

Effect of co-application of zinc enriched biochar and foliar application of zinc on some physiological traits and the zinc uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.)

N. Sousaraei¹, M. Barani Motlagh^{2*} and S.A. Movahedi Naeini³

1. PhD Student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Soil and Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran
2. Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Soil and Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran
1. Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Soil and Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

Received: 8 April 2024 Accepted: 27 May 2024 *Corresponding Author: mbarani2002@yahoo.com

Abstract

Introduction: When the supply of micronutrients needed by the plant is insufficient, not only the yield of the product but also the quality of plant products are affected. Application of organic amendments is one of the ways to increase the nutrients such as zinc uptake by plants for. Biochar can be used as a raw material for the preparation and synthesis of mineral or metal composites due to its high specific surface area, porous structure and oxygen bonding groups on its surface. In these composites, biochar is used as a good porous structure to support and host metals. Biochar can have a significant impact on soil properties, the availability of nutrients, and the dynamics of the nutrients in arid and semi-arid soils. Very limited studies have examined biochar use as a nutrient carrier in the synthesis of organic-mineral compounds. Therefore, the present study was done to investigate the efficiency of zinc-enriched biochar pellets using two pre-pyrolysis and post-pyrolysis methods, and their effect on some physiological traits (chlorophyll a, b and total) and bioavailability of zinc in soil and plant.

Methods and Materials A soil with zinc deficiency was collected from 0-30 cm depth under arable lands of Seyed Abad located in Azadshahr township, Golestan province, Iran. To achieve the objectives of this study, a factorial experiment in a completely randomized design with three replications and 18 treatments (54 pots in total) was performed in the greenhouse of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Factors included three types of zinc fertilizers (zinc sulphate, zinc-rich biochar prepared using pre-pyrolysis and post-pyrolysis methods) in three levels (0, 10 and 20 mg kg⁻¹ soil) and foliar spraying (distilled water and 3:1000 zinc). Zinc foliar spraying was done during the 6-10 leaf stage in the early hours of the morning before sunrise. Irrigation and weeding operations were performed manually. At the end of the growing period (vegetative and reproductive), some physiological traits (chlorophyll a, b, total and carotenoid), concentration and zinc uptake in shoots in the two stages of flag leaf emergence and seed maturity, and available concentration of zinc in the soil after wheat plant harvest were measured. The statistical results of the data were analyzed using SAS software and LSD test (at 5% level) was used for comparing the mean values.



Results and Discussion: Based on the results, the interaction of type and levels of treatments was significant on all the studied traits at $P < 0.01$, except for carotenoid. The means comparison showed that both zinc-enriched biochar pellets and zinc sulfate increased physiological traits in wheat plants. The highest amount of chlorophyll a, b, and total was obtained with an average of 4.99, 3.36, and 8.35 mg g⁻¹ of fresh weight of the plant from the treatment of a pre-pyrolysis pellet with a concentration of 20 mg kg⁻¹ with zinc sulfate foliar spraying, respectively. The highest zinc uptake in both the flag leaf emergence and seed maturity stages was obtained with an average of 120.33 and 86.62 mg kg⁻¹ of dry weight of the plant from the pre and post-pyrolysis pellet treatment with a concentration of 20 mg/kg with zinc sulfate foliar spraying, which had an increase of 20 mg kg⁻¹ of zinc sulfate foliar spraying, respectively, equivalent to 27.69% and 30%. The pre-pyrolysis pellet treatment with 20 mg kg⁻¹ zinc and zinc sulfate foliar spraying gave the most zinc extracted with DTPA, at an average of 3.41 mg kg⁻¹. This was compared to the 10 mg kg⁻¹ and 0 mg kg⁻¹ pre-pyrolysis biochar pellet treatments, which gave an average of 2.39 mg kg⁻¹ and 0.92 mg kg⁻¹, respectively, equivalent to 29.91% and 73.02%. The amount of DTPA extractable Zn with the amount of chlorophyll a ($r = 0.87^{**}$), chlorophyll b ($r = 0.81^{**}$), total chlorophyll ($r = 0.87^{**}$), and carotenoids ($r = 0.89^{**}$) had a positive and significant correlation. The results showed that between DTPA extractable Zn with zinc concentration ($r = 0.91^{**}$) and zinc uptake ($r = 0.90^{**}$) in the stage of flag emergence and zinc concentration ($r = 0.87^{**}$) and zinc uptake ($r = 0.86^{**}$) in the stage of seed maturity in the wheat plant, there was a positive and significant correlation.

Conclusions: In general, the results showed that the positive role of biochar-zinc pellets in increasing the concentration and zinc uptake in wheat plants. Nevertheless, supplemental zinc foliar application with biochar pellets rich in zinc in the amount of 20 mg kg⁻¹ soil in the form of post-pyrolysis had the greatest effect on the physiological characteristics and Zn bioavailability for wheat plants.

Key words: *Pellet, Post- pyrolysis, Pre- pyrolysis, Chlorophyll*

تأثیر کاربرد توأم بیوجار غنی شده با روی و محلول پاشی روی بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک و جذب روی در گندم (*Triticum aestivum L.*)

نرجس سوسرائی^۱، مجتبی بارانی مطلق^{۲*} و سید علیرضا موحدی نائینی^۳

- ۱- دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان ایران
- ۲- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان ایران
- ۳- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰

پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۳/۰۷

کلمات کلیدی:

بیوجار،

پلت،

پس گرماکافت،

پیش گرماکافت،

کلروفیل

چکیده

بیوجار به دلیل دارا بودن سطح ویژه بالا، ساختار متخلخل و گروه‌های عامل پیوندی اکسیژنی در سطح آن می‌تواند به‌عنوان ماده اولیه برای تهیه و سنتز کامپوزیت معدنی یا فلزی مورد استفاده قرار گیرد. در این کامپوزیت‌ها، از بیوجار به‌عنوان یک ساختار متخلخل خوب برای حمایت و میزبانی فلزات استفاده می‌شود. بنابراین پژوهش حاضر با هدف بررسی کارایی پلت بیوجارهای غنی شده با روی به دو روش پیش و پس گرماکافت و تأثیر آن‌ها بر زیست فراهمی روی در خاک، برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک (کلروفیل a، b و کل) و جذب روی در گندم انجام گرفت. بدین منظور آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار و با ۱۸ تیمار به اجرا درآمد. فاکتورها شامل سه نوع منبع تأمین کننده روی به صورت مصرف خاکی (سولفات روی، بیوجار غنی از روی به روش پیش گرماکافت و پس گرماکافت)، سه سطح روی (۰، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم روی بر کیلوگرم خاک) و محلول پاشی روی (محلول پاشی با آب مقطر و سولفات روی ۳ در هزار) بود. نتایج نشان داد تیمارهای مورد بررسی باعث افزایش ویژگی‌های فیزیولوژیک در گیاه گندم شد به نحو‌ای که بیشترین مقدار کلروفیل a، b، کل به ترتیب با میانگین ۶/۹۹، ۳/۳۶ و ۸/۳۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه گیاه از تیمار پلت بیوجار پیش گرماکافت با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم همراه با محلول پاشی روی بدست آمد. همچنین بیشترین جذب روی در هر دو مرحله ظهور پرچم و مرحله برداشت به ترتیب با میانگین ۱۲۰/۳۳ و ۸۶/۶۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک گیاه از تیمار پلت بیوجار پیش و پس گرماکافت با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم همراه با محلول پاشی روی بدست آمد که نسبت به تیمار ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم همراه با محلول پاشی سولفات روی به ترتیب افزایشی معادل با ۲۷/۶۹ و ۳۰ درصد داشت. به طور کلی، نتایج بیانگر نقش مثبت پلت بیوجار- روی در افزایش غلظت و جذب روی در گیاه گندم بود. با این وجود، محلول پاشی تکمیلی روی همراه با پلت بیوجار غنی از

* عهده دار مکاتبات:

Email: mbarani2002@yahoo.com

روی به مقدار ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم به صورت پیش گرماکافت بیشترین تأثیر را بر ویژگی های فیزیولوژیک و زیست فراهمی روی برای گیاه گندم داشت.

مقدمه

خاک های آهکی باشد (۱۲ و ۱۳). مواد آلی با تشکیل کلات های پایدار با روی باعث افزایش حلالیت و کاهش تثبیت این عنصر در خاک می شوند. تبدیل پسماندهای آلی به بیوجار و کاربرد بیوجار در خاک یکی از مهم ترین راهکارها برای بهبود وضعیت کربن آلی خاک، بهبود کیفیت و سلامت خاک در سیستم های کشاورزی است (۶۶). بیوجار یک ماده جامد، متخلخل و غنی از کربن است که در اثر حرارت زیست توده در شرایط اکسیژن کم و یا بدون اکسیژن در فرآیند گرماکافت، تشکیل می شود (۶۷). افزایش فراهمی عناصر غذایی مانند آهن و روی در خاک، در اثر کاربرد بیوجار و تأثیر آن ها بر رشد و عملکرد گیاه نیز می تواند به دلیل افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، تغییرات pH خاک، تحریک فعالیت میکروبی خاک، بهبود ویژگی های کیفی خاک و آزادسازی مستقیم عناصر غذایی از بیوجار باشد (۲۱). گلسر^۱ و همکاران (۲۰۱۵) طی یک آزمایش مزرعه ای نشان دادند کاربرد بیوجار غنی شده در مقایسه با کودهای شیمیایی باعث افزایش عملکرد گیاه شد. دلیل آن می تواند مقاومت بالای بیوجار در برابر پوسیدگی و توانایی آن در حفظ و نگه داشتن عناصر به مدت طولانی باشد (۲۷). همچنین آن ها گزارش کردند که بیوجار باعث کاهش تغییرات آب و هوایی، بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و کاهش آلودگی محیط زیست می شود. گارتلر و همکاران^۲ (۲۰۱۳) گزارش کردند که مصرف بیوجار باعث افزایش غلظت روی در بروکلی و اسفناج شد (۲۵). بررسی ها نشان داده است که کاربرد بیوجار باعث کاهش هدر روی عناصر می شود که اثر بخشی آن به ویژگی های شیمیایی بیوجار و سطح کاربرد آن در خاک بستگی دارد

عنصر روی یکی از عناصر غذایی کم مصرف و ضروری برای گیاهان است که در ساخت پروتئین، فعال کردن بیش از ۳۰۰ آنزیم از جمله آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز، آنزیم های انتقال دهنده فسفاتاز، آنزیم های بیوسنتز کلروفیل، آنزیم های آنتی اکسیدان که از تخریب کلروفیل جلوگیری می کند نیز نقش دارد (۱۵) علاوه بر آن روی در تولید تربیتوفان، هورمون رشد و در افزایش نفوذ پذیری دیواره سلولی گیاه نقش داشته و در نتیجه مقاومت گیاه را در برابر تنش های زنده و غیر زنده افزایش می دهد (۴۱ و ۴۲). روی در خاک بیشتر به شکل ترکیبات کم محلول هیدروکسید و کربنات روی که برای گیاه غیر قابل دسترس می باشند، وجود دارد. فراهمی روی برای گیاهان در اغلب خاک های ایران، به دلیل آهکی بودن خاک ها، کم بودن مواد آلی، بالا بودن کربنات در آب آبیاری و مصرف بی رویه کودهای شیمیایی کم است. به گونه ای که غلظت قابل دسترس آن در اکثر خاک های کشور کمتر از یک میلی گرم بر کیلوگرم تخمین زده شده است (۴۱ و ۴۲). استفاده از کودهای شیمیایی دارای روی نظیر سولفات روی، کلات روی و محلول پاشی روی برای تأمین روی مورد نیاز گیاه ضروری می باشد (۴۱ و ۴۲). در خاک های آهکی حدود ۹۶ درصد روی افزوده شده به خاک در اثر کاربرد کودهای شیمیایی حاوی روی، به شکل های غیر قابل دسترس تبدیل می گردد (۶۲). از طرفی به دلیل تشابه الکترونی یون کادمیوم با یون روی مصرف کودهای شیمیایی حاوی روی باعث کمبود روی قابل دسترس در خاک و آلودگی خاک به وسیله کادمیوم و جذب کادمیوم توسط گیاهان و آلودگی محصولات کشاورزی می گردد (۴). کاربرد کودهای آلی یکی از راهکارهای مناسب جهت بهبود تغذیه روی در گیاهان، در

1- Glaser

2- Gartler et al.

مغذی در ساخت ترکیب آلی - معدنی بررسی کرده‌اند. هدف از این پژوهش بررسی اثر کاربرد توأم بیوجار غنی شده با روی و محلول پاشی روی بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک و زیست‌فراهمی روی در خاک و گیاه گندم در شرایط گلخانه‌ای بود.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و اندازه‌گیری ویژگی‌های اولیه خاک

خاک مورد استفاده از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک‌های استان گلستان (N:37°07'10.96 و E:55°14'11.99) برداشته شد. پس از هوا خشک شدن، از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی از قبیل بافت خاک، کربنات کلسیم معادل، pH و قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع، کربن آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل دسترس (۵۴) و عناصر غذایی کم مصرف نظیر آهن، روی، مس، منگنز با روش لیندزی و نورول^۴ اندازه‌گیری شدند (۳۹) (جدول ۱).

تهیه زیست‌توده و تولید بیوجار

تفاله نارنج مورد استفاده در تهیه بیوجار از باغ‌های مرکبات واقع در استان گلستان تهیه گردید. سپس به‌منظور حذف نمک‌های محلول چندین بار با آب مقطر شسته شدند. آنگاه خرد و از الک ۰/۲۱۲ میلی‌متر عبور داده شدند (۳۲). سپس در داخل کوره الکتریکی در دما ۴۵۰ با متوسط افزایش دما ۱۰ درجه سلسیوس بر دقیقه به‌مدت دو ساعت گرماکافت آهسته شد (۳۸).

تهیه بیوجار غنی شده با روی

در این پژوهش بیوجار غنی‌شده با روی به دو روش پیش گرماکافت و پس گرماکافت تهیه شد: در روش پیش گرماکافت^۵ به‌منظور اشباع سازی زیست‌توده از فرآیند

(۴۳، ۶۰ و ۶۱). پرکش و همکاران^۱ (۲۰۲۰) نشان دادند که کاربرد بیوجار باعث افزایش هدایت روزنه‌ای و فتوسنتز و کاهش دمای برگ و نشت الکترولیت در گیاه بادمجان شد (۵۵). در کشاورزی مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی منجر به کاهش راندمان کود و ایجاد مشکلات زیست‌محیطی می‌شود. بیوجار به دلیل ناحیه سطح ویژه بالا، تخلخل و گروه‌های عاملی سطحی فراوان دارای پتانسیل بالایی برای عرضه عناصر غذایی به خاک می‌باشد (۶۹). آغشته کردن بیوجار در محلول حاوی عناصر غذایی باعث افزایش ظرفیت جذب بیوجار، ناحیه سطح ویژه و کاهش pH بیوجار می‌شود، این ویژگی عالی بیوجار باعث شده است که از آن به عنوان کودهای کندرها مبتنی بر بیوجار استفاده گردد (۴۵). استفاده از کودهای کندرها می‌تواند کارایی مصرف عناصر غذایی را افزایش دهد. استفاده از کودهای کندرها به منظور رهاسازی تدریجی عناصر غذایی می‌باشد، به‌طوری‌که که این رهاسازی با نیاز گیاه در طول فصل رشد مطابقت داشته باشد (۶۵). به و همکاران^۲ (۲۰۱۹) گزارش کردند که بیوجار اشباع شده با عناصر غذایی، در کوتاه مدت در توسعه رشد گیاه اثر نداشته است اما به تدریج در طولانی مدت بر رشد گیاه اثر می‌گذارد (۷۰). زیمانیا کامیکاس و همکاران^۳ (۲۰۱۹) طی بررسی تهیه کود مرکب گرانوله بر پایه بیوجار گزارش کردند که کاربرد بیوجار اثر مثبتی بر عملکرد گیاه گندم بهاره داشته است (۶۵). حدود ۲۰ درصد پروتئین و کالری روزانه ۴/۵ میلیارد نفر از مردم سراسر جهان در یک وعده غذایی توسط گندم تأمین می‌شود (۲۴). به‌طوری‌که پیش‌بینی می‌شود تقاضای گندم در نتیجه رشد پایدار جمعیت طی یک دهه به ۵۳۶ تا ۵۵۱ میلیون تن برسد (۶۸). گندم به‌دلیل ارزش غذایی بالای آن یک محصول غذایی محبوب است (۵). با توجه به این که مطالعات بسیار معدودی کاربرد پلت بیوجار را به عنوان یک حامل مواد

1- Parkash *et al.*

2- Ye *et al.*

3- Szymaneaka-Mikos *et al.*

4 - Lindsay and Norvell

5- Pre-pyrolisis

ذرت به‌عنوان یک پلیمر زیستی و سازگار با محیط زیست که خواص ژله‌ای و از دی سدیم تترابورات سدیم جهت اتصال عرضی^۴ این پلیمر طبیعی (چسب نشاسته-دی سدیم تترابورات) استفاده گردید. پس از غنی سازی با روی، بیوجارهای غنی شده در نسبت ۱:۲ با چسب نشاسته-دی سدیم تترابورات توسط دستگاه اکسترودر در قطعات ۲-۵ میلی‌متری پلت گردیدند (۱۷ و ۲۹).

آزمایش گلخانه‌ای

در این پژوهش تأثیر کاربرد همزمان بیوجار غنی شده با روی و محلول‌پاشی روی بر ویژگی‌های رشد رویشی گیاه گندم به‌صورت گلدانی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در گلخانه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان به اجرا درآمد. فاکتور اول منبع تأمین روی به‌صورت کاربرد خاکی (سولفات روی، بیوجار پیش گرماکافت، بیوجار پس گرماکافت)، فاکتور دوم سطوح مختلف روی (صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم روی بر کیلوگرم خاک) به ترتیب بر اساس میزان توصیه کودی آزمون خاک روی و دو برابر مقدار آن) و فاکتور سوم محلول‌پاشی روی در دو سطح (محلول‌پاشی با آب مقطر به‌عنوان شاهد و محلول‌پاشی با محلول سولفات روی با غلظت ۳ در هزار) بود. لازم به ذکر است. محلول-پاشی روی در مراحل ۶-۱۰ برگی و در ساعات اولیه صبح قبل از طلوع آفتاب انجام شد. به منظور افزایش مدت زمان ماندگاری ترکیب محلول‌پاشی شده بر روی بوته‌ها از مویان (توین ۲۰) با نسبت ۰/۵ درصد حجمی استفاده گردید. واحدهای آزمایشی گلدان‌های پلاستیکی حاوی ۵ کیلوگرم خاک بود. سپس تعداد ۱۰ عدد بذر گندم در هر گلدان با عمق ۲ سانتی‌متری خاک کاشته که پس از سبز شدن و گذشت ۲ هفته تعداد بوته‌ها به ۴ عدد در هر گلدان تقلیل یافت. جهت حذف اثرات محیطی در طول دوره رشد جای گلدان‌ها دوبار در هفته به صورت تصادفی تغییر داده شد. عملیات آبیاری و وجین علف‌های هرز با دست انجام گرفت.

جذب زیستی استفاده گردید. بدین منظور ابتدا یک محلول ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر روی از نمک سولفات روی ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) تهیه شد (۴۴). سپس مقدار معینی از زیست‌توده (تفاله نارنج) به این محلول اضافه شد و به‌مدت ۴ ساعت با استفاده از همزن مغناطیسی در دما ۱۰۰ درجه سلسیوس با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه مخلوط شدند. پس از آن محتویات ظرف توسط فیلتر صاف و در آون قرار گرفتند. آنگاه در کوره الکتریکی در دما ۴۵۰ درجه سلسیوس با متوسط افزایش دما ۱۰ درجه سلسیوس بر دقیقه به‌مدت دو ساعت گرماکافت آهسته شدند (۳۸). در روش پس گرماکافت^۱، روش کار مشابه زیست‌توده غنی شده با روی بود با این تفاوت که به‌جای زیست‌توده از بیوجار تهیه شده در دما ۴۵۰ درجه سلسیوس به‌مدت ۲ ساعت استفاده شد. درصد کاهش وزن بقایا بر اثر گرماکافت و تبدیل به بیوجار (درصد عملکرد بیوجار^۲) و محتوای خاکستر^۳ از روش ASTM D-2866 استفاده شد که درصد عملکرد بیوجار برابر ۳۳/۷ درصد و محتوای خاکستر در زیست‌توده و بیوجار به ترتیب برابر ۵/۲۵ و ۱۶/۳۳ درصد بدست آمد (۱۶). همچنین مقادیر pH، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۱:۲۰ تعیین گردید (۵۸). برای تجزیه عنصری زیست-توده و بیوجار از روش هضم نمونه‌های خاکستر با اسید نیتریک استفاده گردید (۱۶) غلظت پتاسیم کل، غلظت سدیم کل در عصاره‌ها با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر و غلظت فسفر کل با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شدند (۴۹). برای اندازه‌گیری غلظت آهن کل، روی کل، مس کل و منگنز کل در زیست‌توده، بیوجار و پلت بیوجارهای غنی شده با روی از دستگاه جذب اتمی استفاده شد (۵۸). کربن آلی قابل اکسایش نیز با استفاده از روش والکل-بلک (۵۱) تعیین شد (جدول ۲). ظرفیت تبادل کاتیونی زیست‌توده و بیوجار با استفاده از روش استات آمونیوم نرمال (۵۶) اندازه‌گیری شد (جدول ۲). از نشاسته

1- Post-pyrolysis

2- Biochar yield

3- Ash content

4- Cross-link

(۴)

$$\text{غلظت} = 20.9(645A) - 8.02(663A) * V/W * 1000$$

کلروفیل کل

$$7.6(480A) - 1.49(510A) * V/W * 1000 \quad (۵)$$

= غلظت کاروتنوئید

پس از برداشت گیاهان، بلافاصله از خاک گلدان‌ها نمونه برداری و پس از انتقال به آزمایشگاه، هوا خشک، کوبیده و از الک ۲ میلی متر عبور داده شد. سپس مقدار روی قابل دسترس خاک به روش عصاره گیر DTPA (۳۹) تعیین شد. تجزیه آماری مقایسه بین تیمارهای مختلف با استفاده از نرم افزار SAS انجام و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون LSD (در سطح احتمال پنج درصد) استفاده شد.

نتایج و بحث

کلروفیل a و b

با توجه به نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) هم اثرات ساده نوع و سطوح مختلف تیمارهای مورد بررسی ($P < 0.01$) و هم اثر متقابل آن‌ها ($P < 0.05$) بر کلروفیل a و b گیاه گندم معنادار شد. مقایسه میانگین‌های اثر تیمارهای مورد بررسی نشان داد که هم پلت بیوچارهای غنی از روی هم سولفات روی باعث افزایش کلروفیل a و b در گیاه گندم شد (جدول ۴).

رطوبت خاک گلدان‌ها در طول دوره رشد گیاه در حدود ظرفیت زراعی به روش وزنی تأمین شد. در پایان دوره رشد (۶ ماه) در دو مرحله ظهور برگ پرچم و رسیدگی دانه غلظت روی گیاهان پس از هضم به روش اکسیداسیون خشک توسط دستگاه جذب اتمی اندازه گیری شد (۱۳). محتوای کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید در برگ‌های تازه توسعه یافته نیز با استفاده از روش آرنون (۸) اندازه گیری شدند. بدین منظور، ۰/۲ گرم برگ در استون ۸۰ درصد هموژن گردید. پس از سانتریفیوژ، محلول روئی برداشت و جذب آن در ۶۴۵، ۶۶۳، ۴۸۰ و ۵۱۰ نانومتر با استفاده از روش اسپکتروفتومتری اندازه گیری شد. آنگاه، توسط فرمول‌های زیر (رابطه ۲ تا ۵) مقادیر کلروفیل برحسب میلی گرم در گرم وزن تر برگ محاسبه شد (۷). در این روابط، A بیانگر جذب طول موج بر حسب نانومتر، V حجم نهایی کلروفیل در استون و W وزن تر بافت برحسب گرم می‌باشد.

$$12.7(663A) - 2.69(645A) * \quad (۲)$$

$$\text{غلظت کلروفیل a} = V/W * 1000$$

$$22.9(645A) - 4.68(663A) * \quad (۳)$$

$$\text{غلظت کلروفیل b} = V/W * 1000$$

جدول (۱) ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

Table (1) Some physical and chemical properties of soil used in the experiment

ظرفیت تبادل کاتیونی CEC	منگنز Ava. Mn	مس Ava. Cu	آهن Ava. Fe	پتاسیم قابل Ava. K	فسفر قابل دسترس Ava. P	نیتروژن کل Total N	پ هاش pH	قابلیت هدایت الکتریکی ECe	ماده آلی OM	کربنات کلسیم معادل CCE	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	بافت خاک Soil texture
Cmol ⁺ kg ⁻¹	mg kg ⁻¹			%	%	%	-	dS m ⁻¹	%	%	%	%	%	
13.58	30.04	1.99	17.28	0.64	228	7.1	0.12	7.1	0.62	1.42	15	18	60	22

جدول (۲) برخی ویژگی‌های زیست توده، بیوجار و بیوجار غنی از روی پلت شده

Table (2) Some properties of biomass, biochar and Pelletized biochars enriched with zinc

پارامتر Parameter	اسیدیته pH	قابلیت هدایت الکتریکی EC	کربن آلی (OC)	شاخص شوری Salt Index	ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)	روی کل (Total Zn)	منگنز کل (Total Mn)	مس کل (Total Cu)	آهن کل (Total Fe)	فسفر کل (Total P)	سدیم کل (Total Na)	پتاسیم کل (Total K)
	1:20	dS m ⁻¹	%		Cmol ⁺ kg ⁻¹	%	mg.kg ⁻¹					
زیست توده Biomass	4.16	1.5	50.51	-	17.23	0.0003	5.13	13.53	3.5	2505.95	192	270.86
بیوجار Biochar	8.3	2.8	46.12	-	23.3	0.001	12.36	17.73	63.23	3316.96	635.32	361.35
پلت بیوجار غنی شده پیش گرمکافت Pre-pyrolysis pelletized biochar enriched with zinc	6.61	2.14	46.80	0.055	-	6.04	-	-	-	-	-	-
پلت بیوجار غنی شده پس گرمکافت Post-pyrolysis pelletized biochar enriched with zinc	7.17	2.20	46.51	0.054	-	1.66	-	-	-	-	-	-

بیان کرد که سطح پایین پلت بیوجار غنی از روی توانسته است اثر مشابه با سطح بالاتر سولفات روی بر مقادیر کلروفیل a و b داشته باشد (جدول ۴). محتوای کلروفیل یکی از مهمترین عواملی است که ظرفیت فتوسنتزی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و کاهش و یا بدون تغییر ماندن محتوای کلروفیل گیاه تحت شرایط کمبود عناصر غذایی در گونه‌های مختلف گیاهی مشاهده می‌شود (۲۶). در شرایطی که مقدار روی در خاک کمتر از حد بهینه باشد، مقدار کلروفیل کاهش می‌یابد. بنابراین بهبود شرایط تغذیه‌ای با کاربرد کلات‌های آلی می‌تواند باعث افزایش غلظت کلروفیل‌های a، b و افزایش فتوسنتز شده که این امر موجب تولید عملکرد بیشتر در گندم می‌گردد (۱۹). شهبازی و همکاران (۲۰۲۳) در بررسی سطوح مختلف بیوجار و میکوریزا بر ارزیابی عملکرد گیاه اسفناج (*Spinacia oleracea L*) گزارش کردند که کاربرد بیوجار منجر به افزایش میزان کلروفیل a و b شد، به طوری که با افزایش میزان بیوجار از ۲، ۴ به ۶ تن در هکتار میزان کلروفیل

بیشترین کلروفیل a با میانگین ۴/۹۹ میلی گرم بر گرم تازه گیاه از تیمار پلت بیوجار پیش گرمکافت ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم روی همراه با محلول پاشی بدست آمد، هرچند با تیمار پلت بیوجار پس گرمکافت ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم روی همراه با محلول پاشی با میانگین ۴/۹۲ میلی گرم بر گرم تازه گیاه از لحاظ آماری اختلاف معناداری نداشت (جدول ۴). همچنین بیشترین کلروفیل b با میانگین ۳/۳۶ میلی گرم بر گرم تازه گیاه از تیمار پلت بیوجار پیش گرمکافت ۲۰ میلی - گرم بر کیلوگرم روی همراه با محلول پاشی بدست آمد هرچند با تیمار پلت بیوجار پیش گرمکافت ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم روی همراه با محلول پاشی با میانگین ۳/۱۶ میلی گرم بر گرم تازه گیاه از لحاظ آماری اختلاف معناداری نداشت (جدول ۴).

نتایج حاصل مقایسات میانگین داده‌ها نشان داد که پلت بیوجار غنی از روی در مقایسه با سولفات روی تأثیر بیشتری در افزایش مقادیر کلروفیل a و b شد در واقع می‌توان اینگونه

داشت (جدول ۴). همچنین کمترین مقدار با میانگین ۶/۲۱ میلی گرم بر گرم تازه گیاه مربوط به تیمار شاهد بود (جدول ۴). در واقع می توان اینگونه بیان کرد پلت بیوچار غنی از روی در مقایسه با سولفات روی سبب افزایش بیش تری در مقدار کلروفیل کل شد (جدول ۶).

کاروتنوئید

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده ها برای بررسی اثر تیمارها مورد بررسی بر مقدار کاروتنوئید، نه تنها اثرات ساده بلکه اثرات دوگانه تیمارهای مورد بررسی در سطح احتمال یک درصد ($P < 0/01$) معنادار شد این در حالی است که اثر متقابل سه گانه تیمارهای منبع روی، سطوح روی و نوع محلول پاشی معنادار نشد (جدول ۳).

نتایج اثرات متقابل دوگانه منبع روی و سطوح کاربرد پلت بیوچار نشان داد بیشترین مقدار کاروتنوئید با میانگین ۴۱/۵۴ میکروگرم بر کیلوگرم مربوط به سطح ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم روی پلت بیوچار پیش گرماکافت بود و کمترین مقدار آن با میانگین ۲۳/۸۸ میکروگرم بر کیلوگرم مربوط به تیمار شاهد بود (شکل ۱). همچنین اثرات متقابل دوگانه منبع روی و نوع محلول پاشی نشان داد بیشترین مقدار کاروتنوئید با میانگین ۳۷/۱۴ میکروگرم بر کیلوگرم مربوط به تیمار پیش گرماکافت همراه با محلول پاشی روی بود که نسبت به تیمار پسگرماکافت و سولفات روی همراه با محلول پاشی به ترتیب با میانگین ۳۵/۴۵ و ۳۱/۸۰ میکروگرم بر کیلوگرم افزایشی معادل با ۴/۵۵ و ۱۴/۳۷ درصد داشت (شکل ۲). اثرات متقابل دوگانه سطوح کودی و نوع محلول پاشی حاکی از آن است که زمانیکه بالاترین سطح کودی همراه با محلول پاشی انجام می شود بیشترین مقدار کاروتنوئید با میانگین ۴۱/۵۴ میکروگرم بر کیلوگرم بدست می آید (شکل ۳).

a نسبت به شاهد به ترتیب ۸/۰۵، ۱۵/۷۲ و ۳۲/۹۶ درصد افزایش یافت، این میزان در کلروفیل b به ترتیب ۵/۳۲، ۱۲/۳۸ و ۲۶/۳۷ درصد بود (۶۳). آنها دلیل افزایش میزان کلروفیل را فراهمی عناصر غذایی گزارش کردند. در همین راستا بزی عبدلی و همکاران^۱ (۲۰۲۳) در بررسی اثر کاربرد بیوچار اصلاح شده به روش پس و پیش گرماکافت اسیدی بر برخی شاخص های فیزیولوژیکی و فراهمی عناصر غذایی در گیاه کینوا گزارش کردند که در هر سه نوع بیوچار (معمولی، پس و پیش اسیدی) با افزایش سطوح بیوچار، مقادیر کلروفیل a و b را افزایش دادند به نحوی که بیشترین کلروفیل a و b به ترتیب با میانگین ۲/۸۵ و ۱/۵۴ میلی گرم بر گرم تازه گیاه از تیمار ۵ درصد بیوچار پس اسیدی بدست آمد و کمترین مقدار آن مربوط به تیمار شاهد بود (۱۰). همچنین نتایج حاصل از پژوهش آنها نشان داد که در اثر پس گرماکافت کردن بیوچار حاصل از برنج مقدار محتوی خاکستر، عملکرد بیوچار و غلظت عناصر غذایی در مقایسه با بیوچار پیش گرماکافت اسیدی و بیوچار اصلاح نشده افزایش یافت

کلروفیل کل

نتایج تجزیه واریانس داده ها حاکی از آن است که نوع و سطوح تیمارهای مورد بررسی و اثرات متقابل آنها بر مقدار کلروفیل کل در سطح احتمال یک درصد ($P < 0/01$) معنادار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین های اثر تیمارهای مورد بررسی نشان داد که هم پلت بیوچارها غنی شده با روی و هم سولفات روی با افزایش سطوح روی باعث افزایش کلروفیل کل شدند به نحوی که بیشترین مقدار کلروفیل کل با میانگین ۸/۳۵ میلی گرم بر گرم تازه گیاه مربوط به تیمار پلت بیوچار پیش گرماکافت ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم روی همراه با محلول پاشی روی بود که نسبت به تیمار پلت بیوچار پس گرماکافت و سولفات روی ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم روی همراه با محلول پاشی به ترتیب با میانگین ۸/۰۱ و ۷/۳۵ میلی گرم بر گرم تازه گیاه افزایشی معادل با ۴/۰۷ و ۱۱/۹۷ درصد

سوسرائی و همکاران: تأثیر کاربرد توأم بیوجار غنی شده با روی و ...

جدول (۳) تجزیه واریانس اثر کاربرد نوع و سطوح مختلف بیوجارهای پلت شده بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک گیاه گندم
Table (3) Analysis of variance of the effect of application type and different levels of Pelletized biochars on some physiological traits of wheat

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات MS			
		کلروفیل a (Choloropyll a)	کلروفیل b (Choloropyll b)	کلروفیل کل (Total) (Choloropyll)	کاروتنوئید (Carotenoid)
منبع روی (Source of Zinc)	2	0.08**	0.48**	0.96**	111.93**
سطح (Level)	2	1.14**	2.23**	6.57**	817.68**
نوع محلول پاشی (Foliar Sprying Type)	1	0.35**	3.03**	5.47**	517.05**
منبع روی*سطح (Source of Zn *Level)	4	0.02**	0.16**	0.3**	28.48**
منبع روی*نوع محلول پاشی (Source of Zn*Foliar) (Sprying Type)	2	0.02**	0.15**	0.07 ^{ns}	8.03**
سطح*نوع محلول پاشی (Level* Foliar Sprying) (Type)	2	0.04**	0.6**	0.92**	111**
منبع روی*سطح*نوع محلول پاشی (Source of Zn) *Level*Foliar Sprying (Type)	4	0.01*	0.6*	0.03**	1.16 ^{ns}
خطا (Error)	36	0.002	0.02	0.02	0.33
ضریب تغییرات (CV)		1.04	6.43	2.32	1.83

ns، * و ** به ترتیب غیر معناداری و معناداری در سطح احتمال یک و پنج درصد می‌باشد.

ns, * and ** are non-significant, significant $P \leq 0.05$ and $P \leq 0.01$, respectively

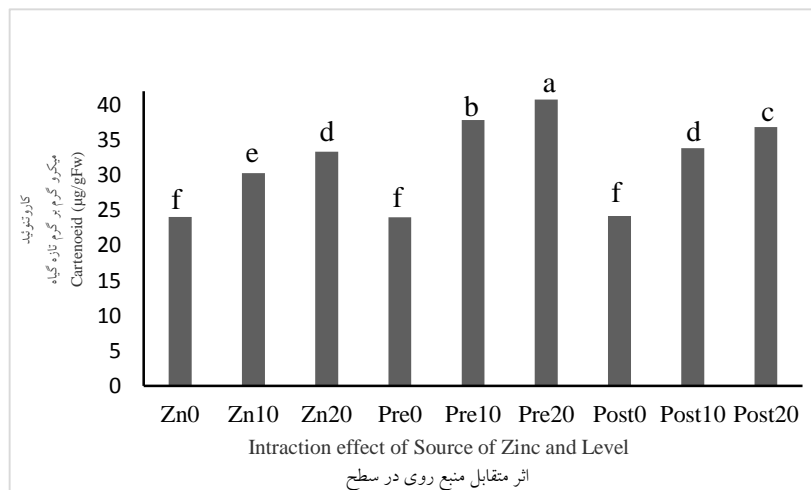
جدول (۴) مقایسه میانگین‌های اثر کاربرد نوع و سطوح مختلف بیوجارهای پلت شده بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک گیاه گندم
 Table (4) Mean comparisons of the effect of application type and different levels of Pelletized biochars on some physiological traits of wheat

تیمار (Treatment)		کلروفیل a (میلی گرم بر گرم وزن تازه گیاه) Choloropyll a (mg g ⁻¹)	کلروفیل b (میلی گرم بر گرم وزن تازه گیاه) Choloropyll b (mg g ⁻¹)	کلروفیل کل (میلی گرم بر گرم وزن تازه گیاه) Total Choloropyll (mg g ⁻¹)	
منبع روی (Source of Zinc)	سطح (Level)	نوع محلول پاشی (Foliar Spraying Type)			
سولفات روی Zinc Sulfate	0	آب مقطر Distilled Water	4.33 ^{ghi}	1.92 ^f	6.26 ^{hi}
		محلول پاشی روی Foliar spraying with Zinc	4.41 ^{fg}	1.94 ^f	6.36 ^{hi}
	10	آب مقطر Distilled Water	4.44 ^f	2.08 ^{ef}	6.52 ^{gh}
		محلول پاشی روی Foliar spraying with Zinc	4.80 ^{cd}	2.49 ^{cd}	7.3 ^{cd}
	20	آب مقطر Distilled Water	4.6 ^e	2.14 ^{ef}	6.74 ^{fg}
		محلول پاشی روی Foliar spraying with Zinc	4.84 ^{bcd}	2.5 ^c	7.35 ^c
پیش گرماکافت Pre-Pyrolysis	0	آب مقطر Distilled Water	4.34 ^{ghi}	1.90 ^f	6.24 ⁱ
		محلول پاشی روی Foliar spraying with Zinc	4.39 ^{fgh}	1.91 ^f	6.30 ^{hi}
	10	آب مقطر Distilled Water	4.80 ^{cd}	2.24 ^{de}	7.05 ^{de}
		محلول پاشی روی Foliar spraying with Zinc	4.89 ^b	3.16 ^{ab}	8.06 ^b
	20	آب مقطر Distilled Water	4.85 ^{bcd}	2.45 ^{cd}	7.31 ^{cd}
		محلول پاشی روی Foliar spraying with Zinc	4.99 ^a	3.36 ^a	8.35 ^a
پس گرماکافت Post-Pyrolysis	0	آب مقطر Distilled Water	4.30 ⁱ	1.91 ^f	6.21 ⁱ
		محلول پاشی روی Foliar spraying with Zinc	4.33 ^{hi}	2.06 ^{ef}	6.4 ^{hi}
	10	آب مقطر Distilled Water	4.5 ^e	2.14 ^{ef}	6.70 ^{fg}
		محلول پاشی روی Foliar spraying with Zinc	4.86 ^{bc}	2.68 ^c	7.5 ^c
	20	آب مقطر Distilled Water	4.77 ^d	2.14 ^{ef}	6.92 ^{ef}
		محلول پاشی روی Foliar spraying with Zinc	4.92 ^{ab}	3.08 ^b	8.01 ^b

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، نمایانگر عدم اختلاف معناداری در سطح احتمال ۵ درصد است.

In each column, Means followed with at least one the same letter are not significantly different (P<0.05)

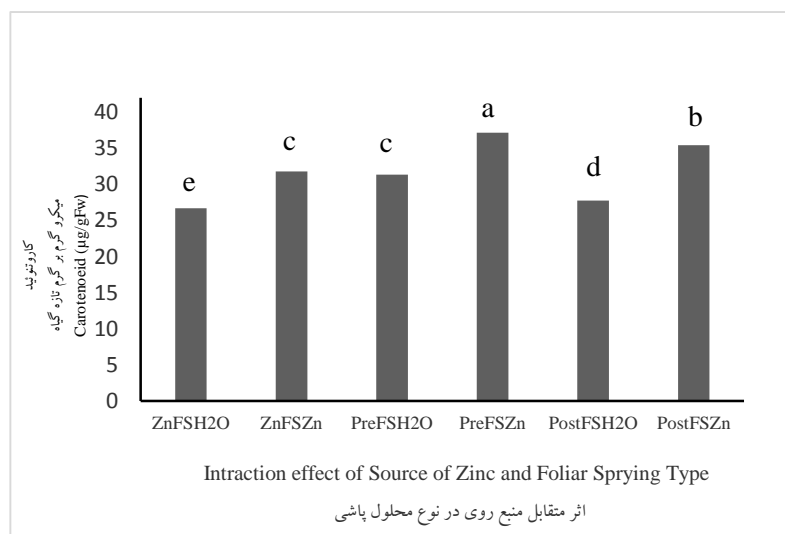
سوسرائی و همکاران: تأثیر کاربرد توأم بیوجار غنی شده با روی و ...



سولفات ۱۰، سولفات ۲۰، پیش گرماکافت سطح صفر، پیش گرماکافت سطح ۱۰، پیش گرماکافت سطح ۲۰، پس گرماکافت سطح صفر، پس گرماکافت سطح ۱۰، پس گرماکافت سطح ۲۰

شکل (۱) اثر متقابل منبع روی و سطوح بر مقدار کاروتنوئید

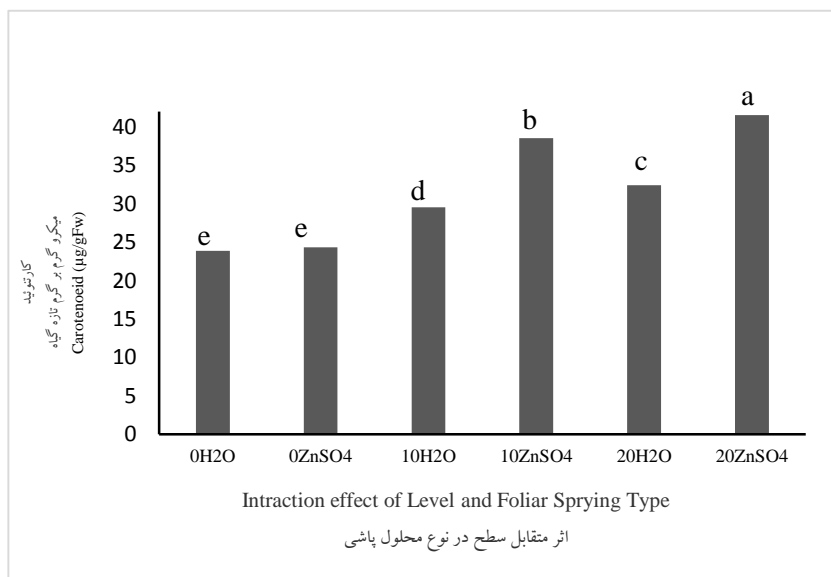
Figure (1) Intraction effect of Source of Zinc and Levels on Cartenoeid amount



محلول پاشی با روی، پیش گرماکافت محلول پاشی با آب مقطر، پیش گرماکافت محلول پاشی با سولفات روی، پس گرماکافت محلول پاشی با آب مقطر و پس گرماکافت محلول پاشی با سولفات روی

شکل (۲) اثر متقابل منبع روی و نوع محلول پاشی بر مقدار کاروتنوئید

Figure (2) Intraction effect of Source of Zinc and Foliar Spraying Type on Cartenoeid amount



کوشکی و همکاران^۱ (۲۰۲۱) در بررسی تأثیر بیوچار پوسته برنج و رژیم‌های مختلف آبیاری بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و غلظت عناصر غذایی در نعنای فلفلی (*Mentha piperita L.*) نشان دادند بیشترین مقدار کاروتنوئید با مقدار ۲/۶۴ گرم وزن تازه گیاه از تیمار ۶ تن در هکتار بیوچار همراه با آبیاری ۱۲۰٪ آبیاری کامل بدست آمد (۳۴). آقایی و همکاران (۲۰۲۲) در بررسی محلول پاشی روی و نانو ذره روی بر رشد و رنگیزه‌های فتوسنتزی ریحان سبز گزارش کردند که محلول پاشی روی در هر سه سطح ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر باعث افزایش کلروفیل و کاروتنوئید شد (۵). آدجومو و همکاران^۲ (۲۰۱۶) با کاربرد دو نوع بیوچار حاصل از بقایای آفتابگردان و سبوس برنج تهیه شده در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس) با pH اسیدی و در سه سطح مختلف (۵، ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار) در یک آزمایش مزرعه‌ای در

شکل (۳) اثر متقابل سطح و نوع محلول پاشی بر مقدار کاروتنوئید

Figure (3) Intraaction effect of Level and Foliar Spraying Type on Cartenoeid amount

کشت ذرت بیان کردند که کاربرد هر دو نوع بیوچار سبب افزایش معنادار مقدار کلروفیل برگ ذرت نسبت به تیمار عدم کاربرد بیوچار شد (۳). بزی عبدلی همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند که اصلاح کردن بیوچار به روش پس و پیش‌گرماکافت اسیدی باعث افزایش معنادار کلروفیل کل و کاروتنوئید در گیاه کینوا شد به نحوی که بیشترین مقدار کلروفیل کل و کاروتنوئید به ترتیب با میانگین ۴/۱۳ و ۱/۳۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه گیاه مربوط به تیمار ۵ درصد بیوچار پس‌اسیدی بدست آمد (۱۰).

غلظت و جذب روی در گیاه

با توجه به نتایج تجزیه واریانس (جدول ۵) هم اثرات ساده نوع و سطوح مختلف تیمارهای مورد بررسی و هم اثر متقابل آن‌ها بر غلظت و جذب روی اندام هوایی در هر دو مرحله ظهور پرچم و مرحله برداشت گیاه گندم در سطح احتمال یک درصد ($P < 0.01$) معنادار شد. مقایسه

1 Koushki et al.

2- Adejumo et al.

جدول (۵) تجزیه واریانس اثر کاربرد نوع و سطوح مختلف بیوجارهای پلت شده بر غلظت روی در گیاه و خاک
 Table (5) Analysis of variance of the effect of application type and different levels of Pelletized biochars on Zn concentration in plant and soil

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات MS				
		غلظت روی اندام هوایی در مرحله رسیدگی دانه	غلظت روی اندام هوایی در مرحله رسیدگی دانه	جذب روی اندام هوایی در مرحله پرچم	جذب روی اندام هوایی در مرحله رسیدگی دانه	روی استخراج شده با DTPA
		Zn concentration in shoot at flag leaf emergence stage	Zn concentration in shoot at seed maturity stage	Zn uptake in shoot at flag leaf emergence stage	Zn uptake in shoot at seed maturity stage	Zn extracted with DTPA
منبع روی (Source of Zinc)	2	236.95**	89.35**	1796**	614.95**	1.16**
سطح (Level)	2	1744.33**	902.35**	17889**	6877.15**	12.44**
نوع محلول پاشی (Foliar Spraying Type)	1	1261.69**	888.16**	8182**	6477.14**	6.69**
منبع روی*سطح (Source of Zinc*Level)	4	63.088**	29.26**	502.76**	248.23**	0.58**
منبع روی*نوع محلول پاشی (Source of Zinc*Foliar Spraying Type)	2	4.44**	28.5**	24.14**	251.32**	0.11*
سطح*نوع محلول پاشی (Level* Foliar Spraying Type)	2	234.23**	165.50**	1824**	1292.94**	0.1*
منبع روی*سطح*نوع محلول پاشی (Source of Zinc*Level* Foliar) Spraying Type	4	3.70**	10.58**	10.81**	77.69**	0.12*
خطا Error	36	0.71	1.18	3.52	6.14	0.02
ضریب تغییرات CV		2.8	5.63	3.07	5.86	10.07

ns, **, * و * به ترتیب غیر معناداری و معناداری در سطح احتمال یک و پنج درصد می باشد.

ns, * and ** are non-significant, significant $P \leq 0.05$ and $P \leq 0.01$, respectively

مربوط به تیمار پلت بیوجار پیش گرماکافت با غلظت ۲۰ میلی-گرم بر کیلوگرم همراه با محلول پاشی روی بود که نسبت به تیمار ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم پلت بیوجار پس گرماکافت و سولفات روی به ترتیب با میانگین ۴۲/۸۳ و ۳۸/۶۶ میلی گرم بر کیلوگرم به ترتیب افزایشی معادل با ۱۴/۳۴ و ۲۲/۶۸ درصد

میانگین های اثر تیمارهای مورد بررسی نشان داد هم پلت بیوجارهای غنی شده با روی هم سولفات روی باعث افزایش غلظت و جذب روی اندام هوایی گیاه گندم در هر دو مرحله ظهور پرچم و مرحله برداشت شد به نحوه ای که بیشترین غلظت روی در مرحله ظهور پرچم با میانگین ۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم

جذب روی در گندم گزارش کردند که تیمارهای نانو ذرات اکسید روی و کود شیمیایی، به دنبال تحریک ریشه و تولید ترشحات ریشه‌ای، کربن آلی محلول خاک را افزایش می‌دهد و این ترکیبات با تشکیل کمپلکس با روی، موجب افزایش گونه‌های روی کمپلکس شده با ترکیبات آلی می‌شود (۲). در همین راستا بزی عبدلی و همکاران (۲۰۲۳) در بررسی اثرات اصلاح بیوچار به روش پیش و پس اسیدی بر فراهمی عناصر غذایی در گیاه کینوا نشان دادند که بیشترین مقدار روی اندام هوایی با میانگین ۱۳/۴۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم مربوط به تیمار ۵ درصد بیوچار پس اسیدی بود که نسبت به تیمار ۵ درصد بیوچار پیش اسیدی و معمولی به ترتیب افزایش معادل با ۱۳/۲۴ و ۳۳/۲۶ درصد داشت (۱۰). آنها دلیل برتری بیوچار پس اسیدی نسبت به پیش اسیدی و معمولی را حل شدن عناصر غذایی بعد از اسیدی شدن بیوچار و کاهش پ هاش خاک و فراهمی عناصر کم مصرف گزارش کردند که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. مقایسه میانگین‌های اثر تیمارهای مورد بررسی نشان داد که بیشترین غلظت روی در مرحله برداشت گیاه با میانگین ۳۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم مربوط به تیمار ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم پلت بیوچار پس گرماکافت همراه با محلول پاشی روی بود هرچند از لحاظ آماری با تیمار ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم روی پلیت بیوچار پیش گرماکافت با میانگین ۳۲/۶۶ اختلاف معناداری نداشت و کمترین مقدار آن با میانگین ۱۱ مربوط به تیمار شاهد بود (جدول ۶). همچنین نتایج حاکی از آن است که بیشترین مقدار جذب روی در مرحله برداشت گیاه با میانگین ۸۶/۶۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک گیاه به تیمار پلت بیوچار پس گرماکافت با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم همراه با محلول‌پاشی روی که نسبت به تیمار ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم تیمار پلت بیوچار پیش گرماکافت و سولفات روی به ترتیب بامیانگین ۸۰/۴۹ و ۶۰/۶۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک گیاه افزایش معادل با ۷/۰۷ و ۳۰ درصد داشت و کمترین مقدار آن با میانگین ۱۸/۶۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک گیاه مربوط به تیمار شاهد بود (جدول ۶). مقدار ماده آلی، بافت و pH از ویژگی‌های تأثیرگذار خاک بر زیست‌فراهمی Zn می‌باشند. فعل و انفعالات

داشت (جدول ۶). همچنین نتایج حاکی از آن است که بیشترین مقدار جذب آن با میانگین ۱۲۰/۳۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک گیاه به تیمار پلت بیوچار پیش گرماکافت با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم همراه با محلول‌پاشی روی بود که نسبت به تیمار ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم پلت بیوچار پس گرماکافت و سولفات روی همراه با محلول‌پاشی به ترتیب با میانگین ۱۰۲/۳۶ و ۸۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک گیاه افزایشی معادل با ۱۴/۹ و ۲۷/۶۹ درصد داشت. کمترین مقدار آن با میانگین ۲۵/۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک گیاه مربوط به تیمار شاهد بود (جدول ۶). خاک مورد آزمایش بر اساس حد بحرانی کمبود روی در خاک (۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) (۴۷)، دچار کمبود شدید روی قابل عصاره‌گیری با DTPA بود (جدول ۱). با انحلال پلت بیوچار غنی از روی، روی موجود در بیوچار آزاد شده و با قرار گرفتن بر مکان تبدیلی ذرات خاک موجب افزایش روی قابل دسترس می‌شود. pH محلول خاک و غلظت کربن آلی خاک دو فاکتور مهم هستند که فراهمی عناصر غذایی موجود در محلول خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۲۹). از طرفی پلت بیوچار غنی شده با روی احتمالاً به دلیل داشتن اسیدیته پایین (۶/۰۴) باعث تعدیل pH خاک شده است. با کاهش هر واحد pH خاک حلالیت روی خاک ۱۰۰ برابر افزایش می‌یابد (۴۱) و منجر به افزایش مقدار روی قابل دسترس خاک می‌شود علاوه بر pH خاک، بر همکنش‌های بین خاک و ریشه نیز اثرات معنادار بر قابلیت دسترسی روی در منطقه ریزوسفر دارد (۶۱). به گونه‌ای که به علت ترشحات ریشه‌ای فراوان و فعالیت‌های میکروبی بیشتر، قابلیت دسترسی روی در ریزوسفر اغلب بالاتر از توده خاک است (۲۰). از این رو با تغییر pH و کربن آلی محلول در منطقه ریزوسفر گیاه، فراهمی زیستی عناصر در خاک تحت تأثیر قرار می‌گیرد (۴۰). در واقع ترشحات ریشه‌ای به واسطه کلات کردن و اکسیداسیون و احیاء می‌توانند حلالیت، جذب، واجذب، جزء بندی و انتقال عنصر در خاک را تغییر دهند. عبدالهی و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی تأثیر نانو ذرات اکسید روی و سولفات روی بر گونه‌های شیمیایی روی در فاز محلول خاک و همبستگی آن با غلظت و

درصد داشت. سازوکارهای جذب، با کنترل مقدار Zn محلول و Zn در دسترس، اثر تعیین کننده در تأمین Zn مورد نیاز گیاهان دارند. از عصاره گیرهای مختلفی برای ارزیابی زیست فراهمی Zn خاک استفاده می شود که DTPA یکی از این استخراج کننده ها است که در انواع مختلف خاک ها، با تشکیل کی لیت Zn استخراج Zn از خاک توسط ترشحات گیاهی و جذب Zn توسط ریشه های گیاهان را شیب سازی می کند (۳۶). افزایش غلظت عناصر در خاک های تیمار شده با بیوجار، علاوه بر فراهمی آن عناصر در بیوجار (اثر مستقیم) می تواند ناشی از اثر بیوجار بر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک مثل تغییر pH خاک، تولید عوامل کی لیت کننده، بهبود تهویه و افزایش فعالیت های میکروبی باشد (۳۲). افزایش روی قابل استخراج با DTPA در تیمار شده با بیوجار می تواند ناشی از ورود مستقیم Zn از بیوجار به خاک باشد. علاوه بر این تأثیر بیوجار بر واکنش رهاسازی Zn نیز می تواند از دلایل افزایش مقدار روی قابل استخراج با DTPA باشد برای مثال Fe و Cu آزاد شده از سطوح بیوجار می تواند Zn پیوند یافته با ماده آلی را آزاد و غلظت Zn قابل دسترس خاک را افزایش دهد (۲۳). کریمی و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی دو سطح وزنی (۱ و ۲ درصد) سه نوع بیوجار در دمای گرمکافت (۲۰۰، ۳۵۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس) بر جزء بندی شیمیایی و قابلیت فراهمی روی در خاک های آهکی گزارش کردند که سطوح ۱ و ۲ درصد وزنی بیوجار تولید شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب باعث افزایش ۲۰/۴ و ۲۸ درصدی روی قابل استخراج با DTPA نسبت به تیمار شاهد شد. این درحالیست سطوح ۱ و ۲ درصد بیوجارهای تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب باعث کاهش ۲/۳ و ۱۰/۱ درصدی مقدار روی قابل استخراج با DTPA شد (۳۰). آنها دلیل افزایش روی قابل استخراج با DTPA را کاهش اسیدیته خاک در اثر کاربرد بیوجار تولید شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس نسبت به سایر بیوجار گزارش کردند.

Zn با اجزای خاک و مواد افزوده شده به خاک، میزان زیست فراهمی و قابلیت جذب آن توسط گیاهان را تحت تأثیر قرار می دهد (۲۳). بیوجار بعد از اختلاط با خاک، ضمن برهمکنش با اجزای خاک، وارد فرایندهای فیزیکی و شیمیایی مختلف شده و به عنوان یک بهساز خاک می تواند زیست فراهمی عناصر را افزایش و با بهبود حاصلخیزی خاک، رشد گیاهان را تقویت کند (۲۱). از طرف دیگر، ممکن است مصرف بیوجار به دلیل سطح ویژه بالا و ساختار متخلخل و گروه های عاملی سطحی زیاد، عناصر غذایی ضروری خاک را جذب و اثرهای منفی بر زیست فراهمی Zn داشته باشد. به دلیل pH قلیایی و اثر آهکی موجود در اکثر بیوجارها، نتایج مثبت کاربرد بیوجار در خاک های اسیدی بیشتر گزارش شده است (۲۳). کریمی و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی بیوجار با گاس نیشکر بر فراهمی عناصر غذایی گزارش کردند که بیوجار سنتز شده در دماهای پایین (۲۰۰ درجه سلسیوس) به علت داشتن pH پایین و CEC بالا باعث افزایش فراهمی عناصر کم مصرف مانند آهن و روی می - شوند (۳۱). افزایش CEC خاک سبب افزایش مکان های جذب قابل برگشت بر سطوح خاک می شود، بنابراین آهن و روی می - توانند بیشتر در شکل های قابل استفاده قرار گیرند (۱۱).

غلظت روی استخراج شده با DTPA

با توجه به نتایج تجزیه واریانس (جدول ۵) هم اثرات ساده منبع روی و سطوح مختلف تیمارهای مورد بررسی (در سطح احتمال یک درصد $P < 0.01$) و هم اثر متقابل آن ها در سطح احتمال ۵ درصد ($P < 0.05$) مقدار روی استخراج شده با DTPA معنادار شد. نتایج مقایسه میانگین های اثر متقابل نوع و سطوح مختلف پلت بیوجارها بر مقدار روی استخراج شده با DTPA نیز در (جدول ۶) نشان داده شده است. نتایج نشان داد بیشترین مقدار روی استخراج شده با DTPA با میانگین ۳/۴۱ میلی گرم بر کیلوگرم از تیمار پلت پیش گرمکافت با غلظت ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم روی همراه با محلول پاشی بدست آمد که نسبت به تیمار ۱۰ و صفر میلی گرم بر کیلوگرم روی پلت بیوجار پیش گرمکافت همراه با محلول پاشی به ترتیب با میانگین ۲/۳۹ و ۰/۹۲ میلی گرم بر کیلوگرم افزایشی معادل ۲۹/۹۱ و ۷۳/۰۲

جدول (۶) مقایسه میانگین‌های اثر کاربرد نوع و سطوح مختلف بیوجارهای پلت شده بر غلظت روی در گیاه و خاک
 Table (6) Mean comparisons of the effect of application type and different levels of Pelletized biochars on Zn concentration in plant and soil

Treatment تیمار		غلظت روی اندام هوایی در مرحله پرچم	غلظت روی اندام هوایی در مرحله رسیدگی دانه	جذب روی اندام هوایی در مرحله پرچم	جذب روی اندام هوایی در مرحله رسیدگی دانه	روی استخراج شده با DTPA	
منبع روی Source of Zinc	سطح Level	concentration Zn in shoot at flag leaf emergence stage (mg kg ⁻¹)	Zn concentration in shoot at seed maturity stage (mg kg ⁻¹)	Zn Uptake in shoot at flag leaf emergence stage mg kg ⁻¹ dry) (plant)	Zn Uptake in shoot at seed maturity stage (mg kg ⁻¹ dry plant)	Zn extracted with DTPA (mg kg ⁻¹)	
سولفات روی Zinc Sulfate	0	آب مقطر Distilled Water	18.33 ^{mn}	11 ^k	25.15 ^m	20.72 ^{jk}	0.38 ^b
		محلول پاشی روی Foliar spraying with Zinc	19.56 ^k	12 ^{jk}	28.28 ^l	23.28 ^{ij}	1 ^a
	10	آب مقطر Distilled Water	20.66 ^k	13 ^{ij}	35.88 ^k	25.57 ⁱ	1.06 ^a
		محلول پاشی روی Foliar spraying with Zinc	34.66 ^f	23.66 ^e	76.28 ^f	52.89 ^e	1.48 ^f
	20	آب مقطر Distilled Water	27.33 ⁱ	15.33 ^{gh}	55.21 ⁱ	32.55 ^{gh}	2.03 ^d
		محلول پاشی روی Foliar spraying with Zinc	38.66 ^e	27 ^{cd}	87 ^d	60.63 ^d	2.63 ^b
پیش گرماکافت Pre- Pyrolysis	0	آب مقطر Distilled Water	18 ⁿ	10.66 ^k	25.33 ^{ml}	19.33 ^{jk}	0.33 ^b
		محلول پاشی روی Foliar spraying with Zinc	19.33 ^{km}	12 ^{jk}	26 ^{ml}	21 ^{jk}	0.92 ^a
	10	آب مقطر Distilled Water	32.88 ^g	18.66 ^f	66.43 ^h	39.93 ^f	1.74 ^e
		محلول پاشی روی Foliar spraying with Zinc	45.66 ^b	28.33 ^{bc}	107.47 ^b	65.04 ^e	2.39 ^{bc}
	20	آب مقطر Distilled Water	36 ^f	26.33 ^d	82.08 ^e	59.07 ^d	2.06 ^d
		محلول پاشی روی Foliar spraying with Zinc	50 ^a	32.66 ^a	120.33 ^a	80.49 ^b	3.41 ^a
پس گرماکافت Post- Pyrolysis	0	آب مقطر Distilled Water	17.33 ⁿ	11 ^k	24.66 ^m	18.66 ^k	0.38 ^b
		محلول پاشی روی Foliar spraying with Zinc	19 ^m	12 ^{jk}	25.66 ^{ml}	21.66 ^{ijk}	0.89 ^a
	10	آب مقطر Distilled Water	23.33 ^j	14.66 ^{hi}	51.96 ^j	30.20 ^h	1.09 ^a
		محلول پاشی روی Foliar spraying with Zinc	40.83 ^d	29.66 ^b	87.37 ^d	68.20 ^e	2.02 ^d
	20	آب مقطر Distilled Water	29.66 ^h	16.66 ^g	72.48 ^g	35.63 ^g	1.46 ^f
		محلول پاشی روی Foliar spraying with Zinc	42.83 ^e	33 ^a	102.36 ^c	86.62 ^a	2.14 ^{cd}

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، نمایانگر عدم اختلاف معناداری در سطح احتمال ۵ درصد است.

In each column, Means followed with at least one the same letter are not significantly different (P<0.05)

همبستگی پارامترهای مورد بررسی

ضرایب همبستگی بین مقدار روی عصاره‌گیری شده با روش‌های مختلف و شاخص‌های گیاهی شامل کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید و مقدار روی در دو مرحله برداشت گیاه در جدول (۷) گزارش شده است. مقدار روی عصاره‌گیری شده با DTPA با مقدار کلروفیل a ($r=0/87^{**}$)، کلروفیل b ($r=0/81^{**}$)، کلروفیل کل ($r=0/87^{**}$) و کاروتنوئید ($r=0/89^{**}$) دارای همبستگی مثبت و معناداری بود. همچنین نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد همبستگی مثبت و معناداری بین روی عصاره‌گیری شده با DTPA با غلظت روی ($r=0/91^{**}$) و جذب روی ($r=0/90^{**}$) در مرحله ظهور پرچم و غلظت روی ($r=0/87^{**}$) و جذب روی ($r=0/86^{**}$) در مرحله برداشت در گیاه گندم به دست آمد. برای ارزیابی توانایی هر عصاره‌گیر در برآورد مقدار روی قابل استفاده گیاه از ضریب همبستگی بین مقدار روی عصاره‌گیری شده به وسیله آن عصاره‌گیر و مقدار روی جذب شده توسط گیاه استفاده می‌شود (۴۸). توان استخراج عصاره‌گیرهای مختلف متأثر از ویژگی‌های خاک نظیر pH، رس، ماده آلی، کربنات کلسیم و مقدار عناصر کم نیاز است (۵۷). ارزش هر عصاره‌گیر بستگی به همبستگی بین مقدار عنصر عصاره‌گیری شده با مقدار عنصر جذب شده توسط گیاه دارد، در واقع عصاره‌گیر مناسب، محلولی است که بالاترین ضریب همبستگی را با عنصر جذب شده توسط گیاه و سایر پاسخ‌های گیاهی نشان دهد (۵۰). آزادسازی روی از فازهای تبادلی، مواد آلی، کانی کریستاله و سایر ترکیبات به درون محلول خاک فرآیندی است که کنترل‌کننده تحرک روی و تعیین‌کننده مقدار روی قابل دسترس برای گیاه است (۵۷). دلایل عمده کمبود عنصر روی در ایران آهکی بودن خاک‌ها، pH زیاد در این خاک‌ها، استفاده زیاد کودهای فسفاته و غلظت بالای بی-

کربنات در آب آبیاری و عدم استفاده از عناصر کم مصرف به خصوص روی است (۴۱). زمانی که تأمین عنصر روی مورد نیاز در گیاه به خوبی انجام نگیرد، میزان محصول کاهش خواهد یافت و علاوه بر این کیفیت محصولات کاهش می‌یابد. جذب عناصر از خاک توسط گیاهان به گونه کل و محلول عنصر مورد نظر و توانایی بخش جامد خاک در آزادسازی عنصر به درون محلول خاک بستگی دارد (۹). قابلیت دسترسی عنصر برای گیاهان به طور قابل توجهی توسط ویژگی‌های خاک به ویژه پراکندگی عنصر در میان گونه‌های مختلف آن تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همه شکل‌های روی موجود در خاک از قابلیت دسترسی و پویایی مشابهی برخوردار نیستند (۲). بوستانی (۲۰۱۷) در بررسی اثر کودهای گاوی و مرغی و بیوجار حاصل از آنها بر توزیع شکل‌های شیمیایی روی در یک خاک آهکی گزارش کردند همبستگی مثبت و معنا-داری بین روی استخراج شده با DTPA پس از کشت گیاه ذرت با شکل‌های محلول و تبادلی، کربناتی، اکسیدهای آهن بی شکل و کریستالی روی وجود دارد (۱۲). آنها این چهار شکل از روی منبع بالقوه تأمین روی مورد نیاز گیاه ذرت بیان کردند. بیوجار می‌تواند باعث افزایش روی در بخش تبادلی و آلی خاک شود. از عوامل موثر بر افزایش بخش تبادلی و آلی روی، آزادسازی روی و ترکیبات آلی از تیمارهای بیوجار و ترکیبات حاصل از تجزیه آنها می‌باشد که علاوه بر اثر مستقیم از طریق تشکیل کمپلکس با فلز می‌تواند به صورت غیرمستقیم و از طریق کاهش pH خاک باشد. در واقع کاهش pH خاک و فرآیند متحرک شدن سبب شده تا روی از شکل‌های با قابلیت تحرک کمتر به شکل‌های با قابلیت تحرک بیشتر انتقال پیدا کند (۵۲).

جدول (۷) ضرایب همبستگی (r) بین مقادیر روی استخراج شده با عصاره گیر DTPA با پارامترهای گیاهی
 Table (7) Correlation coefficients (r) between extracted Zn by DTPA with plant parameters

parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1- کلروفیل A Choloropyll a	1								
2- کلروفیل b Choloropyll b	0.81*	1							
3- کلروفیل کل Total Choloropyll	0.91**	0.97**	1						
4- کاروتنوئید Cartenoeid	0.94**	0.91**	0.96**	1					
5- غلظت روی در مرحله پرچم Zn concentration in flag leaf emergence stage	0.95**	0.91**	0.96**	0.99**	1				
6- غلظت روی در مرحله برداشت Zinc concentration at seed maturity stage	0.91**	0.90**	0.95**	0.97**	0.96**	1			
7- جذب روی در مرحله پرچم Zn Uptake in the flag leaf emergence stage	0.96**	0.90**	0.96**	0.98**	0.98**	0.95**	1		
8- جذب روی در مرحله برداشت Zn Uptake in seed maturity stage	0.90**	0.91**	0.95**	0.96**	0.96**	0.99**	0.95**	1	
9- روی استخراج شده با DTPA Zn extracted with DTPA	0.87**	0.81**	0.87**	0.89**	0.91**	0.87**	0.90**	0.86**	1

ns, **, * و * به ترتیب غیر معناداری و معناداری در سطح احتمال یک و پنج درصد می باشد.

ns, * and ** are non-significant, significant $P \leq 0.05$ and $P \leq 0.01$, respectively

غلظت و جذب روی از تیمار پلت بیوچار پیش گرماکافت با ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم روی همراه با محلول پاشی بدست آمد. با توجه به این نکته که بیوچار مواد اولیه زیست توده ها از نظر عناصر مغذی به عنوان کود، دارای کمبود عناصر غذایی هستند در نتیجه تهیه پلت بیوچار غنی از روی به روش های پس و پیش گرماکافت می تواند آنها را به عنوان یک حامل مواد مغذی مفید برای بهبود مقدار روی در خاک و گیاه گندم تبدیل کند.

نتیجه گیری

در این پژوهش، نتایج حاکی از تأثیر مثبت افزودن پلت بیوچارهای بدست آمده به دو روش پس-پیش گرماکافت به تنهایی و همراه با محلول پاشی سولفات روی بر زیست فراهمی روی در گیاه گندم است. در این پژوهش تمامی ویژگی های مورد بررسی بجز کاروتنوئید در سطح یک درصد معنادار شدند. مقایسه میانگین اثر تیمارهای مورد بررسی نشان داد بیشترین مقدار صفات فیزیولوژیک و

References

1. Abbas, T., Rizwan, M., Ali, S., Zia-ur-Rehman, M., Qayyum, M.F., Abbas, F., Hannan, F., Rinklebe, J., and Ok, Y.S. 2017. Effect of biochar on cadmium bioavailability and uptake in wheat (*Triticumaestivum* L.) grown in a soil with aged contamination. *Journal of Ecotoxicology and Environmental Safety*,140: 37-47.
2. Abdollahi, A., Norouzi-Masir, M., Taghavi, M., and Moezzi, A. 2019. Effect of zinc oxide nanoparticles on zinc chemical forms in soil solution phase and its correlation with concentration and uptake of zinc in wheat. *Journal of Applied Soil Research*, 7(4): 35-46. (In Persian with English abstract)
3. Adejumo, S.A., Owolabi, M.O., and Odesola, I.F. 2016. Agro-physiologic effects of compost and biochar produced at different temperatures on growth, photosynthetic pigment and micronutrients uptake of maize crop. *African Journal of Agricultural Research*, 11(8): 661-673.
4. Afyuni, M., Khoshgoftarmanesh, A.H., Dorostkar, Schulin, R., Chaney, R.L., and Daneshbakhsh, B. 2010. Micronutrient-efficient genotypes for crop yield and nutritional quality in sustainable agriculture. *Journal of Agronomy Sustainale*, 30: 83-107.
5. Aghaee, A., Shahabivand, S., Athari, M., and Nasiri, Y. 2022. The effect of foliar application of zinc oxide and zinc nanoparticles on growth, photosynthetic pigments and essential oil compounds of green basil. *Journal of Plant Research Journal*, 35(2): 218-231.(In Persian)
6. Ahmad, S., Mfarrej, M. F. B., El-Esawi, M. A., Waseem, M., Alatawi, A., and Nafees, M. 2022. Chromium-resistant *Staphylococcus aureus* alleviates chromium toxicity by developing synergistic relationships with zinc oxide nanoparticles in wheat. *Journal Ecotoxicol Environ Safety*, 230: 113-142.
7. Alloway, B. J. 2008. *Zinc in Soils and Crop Nutrition*. Second edition, published by IZA and IFA Brussels, Belgium and Paris, France.
8. Arnon, D. I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Poly phenol oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24: 1_15.
9. Backes, C.A., McLaren, R.G., Rate A.W., and Swift, R.S. 1995. Kinetics of cadmium and cobalt desorption from iron and manganese oxides. *Journal of Soil Science Society of America*, 59(3): 778-785.
10. Bazi Abdoli, M., Barani Motlagh, M., Bostani, A., and Nazari, T. 2023. Acid-modified Biochar Effect on Some Physiological Indicators and Micronutrient Availability of Quinoa (cv. Gizavan) in a Calcareous Soil. *Journal of Water and Soil*, 37(4): 589-602. (In Persian with English abstract)
11. Benton, J., and Case, V.W. 1990. Sampling, handling and analyzing plant tissue samples. In: Westerman, R. L. (Ed.). *Soil testing and plant analysis*. 3rd Ed. Book series No. 3. Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI., USA. pp. 389-428.
12. Boostani, H. R. 2017. Effect of organic manures, their biochars and arbuscular mycorrhizae fungi on distribution of zinc chemical fractions in a calcareous soil. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(5): 49-71. (In Persian with English abstract)
13. Boostani, H.R., Chorom, M., Moezzi, A., Karimian, N., and Enayatizamir, N. 2017. Effect of Salinity and Organic Matter on Distribution of Zinc Chemical Forms in a Calcareous Soil after Maize Cultivation. *Journal of Water and Soil Science*, 27(1): 1-10. (In Persian).
14. Boostani, H.R., Chorom, M., Moezzi, A., Karimian, N., Enayatizamir, N., and Zarei, M. 2016. Effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) and arbuscular mycorrhizae fungi (AMF) application on distribution of zinc chemical forms in a calcareous soil with different levels of salinity. *Journal of Soil Management and Sustainabl Production*, 6(1): 1-24. (In Persian with English abstract).

15. Chereskin, B.M., and Castelfrance, P.A. 1982. Effects of iron and oxygen on chlorophyll biosynthesis II. Observation on the biosynthetic pathway in isolated detio-chloroplasts. *Journal of Plant Physiology*, 68:112-116.
16. Cui, X., Lu, M., Bila Khan, M., Lai, C., Yang, X., He, Z., Chen, G., and Yan, B. 2020. Hydrothermal carbonization of different wetland biomass wastes: Phosphorus reclamation and hydrochar production. *Journal of Waste Management*, 102: 106-113.
17. Dong, D., Wang, C., Van Zwieten, L., Wang, H., Jiang, P., Zhou, M., and Wu, W. 2019. An effective biochar-based slow-release fertilizer for reducing nitrogen loss in paddy fields. *Journal of Soils and Sediments*, 20: 3027–3040.
18. Dotaniya, M.L., and Meena, V.D. 2015. Rhizosphere effect on nutrient availability in soil and its uptake by plants: a review. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 85(1):1-12.
19. Ebrahimi, Z., Biabani, A., Mohammadi, R., Sabouri, H., and Rahemi -Karizaki, A. 2021. Effect of wheat Enrichment by Foliar Application of Zinc and Iron on Quantitive and Qualitative Traits at Differnt Phenological Stages. *Jornal of crop breeding*, 13(38): 138-148. (In Persian with English abstract)
20. Enders, A., Hanley, K., Whitman, T., Joseph, S., and Lehmann, J. 2012. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Journal of Bioresour Technol*, 114: 644–653.
21. Fang, J., Zhan, L., Ok, Y.S., and Gao, B. 2018. Minireview of potential applications of hydrochar derived from hydrothermal carbonization of biomass. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 57: 15-21
22. FAO .2014. Core production data base, electronic resource under. P.
23. Faryadi - Shahgoli, M., Reyhanitabar, A., Najafi, N., and OUstan, Sh. 2021. The effect of biochar on concentration of DTPA-extractable zinc from acidic and alkaline soils in one year incubation period. *Journal of Soil Management and Sustainable*, 11(3):29-52. (In Persian with English abstract)
24. Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., and Johnston, M. 2011. Solutions for a cultivated planet. *Journal of Nature*, 478(7369): 337–342.
25. Gartler, J., Robinson, B., Burton, K., and Clucas, L. 2013. Carbonaceous soil amendments to biofortify crop plants with zinc. *Journal of Science Total Environment*, 465: 308–313.
26. Ghafari, H., and Razmjoo, J. 2015. Response of Durum wheat to foliar application of varied sources and rates of iron fertilizers. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17: 321 -331
27. Glaser, B., Wiedner, K., Seelig, S., Schmidt, H. P., and Gerber, H. 2015. Biochar organic fertilizers from natural resources as substitute for mineral fertilizers. *Journal of Agronomy for Sustainable Development*, 35: 667-678.
28. Gwenzi, w., Nyambishi, T.J., Chaukura, N., and Mapope, N. 2017. Synthesis and nutrient release patterns of a biochar-based N–P–Kslow-release fertilizer. *International journal of environmental science and technology*, 15:405-411.
29. Harter, R.D., and Naidu, R. 1995. Role of metal-organic complexation in metal sorption by soils. *Journal of Advances in Agronomy*, 55: 219-263.
30. Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M., and Enayatizamir, N. 2019. Chemical fractions and availability of Zn in a calcareous soil in response to biochar amendments. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19: 851-864.

31. Karimi, A., Moezzi, A.A., Chorom, M., and Enayatizamir N. 2020. Influence of Sugarcane bagasse biochar on nutrition availability and biological properties of a calcareous soil. *Journal of Applied Soil Research*, 8(1):1-17. (In Persian with English abstract)
32. Khallizadeh, J., Dordipour, E., Baranimotlagh, M., and Gharanjiki, A. 2020. Effect of iron impregnated wheat straw and particleboard biochar on the iron uptake and growth of two soybean cultivars in a calcareous soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 10: 83-100.
33. Kong, X.R., Liu, Y.X., Pi, J.C., Li, W.H., Liao, Q.H.G., and Shang, J.G. 2017. Low-cost magnetic herbal biochar: characterization and application for antibiotic removal. *Journal of Environmental Science and Pollution Research*, 24(7): 6679-6687.
34. Koushki, A., Alinejadian-Bidabadi, A., and Maleki, A. 2021. Effects of rice husk biochar and different irrigation regimes on growth, essential oil percentage, and concentration of some nutrients in peppermint (*Mentha piperita L.*), *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 37(5):733-752. (In Persian with English abstract)
35. Lehmann, J. 2007. Bio-Energy in the Black. *Journal of Frontiers in Ecology and the Environment*, 5:381–387
36. Lestan, D., Luo, C.L., and Li, X.D. 2008. The use of chelating agents in the remediation of metal-contaminated soils: a review. *Journal of Environmental Pollution*, 153: 3-13.
37. Li, C., Zhang, L., Gao, Y., and Li, A. 2018. Facile synthesis of nano ZnO/ZnS modified biochar by directly pyrolyzing of zinc contaminated corn stover for Pb (II), Cu (II) and Cr (VI) removals. *Journal of Waste Management*, 79: 625-637.
38. Li, H., Shen, J., Zhang, F., Clairotte, M., Drevon, J.J., Le Cadre, E., and Hinsinger P. 2008. Dynamics of phosphorus fractions in the rhizosphere of common bean (*Phaseolus vulgaris L.*) and durum wheat (*Triticum turgidum durum L.*) grown in monocropping and intercropping systems. *Journal of Plant and Soil*, 312(12):139-150.
39. Lindsay, W. L. and Norvell, W. A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Journal of Soil Science Society of America*, 42(3): 421-428.
40. Lindsay, W.L. 1979. *Chemical Equilibria in Soils*. 1st Ed. John Wiley and Sons Limited, 449p.
41. Malakouti, M. J. 2007. Zinc is a neglected element in the life cycle of plants. *Middle Eastern and Russian Journal of Plant Science and Biotechnology*, 1(1): 1-12.
42. Malakouti, M.J. 2015. Recommendation for Optimal fertilizer use in agricultural Crops of Iran. 3rd Edition. Publication of Tarbiat Modares University. Pp:103: 265-267.
43. Manikandan, A., and Subramanian, K.S. 2013. Urea intercalated biochar –a slow release fertilizer production and characterisation. *Indian Journal of Science and Technology*, 6(12): 5579–5584.
44. Meng, R., Chen, T., Zhang, Y., Lu, W., Liu, Y., Lu, T., Liu, Y. and Wang, H. 2018. Development, modification, and application of low-cost and available biochar derived from corn straw for the removal of vanadium (v) from aqueous solution and real contaminated groundwater. *Journal of Royal Society of chemistry*, 8(38): 21480-21494.
45. Meng, R., Chen, T., Zhang, Y., Lu, W., Liu, Y., Lu, T., Liu, Y. and Wang, H. 2018. Development, modification, and application of low-cost and available biochar derived from corn straw for the removal of vanadium (v) from aqueous solution and real contaminated groundwater. *Journal of Royal society chemistry*, 8(38): 21480-21494.
46. Mishra, V., Mishra, R. K., Dikshit, A., and Pandey, A. C. 2014. Interactions of nanoparticles with plants: An emerging prospective in the agriculture industry. *Journal of In Emerging technologies and management of crop stress tolerance*, 159–180.

47. Mortvedt, J.J. 1985. Plant uptake of heavy metals in zinc fertilizers made from industrial byproducts. *Journal of Environmental Quality*, 14(3): 424-427.
48. Motaghian, H. R., Hosseinpour, A., Raeisie, F. and Mohamadi, J. 2017. Assessment of several extractants for the determination of zinc bioavailability to Wheat (*Triticum aestivum* L.) in calcareous soils amended and unamended with sewage sludge. *Journal of Water and Soil Science*, 1:13-20. (In Persian with English abstract)
49. Murphy, J. and Riley, J.P.1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica chimica acta*, 27: 31-36.
50. Nazari, T., Barani Motlagh, M., Dordipour, E., Ghorbani Nasrabadi, R., and Sefidgar-Shahkolaie, S. 2018. Effect of Humic Acid Application Method on Bioavailability of Iron in Canola. *Journal of Water and Soil Science*, 28(4):109-125. (In Persian with English abstract).
51. Nelson, D. W. and Sommers, L.E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5: 961-1010.
52. Norouzi, M., Khoshgoftarmanesh, A. H., and Afyuni, M. 2015. Influence of Some Organic Fertilizers on Chemical Forms of Zinc in Soil Solid Phase in Relation to Zinc Uptake in Wheat. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*,18(70):81-90. (In Persian with English abstract)
53. Olsen, S.R. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *United States Department of Agriculture; Washington*. (No.939).
54. Page, A.L., Miller, R.H., and Keeney, D.R.1982. *Methods of Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological properties*. 2nd ed. ASA. Madison, WI, USA.
55. Parkash, V., and Singh, S. 2020. Potential of biochar application to mitigate salinity stress in eggplant. *Journal of Hortscience*, 55(12):1946–1955.
56. Peiris, C., Nayanathara, O., M. Navarathna, C., Jayawardhana, Y., Nawalage, S., Burk, G., G. Karunanayake, A., B. Madduri, S., Vithanage, M., Kaumal, M., Mlsna, T., Hassan, E., Abeysundara, S., Ferez, F., and Gunatilake, S. 2019. The influence of three acid modifications on the physicochemical characteristics of tea-waste biochar pyrolyzed at different temperatures: a comparative study. *Journal of The Royal Society of Chemistry*, 9:17612-17622.
57. Rahmanian, M., and Hosseinpour A.R. 2018. Comparison of several chemical extracts for the determination of Zinc bioavailability to Sunflower heavy metal-contaminated calcareous soils. *Journal of Environment and Water Engineering*, 4(2): 148 – 157.
58. Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A.R., and Lehman, j.2012. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Journal of Biology and fertility of soils*, 48: 271-284.
59. Rengel, Z. 2015. Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(2):397-409.
60. Rose, M.T., Perkins, E.L., Saha, B.K., Tang, E.C., Cavagnaro, T.R., Jackson, W.R., Hapgood, K., Hoadley, A.F.A., and Patti, A.F. 2016. A slow release nitrogen fertiliser produced by simultaneous granulation and superheated steam drying of urea with brown coal. *Journal of Chemical and biological technologies in agriculture*, 3: 1–14.
61. Saha, B.K., Rose, M.T., Wong, V.N.L., Cavagnaro, T.R., and Patti, A.F. 2019. A slow release brown coal-urea fertiliser reduced gaseous N loss from soil and increased silver beet yield and N uptake. *Journal of Science of the total environment*, 649: 793–800.

62. Saravanan, V.S., Subramoniam, S.R., and Ra, S.A. 2003. Assessing in vitro solubilization potential of different zinc solubilizing bacterial (zsb) isolates. *Braz. Journal of Microbiology*, 34: 121-125
63. Shahbazi, N., Ardakani, M. R., and Ghafourian, H. 2023. Evaluate Quantitative Yield of Spinach (*Spinacia oleracea* L.) in Biochar and Mycorrhiza Levels under Greenhouse Conditions, *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(2): 99-112. (In Persian with English abstract)
64. Soltanpour, P. N., and Schwab, A. P. 1977. A new soil test for simultaneous extraction of macro- and micro-nutrients in alkaline soils. *Journal of Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 8(3):195-207.
65. Szymanecka-Mikos, M., Schab, S., Rusek, P., Borowik, K., Bogusz, P., and Wyzinska, M. 2019. Preliminary Study of a Method for Obtaining Brown Coal and Biochar Based Granular Compound Fertilizer. *Journal of Waste and Biomass Valorization*, 10: 3673-3685
66. Teutscherova, N., Vazquez, E., Santana, D., Navas, M., Masaguer, A., and Benito, M. 2017. Influence of pruning waste compost maturity and biochar on C dynamics in acid soil: Incubation study. *European Journal of Soil*, 78: 66–74.
67. Tomczyk, A., Sokołowska, Z., and Boguta, P. 2020. Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Journal of Environmental Science and Biotechnology*, 19: 191–215.
68. Van Bavel, J. 2013. The world population explosion: causes, backgrounds and projections for the future. *Journal of Facts views Vision ObGyn*, 5 (4):281.
69. Wang, C., Sun, R., and Huang, R. 2021. Highly dispersed iron-doped biochar derived from sawdust for Fenton-like degradation of toxic dyes. *Journal of Cleaner Production*, 297:126681.
70. Ye, Z., Zhang, L., Huang, Q., and Tan, Z. 2019. Development of a carbon-based slow release fertilizer treated by biooil coating and study on its feedback effect on farmland application. *Journal of Cleaner Production*, 239:118085.