب کاربرد صفر، سه و شش تن بیوجار در هکتار و L₅₀، L₆₀، L₇₀، L₈₀، L₉₀ و L₁₀₀ و L₁₁₀ به ترتیب ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۱۰ درصد آبیاری کامل (L₁₀₀) بر اساس تخلیه رطوبتی خاک می‌باشند.

آهن، منگنز، روی و مس قابل دسترس

نتایج شکل ۶ نشان داد که با افزایش سطح بیوجار مصرفی، غلظت آهن قابل استفاده در خاک افزایش یافت. مقدار آهن قابل استفاده خاک در تیمارهای B₃ و B₆ به‌طور متوسط ۱/۵۷ و ۰/۸۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به تیمار B₀ با ۰/۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ترتیب ۱/۳ و ۲/۳ برابر افزایش داشت. همچنین با افزایش سطوح بیوجار مصرفی و همچنین افزایش سطح آب آبیاری از ۵۰ تا ۱۱۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک، در غلظت قابل استفاده منگنز، روی و مس در خاک افزایش دیده شد، به‌طوری که حداکثر مقدار قابل دسترس این فلزات در تیمار

B₆L₁₁₀ به دست آمد. مقادیر منگنز، روی و مس در تیمار B₆ در شرایط ۱۱۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک در مقایسه با تیمار B₆ در شرایط ۵۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک، به ترتیب ۲۱/۵، ۳۱/۸ و ۴۹/۰ درصد افزایش یافتند (جدول ۴). با این وجود در سطوح مختلف کاربرد بیوپچار، بین سطوح آبیاری L₉₀، L₁₀₀ و L₁₁₀، در مقادیر عنصر روی اختلاف معنی دار مشاهده نشد.

افزایش عناصر آهن، منگنز، روی و مس قابل دسترس خاک با افزایش سطح کاربرد بیوپچار را می توان به وجود این عناصر در بیوپچار مورد استفاده نسبت داد (جدول ۲)، که با افزایش نرخ بیوپچار مصرفی، غلظت آن ها در خاک افزایش یافته است. با وجود اینکه با کاربرد بیوپچار در آزمایش حاضر، مقدار pH خاک افزایش یافته است و انتظار می رود با افزایش pH، غلظت آهن، منگنز، روی و مس قابل دسترس در خاک کاهش یابد، اما نتایج پژوهش حاضر نشان داد که غلظت قابل دسترس این فلزات در خاک افزایش یافته است که این را می توان به فعالیت میکروبی بالاتر در این تیمارها نسبت داد. با افزایش تنفس میکروبی با کاربرد نرخ بالاتر بیوپچار در خاک (شکل ۴) که نشان دهنده افزایش فعالیت میکروبی در این تیمارها می باشد، احتمال حضور شکل های قابل دسترس این فلزات در خاک افزایش می یابد. نتایج پژوهش Karimi et al. (2020) نیز نشان داد کاربرد بیوپچار بقایای ذرت سبب افزایش معنی دار غلظت قابل استفاده آهن، منگنز، روی و مس در یک خاک آهکی شد. Mandal et al. (2021) بیان کردند که بیوپچار می تواند به عنوان منبع مواد غذایی عمل کند، زیرا بیوپچار از کربن آلی، فلزات مهم و ترکیبات آروماتیکی غنی شده است. نتایج مطالعات مختلف نشان داده افزایش کربن آلی محلول در خاک، می تواند سبب افزایش فراهمی عناصر غذایی کم مصرف مانند آهن، منگنز، روی و مس در خاک های آهکی شود (Mandal et al., 2021; Karimi 2020). بنابراین احتمالاً تغییر ویژگی های خاک مانند افزایش کربن آلی محلول خاک تحت تأثیر کاربرد بیوپچار (جدول ۲)، در افزایش فراهمی منگنز، روی و مس در خاک مؤثر بوده است.

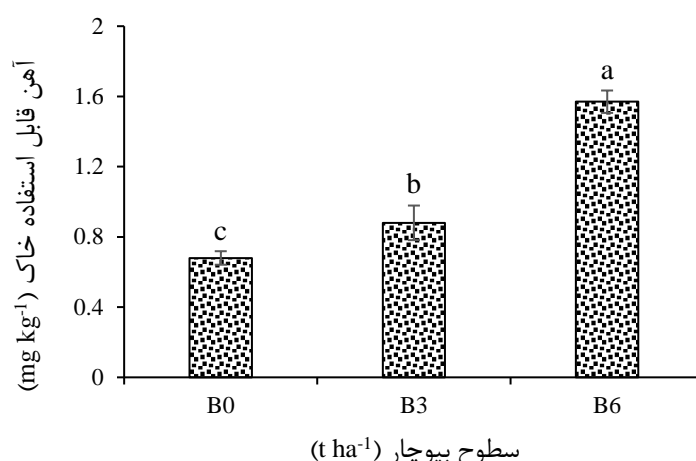
جدول ۴. تأثیر متقابل تیمارهای بیوپچار و سطوح آبیاری بر شکل های قابل دسترس فلزات منگنز، روی، مس و کادمیوم خاک

تیمارها	منگنز (mg kg ⁻¹)			روی (mg kg ⁻¹)		
	B ₀	B ₃	B ₆	B ₀	B ₃	B ₆
L ₅₀	۱/۴۰ ⁿ	۲/۷۸ ^h	۳/۸۱ ^e	۱/۰۱ ^k	۱/۶۸ ^g	۲/۲۳ ^{cd}
L ₆₀	۱/۶۳ ^m	۲/۹۵ ^g	۴/۰۳ ^d	۱/۳۲ ^{jk}	۱/۸۴ ^f	۲/۳۷ ^{bcd}
L ₇₀	۱/۸۱ ^l	۲/۹۷ ^g	۴/۲۷ ^c	۱/۳۴ ^{ij}	۱/۹۰ ^{ef}	۲/۴۸ ^{bc}
L ₈₀	۲/۰۶ ^k	۳/۵۸ ^f	۴/۳۳ ^c	۱/۴۶ ^{hij}	۲/۱۲ ^{de}	۲/۵۶ ^b
L ₉₀	۲/۲۲ ^j	۳/۵۸ ^f	۴/۳۹ ^{bc}	۱/۵۸ ^{fgh}	۲/۲۶ ^{bcd}	۲/۷۸ ^a
L ₁₀₀	۲/۳۵ ⁱ	۳/۶۵ ^f	۴/۴۶ ^b	۱/۷۱ ^{fg}	۲/۳۸ ^{bc}	۲/۸۴ ^a
L ₁₁₀	۲/۳۷ ⁱ	۳/۶۵ ^f	۴/۶۳ ^a	۱/۷۶ ^{fg}	۲/۳۴ ^{bcd}	۲/۹۲ ^a

تیمارها	مس (mg kg ⁻¹)			کادمیوم (mg kg ⁻¹)		
	B ₀	B ₃	B ₆	B ₀	B ₃	B ₆
L ₅₀	۰/۶۴ ^l	۰/۸۳ ⁱ	۱/۱۰ ^{ef}	۲/۱۸ ^a	۱/۶۳ ^c	۱/۴۰ ^f
L ₆₀	۰/۶۴ ^l	۰/۸۸ ^{hi}	۱/۱۴ ^e	۲/۰۷ ^a	۱/۵۳ ^{cd}	۱/۲۵ ^g
L ₇₀	۰/۷۲ ^k	۰/۹۳ ^{gh}	۱/۱۶ ^e	۱/۸۳ ^b	۱/۵۳ ^{cde}	۱/۱۷ ^{ghi}
L ₈₀	۰/۷۸ ^j	۰/۹۵ ^g	۱/۲۴ ^d	۱/۶۳ ^c	۱/۴۱ ^{def}	۱/۱۴ ^{hij}
L ₉₀	۰/۸۳ ^{ij}	۰/۹۸ ^g	۱/۴۸ ^c	۱/۴۲ ^{ef}	۱/۲۶ ^g	۱/۰۶ ^{zkl}
L ₁₀₀	۰/۸۵ ⁱ	۰/۹۹ ^g	۱/۵۶ ^b	۱/۴۱ ^f	۱/۱۴ ^{gh}	۱/۰۱ ^{kl}
L ₁₁₀	۰/۸۵ ⁱ	۱/۰۵ ^f	۱/۶۴ ^a	۱/۴۰ ^f	۱/۱۱ ^{ijk}	۰/۹۳ ^l

* در هر ستون اعدادی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند از لحاظ آماری در سطح پنج درصد معنی دار نیستند.

B₀، B₃ و B₆ به ترتیب کاربرد صفر، سه و شش تن بیوپچار در هکتار و L₅₀، L₆₀، L₇₀، L₈₀، L₉₀، L₁₀₀ و L₁₁₀ به ترتیب ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۱۰ درصد آبیاری کامل (L₁₀₀) بر اساس تخلیه رطوبتی خاک می باشند.



شکل ۶. تأثیر متقابل تیمارهای بیوجار بر آهن قابل استفاده خاک B₆ و B₃، B₀ به ترتیب کاربرد صفر، سه و شش تن بیوجار در هکتار می‌باشند.

کادمیوم قابل دسترس

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان دهنده کاهش معنی‌دار فراهمی کادمیوم در خاک در اثر افزایش کاربرد بیوجار و افزایش سطح آب آبیاری بود (جدول ۴). به طوری که کمترین غلظت کادمیوم خاک در تیمار B₆L₁₁₀ دیده شد. با این وجود مقادیر کادمیوم قابل دسترس خاک در تیمارهای L₁₁₀B₆ و L₁₀₀B₆، L₉₀B₆ فاقد اختلاف معنی‌دار بودند. مطابق نتایج مقدار کادمیوم در تیمار B₆ در سطوح آبیاری L₉₀، L₁₀₀ و L₁₁₀ در مقایسه با تیمار B₆ در شرایط ۵۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک، به ترتیب، ۲۴/۳، ۲۷/۹ و ۳۴/۲ درصد کاهش یافت. تبادل یونی می‌تواند یکی از دلایل تثبیت فلزات سنگین در خاک در اثر کاربرد بیوجار باشد (Xu et al., 2020). با توجه به نتایج حاصل از این مطالعه، کاهش غلظت کادمیوم در تیمارهای کاربرد بیوجار و سطوح رطوبتی بالا را می‌توان به تبادل یونی نسبت داد. با توجه به این که در این پژوهش کاربرد بیوجار و افزایش سطح رطوبت خاک، سبب افزایش غلظت قابل استفاده پتاسیم، کلسیم، آهن، منگنز، روی و مس در خاک شده است، بنابراین احتمالاً افزایش آزادسازی این عناصر در خاک، تثبیت کادمیوم و کاهش غلظت قابل استفاده آن در خاک را به دنبال داشته است. این بخش از نتایج با نتایج پژوهش Wang et al. (2021) مطابقت داشت. آن‌ها نیز با کاربرد بیوجار سبوس برنج در خاک کاهش کادمیوم قابل دسترس خاک را گزارش نمودند. به طور مشابه، نتایج پژوهش Moradi and Karimi (2021) و Chen et al. (2021) نیز نشان داد کاربرد بیوجار بقایای ذرت و سبوس برنج و سبب کاهش فراهمی کادمیوم در خاک شد.

کادمیوم در میوه گوجه فرنگی و عملکرد بوته

نتایج جدول ۵ نشان داد که تعداد، وزن و عملکرد میوه گوجه فرنگی با افزایش کاربرد بیوجار و افزایش سطح آبیاری بصورت معنی‌داری افزایش یافت، به طوری که بیشترین مقدار آن‌ها در تیمارهای L₁₁₀B₆ و L₁₀₀B₆، L₉₀B₆ دیده شد و در مقادیر این ویژگی‌ها در این تیمارها اختلاف معنی‌دار مشاهده نگردید. در سطح آبیاری ۹۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک، در تیمارهای B₃ و B₆ نسبت به تیمار B₀، تعداد میوه به ترتیب ۲/۰۶ و ۲/۳۸ برابر افزایش یافت، این مقادیر برای وزن میوه ۱/۱۶ و ۱/۱۵ برابر و برای عملکرد میوه گوجه فرنگی ۲/۴۰ و ۲/۹۸ برابر بود. بدین ترتیب، غلظت کادمیوم در میوه گوجه فرنگی با افزایش سطح آبیاری و بیوجار مصرفی بصورت معنی‌داری کاهش یافت. کمترین غلظت کادمیوم در میوه گوجه فرنگی در تیمار B₆ در سطوح آبیاری L₉₀، L₁₀₀ و L₁₁₀ (با مقدار ۰/۰۲ میلی گرم کادمیوم در کیلوگرم میوه گوجه فرنگی) دیده شد، در حالی که در سطوح آبیاری مشابه در تیمار B₃ و B₀ مقدار غلظت کادمیوم به طور متوسط به ترتیب ۰/۱۲ و ۰/۶۰ میلی گرم در کیلوگرم اندازه‌گیری گردید (جدول ۵). این نتایج را می‌توان به ویژگی توانایی تبادل عناصر و جذب و تثبیت کادمیوم در خاک بویژه در حضور بیوجار نسبت داد که در اینصورت غلظت کمتری از کادمیوم در خاک قابل دسترس گیاه می‌باشد و این سبب بهبود شرایط رشد و عملکرد گیاه می‌گردد.

بطور کلی، سطح استاندارد کمیته مشترک سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد و سازمان بهداشت جهانی (FAO/WHO) برای فلز کادمیوم در میوه‌ها و سبزی‌ها ۰/۰۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک گزارش شده است (Sanjari et al, 2021). مطابق این استاندارد، میوه گوجه

فرنگی در تیمارهای B₀ و B₃ در تمام سطوح آبیاری دارای غلظت کادمیوم بیش از حد مجاز استاندارد می‌باشند، در حالی که میوه‌های گوجه فرنگی کشت شده در تیمار B₆ در سطوح مختلف آبیاری، غیر سمی هستند. با این وجود در تیمار L₅₀B₆ غلظت کادمیوم در مرز حد مجاز می‌باشد و استفاده از این میوه‌ها نیز توصیه نمی‌شود. Zeeshan *et al.* (2020) گزارش نمودند که با کاربرد بیوجار تهیه شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس از چوب گیاه آفاقیا به میزان ۲۰ تن در هکتار در خاک آلوده به کادمیوم، سرب و نیکل، وزن و عملکرد میوه گوجه فرنگی نسبت به شاهد به‌طور معنی‌داری به ترتیب ۳۵ و ۶۹ درصد افزایش یافت. در مطالعه Almaroai and Eissa (2020)، کاربرد ۵ و ۱۰ تن در هکتار از بیوجار بقایای ذرت در خاک آلوده به فلزات کادمیوم، سرب، روی و مس، با کاهش اثر سمیت فلزات در گوجه فرنگی، باعث افزایش ۲۰ و ۳۰ درصدی عملکرد گوجه فرنگی شد. بیوجار به دلیل برخی ویژگی‌ها از جمله افزایش pH و افزایش تخلخل خاک می‌تواند سبب کاهش تحرک کادمیوم در خاک گردد و از این‌رو غلظت کادمیوم کمتری در دسترس ریشه گیاه برای جذب قرار گیرد. این نتایج مشابه نتایج برخی از پژوهشگران می‌باشد. Wang *et al.* (2021) از بیوجار سبوس برنج تهیه شده در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس جهت بررسی تأثیر آن بر تحرک کادمیوم و مس در خاک استفاده نمودند. مطالعات آن‌ها نشان داد که بیوجار به عنوان یک ماده متخلخل و با سطح ویژه بالا، می‌تواند بصورت مؤثری بر کاهش تحرک و تثبیت کادمیوم در خاک مؤثر باشد. Chen *et al.* (2021) نیز نشان دادند که استفاده از بیوجار کاه گندم و ذرت سبب کاهش قابل ملاحظه جذب کادمیوم توسط گیاه گندم کشت شده در خاک قلیایی شد. Alibert *et al.* (2021) گزارش نمودند که افزودن بیوجار به خاک باعث کاهش معنی‌دار غلظت‌های کادمیوم و سرب در اندام‌هوایی و ریشه در مقایسه با خاک‌های تیمار نشده با بیوجار شد و میزان کاهش تحت‌تأثیر تیپ‌های گیاهی و مقدار بیوجار و خواص خاک قرار گرفت. مطابق گزارش آن‌ها، pH بالای بیوجار (pH برابر ۱۰)، دمای بالای پیرولیز در زمان تهیه بیوجار (۴۰۱-۶۰۰ درجه سلسیوس)، و نرخ کاربرد بالاتر از ۲ درصد بیوجار در خاک، در کاهش غلظت کادمیوم و سرب اندام‌هوایی و ریشه مؤثر می‌باشد.

جدول ۵. تأثیر متقابل تیمارهای بیوجار و سطوح آبیاری بر تعداد، وزن، عملکرد و غلظت کادمیوم میوه گوجه فرنگی

وزن میوه (g)			تعداد میوه (in per plant)			تیمارها
B ₆	B ₃	B ₀	B ₆	B ₃	B ₀	
۲۷/۱۰ ^{gh}	۲۵/۶۱ ^{hi}	۱۵/۸۷ ^k	۱۵/۲۵ ⁱ	۱۳/۲۵ ^{jk}	۴/۰ ⁿ	L50
۲۹/۴۹ ^f	۲۷/۶۷ ^g	۲۱/۷۷ ^j	۱۶/۵۰ ^h	۱۳/۵۰ ^j	۴/۰ ⁿ	L60
۳۱/۸۳ ^e	۳۲/۹۰ ^e	۲۴/۲۲ ⁱ	۲۴/۲۵ ^e	۲۰/۷۵ ^g	۹/۵۰ ^m	L70
۴۲/۰۶ ^c	۴۱/۴۳ ^{cd}	۳۲/۳۱ ^e	۲۵/۲۵ ^{de}	۲۱/۷۵ ^f	۱۱/۷۵ ^l	L80
۴۶/۰۵ ^{ab}	۴۶/۵۹ ^b	۳۹/۸۹ ^d	۲۹/۲۵ ^{ab}	۲۵/۲۵ ^{de}	۱۲/۲۵ ^{kl}	L90
۴۸/۴۰ ^a	۴۸/۸۰ ^a	۴۰/۶۱ ^{cd}	۳۲/۰ ^a	۲۵/۷۵ ^{cd}	۱۳/۰ ^{jk}	L100
۴۹/۵۳ ^a	۵۰/۱۲ ^a	۴۱/۱۳ ^{cd}	۳۲/۵۰ ^a	۲۶/۵۰ ^c	۱۵/۰ ⁱ	L110
کادمیوم میوه (mg kg ⁻¹)			عملکرد میوه (in per plant)			تیمارها
B ₆	B ₃	B ₀	B ₆	B ₃	B ₀	
۰/۰۵ ⁱ	۰/۲۲ ^f	۱/۳۱ ^a	۴۱۳/۰۲ ^l	۳۳۹/۰۹ ^m	۶۳/۵۱ ^o	L50
۰/۰۴ ⁱ	۰/۲۱ ^f	۱/۲۳ ^b	۴۸۶/۲۶ ^k	۳۷۳/۵۳ ^{lm}	۸۷/۱۱ ^o	L60
۰/۰۴ ⁱ	۰/۲۱ ^f	۰/۷۴ ^c	۷۷۲/۲۱ ^h	۶۸۲/۳۷ ⁱ	۲۲۹/۹۰ ⁿ	L70
۰/۰۴ ⁱ	۰/۱۶ ^g	۰/۶۹ ^d	۱۱۰۲/۰ ^f	۸۹۹/۳۰ ^g	۳۷۹/۵۲ ^{lm}	L80
۰/۰۲ ^j	۰/۱۳ ^{gh}	۰/۵۹ ^e	۱۴۵۹/۰ ^{abc}	۱۱۷۶/۱۰ ^e	۴۸۸/۸۳ ^k	L90
۰/۰۲ ^j	۰/۱۱ ^h	۰/۶۱ ^e	۱۵۸۸/۷۰ ^{ab}	۱۲۵۶/۵۰ ^d	۵۲۸/۰ ^k	L100
۰/۰۲ ^j	۰/۱۱ ^h	۰/۵۷ ^e	۱۶۱۰/۳۰ ^a	۱۳۲۸/۵۰ ^c	۶۱۷/۰ ^{nc}	L110

* در هر ستون اعدادی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند از لحاظ آماری در سطح پنج درصد معنی‌دار نیستند.

B₀، B₃ و B₆ به ترتیب کاربرد صفر، سه و شش تن بیوجار در هکتار و L₅₀، L₆₀، L₇₀، L₈₀، L₉₀ و L₁₁₀ به ترتیب ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و

۱۱۰ درصد آبیاری کامل (L₁₀₀) بر اساس تخلیه رطوبتی خاک می‌باشند.

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که خصوصیات فیزیکی خاک از جمله F ، ρ_b ، MWD، WSA و SI تحت تأثیر کاربرد بیوجار به‌طور مؤثری بهبود یافتند و از طرفی ویژگی‌های WSA، MWD و SI در سطوح آبیاری L₉₀، L₁₀₀ و L₁₁₀ در کشت گوجه فرنگی، افزایش بیشتری داشتند. همچنین بیوجار با افزایش کربن آلی خاک علاوه بر افزایش کربن‌اندوزی در خاک یک سوبسترای مؤثر در افزایش فعالیت میکروبی و تنفس

میکروبی بود. بیوجار سبوس برنج به‌عنوان یک منبع مفید از عناصر پر نیاز (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) و کم نیاز (آهن، منگنز، روی و مس) در خاک عمل کرده و سبب بهبود کیفیت رشد و عملکرد گیاه گوجه فرنگی گردید. بیوجار با حذف بخشی از کادمیوم قابل دسترس از خاک و تثبیت کادمیوم در ساختار خود، سبب رشد بهتر گیاه و افزایش تعداد و وزن میوه گوجه فرنگی گردید. در شرایط کاربرد ۶ تن بیوجار سبوس برنج در در سطوح آبیاری L₉₀، L₁₀₀ و L₁₁₀، غلظت کادمیوم میوه گوجه فرنگی به حداقل میزان خود رسید و غیر سمی بود (۰/۰۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک میوه)، در حالی که غلظت کادمیوم در میوه گوجه فرنگی کشت شده در خاک حاوی ۳ تن بیوجار (B₃) و خاک شاهد (B₀) در شرایط رطوبتی مشابه، بیش از میانگین کمیته مشترک سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد و سازمان بهداشت جهانی (FAO/WHO) (۰/۰۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک میوه) بود و مصرف آن‌ها توصیه نمی‌شود. کاربرد سطوح مختلف آبیاری نشان داد که بهترین کیفیت و عملکرد گوجه فرنگی در ۹۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک بود و کاربرد میزان بیشتری از آب آبیاری (L₁₀₀) و L₁₁₀) در افزایش عملکرد و کاهش سمیت گوجه فرنگی اثر معنی‌داری نداشت. بطور کلی کاربرد بیوجار سبوس برنج به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آن در بهبود کیفیت شرایط فیزیکی-شیمیایی و تنفس میکروبی خاک مؤثر بوده و از این طریق سبب کاهش تنش سمیت کادمیوم در گیاه گوجه فرنگی شد. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای مطالعات آینده باشد. در مطالعات آینده توصیه می‌گردد کاربرد بیوجار در کشت گوجه فرنگی با روش‌های آبیاری مختلف در سطح مزرعه در خاک‌های آلوده مورد بررسی قرار گیرد و میزان بهبود کیفیت رشد گیاه، ساختمان خاک، همراه با تعیین بهترین روش آبیاری با مصرف حداقل آب بصورت کاربردی در مزرعه مورد مطالعه قرار گیرد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Abdel-Shafey, H., Hegemann, W., & Teiner, A. (1994). Digestion with concentrated HNO₃ and H₂O₂. *Environment Management and Health*, 5, 21-24.
- Albert, H. A., Li, X., Jeyakumar, P., Wei, L., Huang, L., Huang, Q., Kamran, M., Shaheen, S. M., Hou, D., & Rinklebe, J. (2021). Influence of biochar and soil properties on soil and plant tissue concentrations of Cd and Pb: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 755, 142582.
- Almaroai, Y. A., & Eissa, M. A. (2020). Effect of biochar on yield and quality of tomato grown on a metal-contaminated soil. *Scientia Horticulturae*, 265, 109210.
- Anderson, J. P. E. (1982). Soil respiration. In: A.L. and R. H. Mille (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2, Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Bai, N., Zhang, H., Li, S., Zheng, X., Zhang, J., Zhang, H., Zhou, S., Sun, H., & Lv, W. (2019). Long-term effects of straw and straw-derived biochar on soil aggregation and fungal community in a rice-wheat rotation system. *PeerJ*, 6, e6171.
- Bagheri, M., Javanmanrd, H. R., & Naderi, M. R. (2021). The growth of (*Matricaria chamomilla* L.) affected by cadmium and lead in greenhouse and field conditions. *Bi-Quarterly Journal of Plant Production*, 11 (1): 19-34.
- Blake, G. R., & Hartge, K. (1986). Bulk density. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods* (Vol. 5, pp. 363-375).
- Biria, M., Moezzi, A., AmeriKhah, H. (2017). 'Effect of Sugercan bagasse,s biochar on maize plant growth, grown in lead and cadmium contaminated soil,s', *Water and Soil*, 31(2), pp. 609-626. doi: 10.22067/jsw.v31i2.55832.
- Brennan R.F., Armour J.D., and Reuter D.J. (1993). Diagnosis of zinc deficiency. In A.D. Robson (ed.) *Zinc in Soils and Plants*, P206. Springer, Netherlands. p. 167-181.
- Cantrell, K. B., Hunt, P. G., Uchimiya, M., Novak, J. M., & Ro, K. S. (2012). Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource technology*, 107, 419-428.
- Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (2007). *Soil sampling and methods of analysis*. Boca Raton, Florida: CRC press.
- Chen, L., Long, C., Wang, D., & Yang, J. (2020). Phytoremediation of cadmium (Cd) and uranium (U) contaminated soils by *Brassica juncea* L. enhanced with exogenous application of plant growth regulators. *Chemosphere*, 242, 125112.
- Chen, Z., Lu, Z., Zhang, Y., Li, B., Chen, C., & Shen, K. (2021). Effects of biochars combined with ferrous sulfate and pig manure on the bioavailability of Cd and potential phytotoxicity for wheat in an alkaline contaminated soil. *Science of the Total Environment*, 753, 141832.
- Dad, K., Nawaz, M., Hassan, R., Javed, K., Shaheen, A., Zhao, F., Imran, M., Shah, S., Anwar, M., &



- Aurangzaib, M. (2021). Impact of biochar on the growth and physiology of tomato grown in the cadmium contaminated soil. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 34(2), 454-462.
- Dhaliwal, S. S., Singh, J., Taneja, P. K., & Mandal, A. (2020). Remediation techniques for removal of heavy metals from the soil contaminated through different sources: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(2), 1319-1333.
- Domingues, R. R., Trugilho, P. F., Silva, C. A., Melo, I. C. N. d., Melo, L. C., Magriotis, Z. M., & Sanchez-Monedero, M. A. (2017). Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. *PLoS one*, 12(5), e0176884.
- El Namas, A. (2020). Ameliorating effect of biochar on some physical properties of sandy soil and water use efficiency of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant grown under drip irrigation. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 11(7), 231-240.
- Fu, B., Chen, L., Huang, H., Qu, P., & Wei, Z. (2021). Impacts of crop residues on soil health: A review. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 33(1), 164-173.
- Gee, G.W., and Bauder, J.W. (1986). Particle size analysis. P 383-411, In: A. Klute (ed.), *Methods of soil analysis*, 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA. Madison, WI.
- Gharahi, N. (2022). Effect of Biochar and Zeolite on Cadmium Uptake in Green bell Pepper (*Capsicum Annuum*) and Leaching in Saline-alkaline Soil. *Journal of water and soil resources conservation*, 11(2), 69-78.
- Ghorbani, M., Asadi, H., & Abrishamkesh, S. (2019). Effects of rice husk biochar on selected soil properties and nitrate leaching in loamy sand and clay soil. *International soil and water conservation research*, 7(3), 258-265.
- Hale, L., Curtis, D., Azeem, M., Montgomery, J., Crowley, D. E., & McGiffen Jr, M. E. (2021). Influence of compost and biochar on soil biological properties under turfgrass supplied deficit irrigation. *Applied Soil Ecology*, 168, 104134.
- Hillel, D. (1980). *Fundamentals of soil physics*. New York: Academic press.
- Hossain, M., Bahar, M., Sarkar, B., Donne, S., Ok, Y., Palansooriya, K., Kirkham, M., Chowdhury, S., & Bolan, N. (2020). Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. *Biochar*, 2, 379-420.
- Huang, H., Reddy, N. G., Huang, X., Chen, P., Wang, P., Zhang, Y., Huang, Y., Lin, P., & Garg, A. (2021). Effects of pyrolysis temperature, feedstock type and compaction on water retention of biochar amended soil. *Scientific Reports*, 11(1), 1-19.
- Ibrahim, A., Marie, H., & Elfaki, J. (2021). Impact of biochar and compost on aggregate stability in loamy sand soil. *Agricultural Research Journal*, 58, 34-44.
- Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M., & Enayatizamir, N. (2020). Application of biochar changed the status of nutrients and biological activity in a calcareous soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(2), 450-459.
- Khosropour, E., Weisany, W., Tahir, N. A. R., & Hakimi, L. (2021). Vermicompost and biochar can alleviate cadmium stress through minimizing its uptake and optimizing biochemical properties in *Berberis integerrima bunge*. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-11.
- Liang, J., Li, Y., Si, B., Wang, Y., Chen, X., Wang, X., Chen, H., Wang, H., Zhang, F., & Bai, Y. (2021). Optimizing biochar application to improve soil physical and hydraulic properties in saline-alkali soils. *Science of the Total Environment*, 771, 144802.
- Lindsay, W. L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil science society of America journal*, 42(3), 421-428.
- Liu, J., Huang, W., Li, Z., Hu, J., Zhu, Y., Xie, H., & Peng, C. (2020). Accumulation, subcellular distribution, and ecological risk assessment of Pb and Cd in *Bellamyia aeruginosa* from the Xiangjiang River, China. *Chemistry and Ecology*, 36(4), 327-341.
- Liu, Q., Liu, B., Zhang, Y., Hu, T., Lin, Z., Liu, G., Wang, X., Ma, J., Wang, H., & Jin, H. (2019). Biochar application as a tool to decrease soil nitrogen losses (NH₃ volatilization, N₂O emissions, and N leaching) from croplands: Options and mitigation strength in a global perspective. *Global change biology*, 25(6), 2077-2093.
- Majeed, A., Niaz, A., Rizwan, M., Imran, M., Alsahli, A. A., Alyemeni, M. N., & Ali, S. (2021). Effects of biochar, farm manure, and pressmud on mineral nutrients and cadmium availability to wheat (*Triticum aestivum* L.) in Cd-contaminated soil. *Physiologia Plantarum*, 173(1), 191-200.
- Mandal, S., Pu, S., Adhikari, S., Ma, H., Kim, D.-H., Bai, Y., & Hou, D. (2021). Progress and future prospects in biochar composites: Application and reflection in the soil environment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(3), 219-271.

- Mehrab, N., & Chorom, M. (2014). Leaching of nitrogen in the presence of zeolite enriched with ammonium in two soil textures under wheat cultivation. *Water and Soil Science*, 24(2), 159-170. (In Farsi)
- Mehrab, N., Chorom, M., Norouzi Masir, M., Fernandes de Souza, M., & Meers, E. (2021). Alteration in chemical form and subcellular distribution of cadmium in maize (*Zea mays* L.) after NTA-assisted remediation of a spiked calcareous soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(21), 1-14.
- Melomey, L. D., Danquah, A., Offei, S. K., Ofori, K., Danquah, E., & Osei, M. (2019). In S. T. Nyaku & A. Danquah (Ed.), Review on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) improvement programmes in Ghana: *Recent advances in tomato breeding and production* (Vol. 49, pp. 49-69).
- Meng, Q., Zhao, S., Geng, R., Zhao, Y., Wang, Y., Yu, F., Zhang, J., & Ma, X. (2021). Does biochar application enhance soil salinization risk in black soil of northeast China (a laboratory incubation experiment)? *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(11), 1566-1577.
- Moradi, N., & Karimi, A. (2021). Fe-modified common reed biochar reduced cadmium (Cd) mobility and enhanced microbial activity in a contaminated calcareous soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(1), 329-340.
- Nelson, D.W. and Sommers, L.E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods*, SSSA and ASA, Madison, WI. PP. 961-1010.
- Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe F.S. and Dean L.A. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Dept. of Agric. Circ. 939p.
- pourmansour, S., Razzaghi, F., Sepaskhah, A., Moosavi, A. (2019). 'Wheat growth and yield investigation under different levels of biochar and deficit irrigation under greenhouse conditions', *Water and Irrigation Management*, 9(1), pp. 15-28. doi: 10.22059/jwim.2019.278053.665
- Pieri, C. J. (1992). *Fertility of soils: A future for farming in the West African savannah* (1 st ed). Berlin: Springer Verlag.
- Ren, T., Li, J., Feng, H., Yun, F., Chen, N., Wang, H., Yin, Q., Liu, H., Yek, P. N. Y., & Lam, S. S. (2021). Micro-particle biochar for soil carbon pool management: Application and mechanism. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 157, 105229.
- Safian, M., Motaghian, H., & Hosseinpour, A. (2020). Effects of sugarcane residue biochar and P fertilizer on P availability and its fractions in a calcareous clay loam soil. *Biochar*, 2(3), 357-367.
- Salam, A., Bashir, S., Khan, I., Hussain, Q., Gao, R., & Hu, H. (2019). Biochar induced Pb and Cu immobilization, phytoavailability attenuation in Chinese cabbage, and improved biochemical properties in naturally co-contaminated soil. *Journal of Soils and Sediments*, 19(5), 2381-2392.
- Sanjari, S., Boroomand, N., and Moghbeli, M. (2021). The Concentration of Lead and Cadmium in Some Greenhouse Products and its Effect on Human Health. *Journal of Environmental Science and Technology*, 23(8), 95-106.
- Singh, B., Camps-Arbestain, M., & Lehmann, J. (2017). *Biochar: a guide to analytical methods*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Sumner M.E., and Miller W.P. (1996). Cation exchange capacity, and exchange coefficients. In D.L. Sparks (ed.), *Methods of soil analysis*. p1320. Part 2: Chemical properties, (3rd ed.) ASA, SSSA, CSSA, Madison, WI. p. 1201-1231.
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil Acidity. In: sparks, D. L. (Ed). *Methods of soil analysis*. Part 3- Chemical Methods. Soil Sci. Soc. Am. Inc. Book series, Madison, WI. No. 5. pp: 475-490.
- Tian, X., Li, Z., Wang, L., Wang, Y., Li, B., Duan, M., & Liu, B. (2020). Effects of biochar combined with nitrogen fertilizer reduction on rapeseed yield and soil aggregate stability in upland of purple soils. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(1), 279.
- Walkley, A., & 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, Y., Zheng, K., Zhan, W., Huang, L., Liu, Y., Li, T., Yang, Z., Liao, Q., Chen, R., & Zhang, C. (2021). Highly effective stabilization of Cd and Cu in two different soils and improvement of soil properties by multiple-modified biochar. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 207, 111294.
- Xu, C., Zhao, J., Yang, W., He, L., Wei, W., Tan, X., Wang, J., Lin, A. (2020). Evaluation of biochar pyrolyzed from kitchen waste, corn straw, and peanut hulls on immobilization of Pb and Cd in contaminated soil. *Environmental Pollution*, 261, 114133.
- Xu, X., Cao, X., & Zhao, L. (2013). Comparison of rice husk-and dairy manure-derived biochars for simultaneously removing heavy metals from aqueous solutions: role of mineral components in biochars. *Chemosphere*, 92(8), 955-961.
- Zeeshan, M., Ahmad, W., Hussain, F., Ahamd, W., Numan, M., Shah, M., & Ahmad, I. (2020).



- Phytostabilization of the heavy metals in the soil with biochar applications, the impact on chlorophyll, carotene, soil fertility and tomato crop yield. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120318.
- Zhang, C., Huang, X., Zhang, X., Wan, L., & Wang, Z. (2021). Effects of biochar application on soil nitrogen and phosphorous leaching loss and oil peony growth. *Agricultural Water Management*, 255, 107022.
- Zhang, C., Li, X., Yan, H., Ullah, I., Zuo, Z., Li, L., & Yu, J. (2020b). Effects of irrigation quantity and biochar on soil physical properties, growth characteristics, yield and quality of greenhouse tomato. *Agricultural Water Management*, 241, 106263.
- Zhang, Q., Song, Y., Wu, Z., Yan, X., Gunina, A., Kuzyakov, Y., & Xiong, Z. (2020a). Effects of six-year biochar amendment on soil aggregation, crop growth, and nitrogen and phosphorus use efficiencies in a rice-wheat rotation. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118435.
- Zwolak, A., Sarzyńska, M., Szpyrka, E., & Stawarczyk, K. (2019). Sources of soil pollution by heavy metals and their accumulation in vegetables: A review. *Water, air, & soil pollution*, 230(7), 1-9.