Effect of Sugarcane Bagasse Biochar on Accumulation and Distribution of Nitrogen, Phosphorus, Root Characteristics and Wheat Grain Yield in Soils Contaminated with Lead and Nickel

Sh.Tokhmehchian, S. K.Marashi*, and T.Babaei Nejad

MSc, Department of Agronomy, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. sh_t1352@yahoo.com
Associate Professor, Department of Agronomy, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. marashi_47@yahoo.com
Assistant Professor, Department of Soil Science, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. timoorba@yahoo.com

«Research Article»
Received: July 20, 2024 and Accepted: January 15, 2025

Abstract

One of the main problems of contaminated soils is the presence of high amounts of heavy and toxic elements, especially lead and nickel, which leads to disruption in the growth and reduction of plant yield. The use of biochar has been proposed as one of the solutions to solve this problem. The purpose of this study was to investigate the effect of sugarcane biochar on accumulation and distribution of nitrogen and phosphorus absorption, root growth, and wheat grain yield in soils contaminated with lead and nickel. This experiment was carried out using factorial design in a completely randomized layout. The studied factors included the amounts of sugarcane biochar in four levels including: zero (control), 2%, 4%, and 6% of soil weight and the type of soil in two levels: contaminated and non-contaminated by lead and nickel. In this experiment, the maximum and minimum nitrogen and phosphorus absorbed in the root, stem, and grain of the plant were observed in contaminated and non-contaminated soil conditions, respectively. Also, with the increase in the use of biochar, there were changes in the accumulation of these elements in order to create suitable conditions for the plant, which subsequently had a significant effect on improving root growth and increasing grain yield. The maximum and minimum grain yield were observed in non-contaminated and contaminated soils, respectively and with increasing biochar consumption, grain yield increased in both contaminated and non- contaminated soils and this increase continued up to 4% biochar. In general, the results of the experiment showed that in the soil contaminated and non-contaminated with lead and nickel, the use of sugarcane bagasse biochar has an effective role in the accumulation of nitrogen and phosphorus in the plant, and to improve yield, the use of biochar up to 4% in the contaminated and non-contaminated soils is recommended.

Keywords: Absorption of elements, Environmental pollution, Heavy metals, Wheat yield.

*- Corresponding author's email: marashi_47@yahoo.com

پژوهش‌های خاک / الف / جلد ۳۸ / شماره۳ پاییز/ ۱۴۰۳/ ۳۰۵-۳۱۴
https://doi.org/ 10.22092/IJSR.2025.366406.754

اثر زغال زیستی باگاس نیشکر بر تجمع و توزیع نیتروژن، فسفر، ویژگی‌های ریشه و عملکرد گندم در خاک‌های آلوده به سرب و نیکل

شهیاد تخمه چیان، سید کیوان مرعشی* و تیمور بابایی نژاد

کارشناسی ارشد، گروه زراعت، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.sh_t1352@yahoo.com

دانشیار، گروه زراعت، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.marashi_47@yahoo.com

استادیار، گروه خاکشناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.timoorba@yahoo.com

« مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۳/۴/۳۰ و پذیرش:۱۴۰۳/۱۰/۲۹

چکیده

از مشکلات اصلی خاک‌های آلوده وجود مقادیر بالای عناصرسنگین و سمی به¬ویژه سرب و نیکل می¬باشد که منجر به اختلال در رشد و کاهش عملکرد گیاهان می‌گردد. استفاده از زغال زیستی به عنوان یکی از راه حل¬ها برای رفع این مشکل پیشنهاد شده است. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر زغال زیستی نیشکر بر تجمع و توزیع نیتروژن، فسفر، رشد ریشه، و عملکرد دانه گندم در خاک‌های آلوده به سرب و نیکل بود. این آزمایش بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. فاکتورهای مورد مطالعه شامل مقادیر زغال زیستی نیشکر در چهار سطح شامل: صفر (شاهد)، ۲٪، ۴٪ و ۶٪ وزنی خاک، و نوع خاک در دو سطح آلوده و غیرآلوده به سرب و نیکل بود. در این آزمایش بیشترین و کمترین نیتروژن و فسفر ریشه، ساقه و دانه بترتیب در شرایط خاک آلوده و غیرآلوده مشاهده شد. همچنین با افزایش مصرف زغال زیستی تغییراتی در نحوه تجمع این عناصر در راستای ایجاد شرایط مناسب برای گیاه حاصل شد که متعاقب آن در بهبود رشد ریشه و افزایش عملکرد دانه تاثیر معنی‌دار داشت. بیشترین و کمترین عملکرد دانه بترتیب در خاک غیرآلوده و آلوده مشاهده شد و با افزایش مصرف زغال زیستی در خاک آلوده و غیر آلوده عملکرد دانه افزایش یافت و این افزایش تا سطح ۴٪ زغال زیستی ادامه یافت. بطور کلی نتایج آزمایش نشان داد که در شرایط خاک آلوده و غیر آلوده به سرب و نیکل، کاربرد زغال زیستی باگاس نیشکر در تجمع نیتروژن و فسفر در گیاه نقش موثری دارد و مصرف زغال زیستی تا سطح ۴٪در خاک‌های آلوده و غیر آلوده برای بهبود عملکرد پیشنهاد می شود.

واژه های کلیدی: آلودگی محیط زیست، جذب عناصر، عملکرد گندم، فلزات سنگین

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول:marashi_47@yahoo.com

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) از مهم‌ترین غلات تامین کننده نیاز غذایی انسان در کشورهای مختلف محسوب می‌شود (میت‌والی و همکاران، ۲۰۱۰). آلودگی و تخریب محیط زیست، از نتایج صنعتی شدن اجتماعات بشری است. در این خصوص آلودگی خاک به فلزات سنگین از جمله آلودگی‌هایی است که در سال‌های اخیر شدیداً مورد توجه قرار گرفته است(کاباتا پندیاس، ۲۰۰۱). مطالعات نشان می‌دهد که برخی از فلزات سنگین در غلظت‌های زیاد اثرات سمی بر گیاهان دارند(لی و همکاران، ۲۰۱۵). نیکل یکی از فلزات سنگین است که در غلظت‌های کم اثر سمی در گیاهان ندارد(بایکو و همکاران، ۲۰۰۶) ولی تجمع بیش از حد نیکل در ریشه و اندام‌های گیاهی منجر به سوختگی برگ، رشد ضعیف گیاه بروز ناهنجاری‌هایی در متابولیسم گیاهی و کاهش عملکرد میگردد(یانگ، ۱۹۹۶). همچنین بیان شده است که افزایش نیکل ممکن است منجر به علائم کمبود عناصر غذایی گردد، بطور مثال در شرایط افزایش نیکل جذب کلسیم، آهن، منگنز، منیزیم، فسفر و روی در گیاه کاهش می‌یابد(برون و دیتز، ۱۹۹۵). سرب ازجمله عناصر سنگین می‌باشد که به دلیل انباشت زیاد در بخش سطحی خاک، به راحتی در دسترس گیاهان قرار می‌گیرد و پس از جذب از طریق ریشه منجر به تغییر در فرایندهای متابولیکی گیاه و در نهایت اختلال در رشد و نمو گیاهان می‌گردد(قربانی و همکاران، ۱۳۹۵). محققان بیان کرده اندکه افزایش غلظت سرب منجر به ایجاد تنش اکسیداتیو در گیاه و بروز مشکلات جدی در امر کشاورزی از طریق کاهش محصول می‌گردد (شارما و دوبی، ۲۰۰۵). بیان شده است که گیاهان توانایی زیادی در جذب سرب از طریق ریشه‌ها دارند. سرب از طریق اختلال در فعالیت ناقل‌های غشای سلول‌های ریشه باعث کاهش جذب عناصر ضروری و ایجاد علائم کمبود در گیاهان می‌شود(قربانی و همکاران، ۱۳۹۵). مطالعات نشان می‌دهد که سرب و نیکل می‌توانند از طریق فاضلاب‌های شهری، حشره‌کش‌ها، کودها، آبیاری با هرز آب‌ها و صنایع ذوب فلزات وارد خاک‌ها شوند(یانگ و همکاران، ۲۰۰۴). بنابراین ارائه روشی نسبتاً سریع و مطمئن که آثار جنبی نامطلوب برای سلامت محیط زیست نداشته باشد جهت کاهش اثرات نامطلوب ناشی از جذب فلزات سنگین ضروری بنظر می‌رسد(گلچین و همکاران، ۲۰۰۶). در این میان زغال‌های زیستی[1] موادی آلی با تخلخل بالا می باشند که به دلیل دارا بودن گروه‌های عاملی فعال و فراوان در جذب سطحی فلزات سنگین به ویژه در محیط‌های آبی بسیار مؤثر می‌باشند(سوهی و همکاران، ۲۰۰۹). زغال‌های زیستی محصولات غنی از کربن هستند که تحت عملیات حرارتی با اکسیژن کم و یا در شرایط عدم وجود اکسیژن تهیه می‌شوند. کاربرد این مواد هم از لحاظ کشاورزی و هم از لحاظ زیست محیطی مفید می‌باشد(ماستو و همکاران، ۲۰۱۳). از دیگر خواص زغال‌های زیستی می‌توان به جلوگیری از آبشویی عناصر غذایی و افزایش بهره‌وری از کود، بهبود خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک و کاهش مقاومت کششی خاک و نفوذ بهتر ریشه اشاره نمود(کناولز و همکاران، ۲۰۱۱). در منطقه جنوب خوزستان به دلیل کشت نیشکر هر ساله مقادیری زیادی باگاس تولید می‌شود که به عنوان تولیدات جانبی محسوب شده و عمده آن به صورت ضایعات از بین می‌رود(حاجی شرفی و همکاران، ۱۳۹۵). این مواد می‌توانند در راستای تولید زغال زیستی و کاهش اثرات آلودگی خاک‌های ناشی از فلزات سنگین مورد استفاده قرار گیرند. لیو و همکاران(۲۰۱۸) گزارش کردند که زغال زیستی اثر مثبت و معنی‌داری بر جذب و کاهش مقادیر نیکل در خاک دارد و می‌توانند در بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک کمک کند. احمد و همکاران(۲۰۱۴) و موهان و همکاران(۲۰۱۶) اظهار کردند که زغال زیستی‌های تهیه شده از بقایای کشاورزی و جنگلی توانایی بسیار خوبی برای جذب عناصر سنگین دارند. دومر و همکاران(۲۰۱۶) در بررسی اثر زغال

1- Biochar

زیستی‌های به دست آمده از باگاس نیشکر، پسماند جنگل‌های اکالیپتوس، کرچک، پوسته نارگیل سبز بر جذب کادمیم، مس، سرب و روی بیان کردند که همه انواع زغال زیستی بکار برده شده تا حدود ۹۵ درصد آلودگی آب به فلزات سنگین را کاهش می‌دهند. بی‌ریا و همکاران(۱۳۹۶) اظهار کردند که کاربرد زغال زیستی نیشکر باعث کاهش غلظت کادمیوم و سرب در ریشه و اندام هوایی و افزایش کلروفیل، سطح برگ، ارتفاع گیاه و وزن خشک ریشه و اندام هوایی ذرت گردید. دیوبند هفشجانی و همکاران(۱۳۹۶) اعلام نمودند که زغال زیستی باگاس نیشکر با تیمار ۱۰ گرم بر کیلوگرم خاک بیشترین تاثیر را در افزایش ظرفیت تبادل آنیونی خاک و کمترین تاثیر را در کاهش اسیدیته خاک نشان داد.

با توجه به اینکه یکی از دلایل کاهش یا افزایش عملکرد دانه در شرایط آلودگی خاک در مقایسه با خاک غیر آلوده می‌تواند مربوط به نحوه تاثیر آلودگی بر جذب عناصر غذایی باشد. بر این اساس در این آزمایش نحوه تجمع و توزیع نیتروژن و فسفر در ریشه به عنوان اولین مرحله جذب، سپس ساقه و در نهایت دانه مورد بررسی قرار گرفته است. ضمنا با توجه به اهمیت زغال زیستی در کاهش آلودگی‌های زیست محیطی، نحوه تاثیر آن بر تجمع و توزیع عناصر غذایی و در نهایت بر رشد ریشه و عملکرد دانه مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق بصورت گلدانی در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ در مزرعه آموزشی و تحقیقاتی دانشگاه آزاد اسلامی اهواز با عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۲۷ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۶۵ دقیقه شرقی با ارتفاع ۱۷ متر از سطح دریا اجرا شد. آزمایش بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار اجرا شد. فاکتورهای مورد مطالعه شامل مقادیر مختلف زغال زیستی باگاس نیشکر در چهار سطح شامل: صفر (شاهد)، ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی خاک و آلودگی خاک در دو سطح خاک غیر آلوده و آلوده به سرب و نیکل بود. برای بررسی موارد فوق از خاک مزرعه منطقه مورد آزمایش از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری استفاده شد. خاک جمع آوری شده به دو قسمت تقسیم گردید. نیمی از آن به عنوان خاک غیر آلوده استفاده شد که خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

عمق (cm)	EC (dS/m)	pH	Pb (mg/kg)	Ni (mg/kg)	OC (%)	N (%)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Sand (%)	Silt %)	Clay (%)	بافت خاک
۳۰-۰	۴/۶	۷/۷۹	۲۲/۱۶	۳۸/۵	۰/۴۸	۰/۰۵	۵/۲	۱۸۱	۱۶	۳۵	۴۹	رسی

نیمه دوم آن به منظور تهیه خاک آلوده به سرب و نیکل مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور مقادیری از نمک نیکل(نیترات نیکل) و سرب(نیترات سرب) جهت آلوده سازی بر اساس وزن خاک محاسبه گردید. محاسبه مقادیر سرب و نیکل، براساس مقادیر بیشتر از استاندارد آلایندگی اراضی کشاورزی به ترتیب به میزان ۵۰۰ و ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم در نظر گرفته شد(سلیمانی امین آبادی، ۱۳۸۲). به عبارت دیگر مقادیر سرب و نیکل اضافه شده به خاک به گونه ای در نظر گرفته شد که بعد از آلودگی مقادیر آنها در خاک بترتیب معادل ۵۰۰ و ۲۵۰ میلی گرم در کیلوگرم گردد. مقادیر نمک محاسبه شده پس از حل کردن در آب، بوسیله یک سمپاش بطور یکنواخت به خاک اضافه و خاک آلوده شده به گلدان‌هایی با ارتفاع ۵۰ و قطر ۲۰ سانتی‌متر اضافه شد. سپس جهت دوره انکوباسیون و تکامل یافتن واکنش‌های آلاینده خاک، به مدت دو هفته در شرایط رطوبتی ظرفیت زراعی نگهداری شدند (کریمی، ۱۳۸۷). برای تولید زغال زیستی از باگاس نیشکر استفاده شد. بدین منظور باگاس

نیشکر پس از خشک کردن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. سپس بصورت فشرده در محفظه فلزی در بسته گرمادهی اولیه به مدت دو ساعت اعمال و سپس محفظه‌ها به درون کوره دست‌ساز در شرایط بدون اکسیژن به مدت سه ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس، تحت فرآیند گرماکافت آهسته قرار داده شد. بعد از سرد شدن کوره، محتویات آن تخلیه و پس از شستشو با آب و خشک نمودن، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد (راجکوویچ و همکاران، ۲۰۱۱). در این آزمایش از گلدان‌هایی با ارتفاع ۵۰ و قطر ۲۵ سانتی‌متر استفاده شد. وزن خاک در هر گلدان ۱۰ کیلوگرم و از گندم رقم چمران-۲ استفاده شد. در هر گلدان ۱۰ بذر کشت شد که پس از سبزشدن در مرحله سه برگی به تعداد ۵ بوته تنک شدند. میزان نیتروژن و فسفر ریشه، ساقه و دانه در زمان برداشت نهایی اندازه گیری شد. درصد نیتروژن به روش کجدال اندازه‌گیری شد. برای تعیین فسفر از روش رنگ‌سنجی با دستگاه اسپکتروفتومتر با طول موج ۴۷۰ نانومتر (غازان‌شاهی، ۱۳۸۵) استفاده شد. جهت تعیین ماده خشک ریشه، از ۳ گلدان در مرحله گلدهی نمونه‌برداری شد. بدین صورت که گلدان را شکافته و به آرامی خاک را از ریشه ۵ بوته جدا کرده و پس از شستشو در آزمایشگاه از طریق خشک کردن در آون در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت تعیین گردید (فتحی و چرم، ۲۰۱۳). عملکرد دانه ازطریق برداشت ۳ گلدان برای هر تیمار و خرمن‌کوبی آنها تعیین شد. نتایج بدست آمده با استفاده از برنامه آماری SAS و مقایسه میانگین تیمارها به روش دانکن در سطح احتمال پنج درصد تجزیه و تحلیل شد.

نتایج و بحث

نیتروژن

در این آزمایش اثر نوع خاک بر نیتروژن ساقه و دانه، اثر زغال زیستی بر نیتروژن دانه و اثر متقابل نوع خاک و زغال زیستی در ریشه، ساقه و دانه معنی‌دار بود(جدول ۲). نتایج مقایسات میانگین اثر متقابل نوع خاک و زغال زیستی نشان داد که بیشترین درصد نیتروژن در بخش‌های مختلف گیاه در خاک آلوده و کمترین مقدار در خاک غیر آلوده حاصل شد(جدول ۲). همچنین نتایج نشان داد که در خاک آلوده با افزایش درصد زغال زیستی، درصد نیتروژن کاهش ولی در خاک غیر آلوده افزایش یافت(جدول ۳). نتایج تحقیقات نشان می‌دهد در خاک‌های آلوده به نیکل هنگامی که از اوره به عنوان منبع نیتروژن استفاده می‌شود، غلظت نیتروژن کل گیاه بیشتر بوده است(طباطبایی، ۲۰۰۹؛ سوهی و همکاران، ۲۰۰۹) که با نتایج این تحقیق مطابقت داشت. پالاسیوس و همکاران(۱۹۹۸) نیز در بررسی اثر نیکل بر گوجه فرنگی مشاهده نمودند که بین نیتروژن و نیکل رابطه هم افزایی وجود دارد و کاربرد نیکل سبب افزایش غلظت نیتروژن کل گیاه شد. مطالعات همچنین نشان می‌دهد که افزودن زغال زیستی به دلیل سطح ویژه زیاد و تراکم بار سطحی بالا، در نگه‌داری عناصر غذایی و کاهش شستشوی آنها و همچنین در افزایش آب قابل استفاده موثر می‌باشند(لیانگ و همکاران، ۲۰۰۶؛ لایرد و همکاران، ۲۰۱۰) که با نتایج این تحقیق در خصوص افزایش درصد نیتروژن گیاه در خاک‌های غیرآلوده در شرایط کاربرد زغال زیستی مطابقت داشت.

فسفر

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که اثر نوع خاک بر فسفر دانه، اثر زغال زیستی بر فسفر ریشه و دانه و اثر متقابل نوع خاک و زغال زیستی بر فسفر ریشه، ساقه و دانه از نظر آماری معنی‌دار بود(جدول ۲). نتایج مقایسات میانگین نشان داد که بیشترین فسفر دانه در خاک آلوده و کمترین آن در خاک غیر آلوده مشاهده شد (جدول ۳). به نظر می‌رسد عناصر سنگین سرب و نیکل باعث افزایش فسفر قابل جذب توسط گیاه شده باشند(شعیبی نوبریان و همکاران ،۱۳۹۱). نتایج همچنین نشان داد که در خاک‌های‌آلوده و غیر آلوده با افزایش

کاربرد زغال زیستی، غلظت فسفر در اندام‌های مختلف گیاه کاهش یافت (جدول ۳). بیان شده است که جذب عناصر غذایی تابع دو عامل رشد سیستم ریشه‌ای گیاه و فراهمی عناصر غذایی در خاک می‌باشد(دیوبند هفشجانی و همکاران، ۱۳۹۶). در این آزمایش به نظر می‌رسد که زغال زیستی با جذب عناصر ضروری خاک، مانع از دسترسی گیاه به این فسفر شده است (موسوی و همکاران، ۱۴۰۲)، به طوری که با افزایش کاربرد زغال زیستی، غلظت فسفر در ریشه و دانه گندم نیز به طور معنی‌داری کاهش یافت. در این خصوص تیس و ریلیگ(۲۰۰۹) نیز بیان کردند که کاربرد بیوچار در خاک می‌تواند قابلیت دسترسی فسفر به دلیل نگهداشت این عناصر در خاک را تحت تأثیر قرار دهد.

جدول ۲ - نتایج تجزیه واریانس اثر نوع خاک و زغال زیستی باگاس نیشکر بر تجمع و توزیع نیتروژن، فسفر، ماده خشک ریشه و عملکرد دانه گندم

منابع تغییرات	درجه آزادی	نیتروژن			فسفر			ماده خشک ریشه	عملکرد دانه
		ریشه	ساقه	دانه	ریشه	ساقه	دانه		
نوع خاک	۱	۰/۰۱۲۱۵ ns	۰/۱۰۵۳۴ **	۱/۳۶۸ **	۰/۰۰۰۴ ns	۰/۰۱۶۰۲ ns	۰/۲۶۸ **	۲/۳۴۴ *	۱۹۵/۴۵**
زغال زیستی	۳	۰/۰۰۹۰۵ ns	۰/۰۳۱۲۴ ns	۰/۲۲۹ **	۰/۱۲۱ **	۰/۰۱۰۰۳ ns	۰/۱۲۹**	۹/۵۲۸ *	۹۰/۷۰*
نوع خاک × زغال زیستی	۳	۰/۰۶۰۲۵ **	۰/۱۰۰۳ **	۰/۴۵۸**	۰/۰۶۳ **	۰/۱۳۴ **	۰/۰۳۸ *	۱/۱۷۲ *	۵۴/۸۰**
خطای آزمایش	۱۶	۰/۰۱۰۰۰	۰/۰۱۰۲۶	۰/۰۱۳۰۲	۰/۰۱۰۰۰	۰/۰۱۰۵۳	۰/۰۱۰۵۸	۶/۶۳۳	۴۷/۹۰
ضریب تغییرات (٪)		۸/۷۸	۹/۱۶	۶/۵۱	۸/۳۸	۵/۰۹	۸/۱۵	۱۵/۳۳	۱۰/۹۵

**: معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

*: معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد

ns: عدم معنی‌داری

جدول ۳ – نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل نوع خاک و زغال زیستی باگاس نیشکر بر تجمع و توزیع نیتروژن، فسفر، ماده خشک ریشه و عملکرد دانه گندم

منابع تغییرات		نیتروژن (درصد)			فسفر (میلی‌گرم درکیلوگرم)			ماده خشک ریشه (گرم در گلدان)	عملکرد دانه (گرم درگلدان)
نوع خاک	زغال زیستی	ریشه	ساقه	دانه	ریشه	ساقه	دانه	دانه	
آلوده	صفر درصد	۰/۸۱ a	۰/۸۷ a	۲/۴۶ a	۰/۶۷ a	۰/۶۶ a	۱/۷۹ a	۵/۷۱ c	۲۵/۴۱ g
	۲ درصد	۰/۷۱ b	۰/۸۶ a	۲/۴۱ a	۰/۶۶ a	۰/۴۷ b	۱/۵۱ b	۵/۸۰ c	۲۸/۸۵ ef
	۴ درصد	۰/۶۳ bcd	۰/۵۸ bcd	۲/۲۶ ab	۰/۴۶ cd	۰/۳۷ c	۱/۳۱ cd	۸/۳۴ a	۳۲/۸۹ abc
	۶ درصد	۰/۵۷ c	۰/۵۲ cd	۲/۰۰ b	۰/۱۹ e	۰/۳۶ cd	۱/۳۲ cd	۵/۸۶ c	۳۰/۱۲ def
غیر آلوده	صفر درصد	۰/۵۳ cd	۰/۴۳ d	۱/۲۰ c	۰/۵۵ bc	۰/۵ b	۱/۳۵ c	۶/۰۷ bc	۳۱/۸۲ bcd
	۲ درصد	۰/۵۷ c	۰/۶۲ bc	۱/۲۰ c	۰/۵۹ b	۰/۳۱ d	۱/۳۱ cd	۷/۶۸ ab	۳۳/۱۳ ab
	۴ درصد	۰/۷۸ ab	۰/۵۹ bcd	۱/۸۰ bc	۰/۵ c	۰/۳۵ cd	۱/۱۸ de	۸/۹۴ a	۳۴/۴۱ a
	۶ درصد	۰/۶۶ bc	۰/۶۶ b	۲/۰۱ b	۰/۳۵ d	۰/۳۳ cd	۱/۲۴ d	۵/۸۷ c	۳۱/۰۸ bcde

اعدادی که درهرستون حداقل دارای یک حرف مشترک باشند اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد ندارند.

ماده خشک ریشه

نتایج آنالیز داده‌ها نشان داد که اثر نوع خاک، زغال زیستی و اثر متقابل آنها بر ماده خشک ریشه معنی‌دار بود(جدول ۲). نتایج مقایسات میانگین نشان داد که بیشترین ماده خشک ریشه در خاک غیر آلوده و کمترین آن در خاک آلوده وجود داشت(جدول ۳). در تحقیقات پیشین نیز بیان شده است که فلزات سنگین نیترات کادمیوم و سرب سبب کاهش وزن خشک ریشه شد(بلوچی و همکاران ۱۳۹۵) که با نتایج این مطالعه همخوانی داشت ضمنا این کاهش به بیشتر بودن این دو عنصر در ریشه و اختلال در فرآیندهای متابولیکی گیاه نسبت داده شده است (رمضانی و قاسمی، ۲۰۱۱). در این آزمایش با افزایش کاربرد زغال زیستی در خاک‌های آلوده و غیرآلوده تا سطح ۴ درصد وزن خشک ریشه افزایش و بعد از آن کاهش یافت(جدول ۳). برینان و همکاران (۲۰۱۴) اعلام نمودند که با کاربرد زغال زیستی، تراکم توده ریشه و طول ریشه در خاک افزایش یافت. رزاقی و رضایی(۱۳۹۶) دلیل این افزایش را به بهبود وضعیت فیزیکی خاک از لحاظ آب قابل دسترس، تخلخل، هدایت هیدرولیکی و ظرفیت تبادل کاتیونی نسبت به عدم کاربرد بیوچار نسبت دادند. قربانی و امیر احمدی(۱۳۹۷) نیز گزارش دادند که به کار بردن زغال زیستی در سطح ۴٪ تأثیر مثبتی بر افزایش طول ریشه نسبت به شاهد داشته است، اما این تأثیر به لحاظ آماری معنی‌دار نبود.

عملکرد دانه

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده ها نشان داد که اثر نوع خاک، زغال زیستی و اثر متقابل آنها بر عملکرد دانه از لحاظ آماری معنی‌دار بود (جدول ۲). بیشترین و کمترین عملکرد دانه بترتیب در خاک غیرآلوده و آلوده مشاهده شد(جدول ۳). نتایج مقایسات میانگین همچنین نشان داد که کاربرد زغال زیستی در خاک آلوده و غیر آلوده باعث افزایش عملکرد دانه شد و این افزایش تا سطح ۴٪ زغال زیستی ادامه داشت و از آن به بعد منجر به کاهش در عملکرد دانه گردید. راجکوویچ و همکاران(۲۰۱۲) نیز در یک مطالعه گلخانه‌ای بیان کردند که سطوح بالای مصرف زغال زیستی(۷٪) عملکرد ذرت را کاهش داد در حالیکه سطوح مصرف پایین تر(۵٪ و ۲٪) باعث افزایش عملکرد گردید که با نتایج حاصل از این تحقیق مطابقت داشت. این محققین علت عدم تأثیر زغال زیستی بر افزایش عملکرد را حاصلخیزی ذاتی خاک و کافی نبودن سطح مصرف زغال زیستی گزارش نمودند. از دلایل دیگر افزایش عملکرد دانه در شرایط افزایش کاربرد زغال زیستی در شرایط آلودگی خاک به نیکل را میتوان به اثر مثبت و معنی‌داری زغال زیستی بر جذب و کاهش مقادیر نیکل در خاک و بهبود خواص شیمیایی خاک نسبت داد(لیو و همکاران، ۲۰۱۸). رزاقی و رضایی(۱۳۹۶) در بررسی اثر سطوح مختلف زغال زیستی بر خواص فیزیکی خاک با بافت‌های مختلف نشان دادند که کاربرد زغال زیستی سبب بهبود وضعیت فیزیکی خاک با بافت‌های مختلف از لحاظ آب قابل دسترس، تخلخل، هدایت هیدرولیکی و ظرفیت تبادل کاتیونی نسبت به عدم کاربرد زغال زیستی گردید.و می تواند به عنوان یک اصلاح کننده در خاک‌های سنگین و سبک مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش نشان داد که در شرایط خاک آلوده به سرب و نیکل، تجمع و توزیع نیتروژن و فسفر در بخش‌های مختلف گیاه (ریشه، ساقه و دانه) افزایش معنی‌داری نسبت به نسبت به خاک غیر آلوده داشت و با افزایش مصرف زغال زیستی تغییراتی در نحوه تجمع این عناصر در راستای ایجاد شرایط مناسب برای گیاه حاصل شد که متعاقب آن در بهبود رشد ریشه و افزایش عملکرد دانه تاثیر معنی‌دار داشت. نتایج نشان داد که کاربرد زغال زیستی در خاک‌های غیر آلوده در بهبود شرایط رشدی ریشه و افزایش عملکرد دانه موثر می‌باشد. لذا در این آزمایش مصرف زغال زیستی تا سطح ۴ درصد در خاک‌های آلوده و غیر آلوده جهت بهبود عملکرد پیشنهاد می شود.

فهرست منابع

۱. بلوچی، ح. ر.، امینی، ف.، موحدی دهنوی، م. و عطار زاده، م. ۱۳۹۵. تأثیر بسترهای مختلف آلی بر رشد و اجزای عملکرد لوبیا چیتی تحت تنش فلزات سنگین. نشریه دانش کشاورزی و تولید پایدار، ۲۶(۲): ۵۷-۷۳

۲. بی‌ریا، م.، معزی، ع، ا. و عامری خواه، ه. ۱۳۹۶. تأثیر بیوچار باگاس نیشکر بر رشد گیاه ذرت در خاک آلوده به کادمیوم و سرب. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲: ۶۰۹-۶۲۶.

۳. حاجی شرفی، ح.، زارعی، ش.، ساکی نژاد، ط. و بیژن پور، ح. ۱۳۹۵. بررسی کاربرد کودهای آلی حاصل از باگاس و کمپوست‌های باگاس نیشکر به منظور افزایش مواد آلی خاک و کاهش مصرف کودهای شیمیایی در مزارع نیشکر (مطالعه موردی کشت و صنعت امیر کبیر). دومین همایش یافته‌های نوین در محیط زیست و اکو سیستم‌های کشاورزی، پژوهشکده انرژی های نو و محیط زیست دانشگاه تهران، تهران، ۱۲ صفحه.

۴. دیوبند هفشجانی، ل.، ناصری، ع.، هوشمند، ع.ل.، عباسی، ف. و سلطانی محمدی، ا. ۱۳۹۶. بررسی تاثیر کاربرد بیوچار باگاس نیشکر بر خصوصیات شیمیایی یک خاک لوم شنی. علوم و مهندسی آبیاری (مجله‌ی علمی- پژوهشی)، ۴۴(۱): ۶۴-۷۲.

۵. رزاقی، ف. و رضایی، ن. ۱۳۹۶. اثر سطوح مختلف بیوچار بر خواص فیزیکی خاک با بافت‌های مختلف. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۱(۱): ۷۶-۸۷.

۶. سلیمانی امین آبادی، م. ۱۳۸۲. پالایش خاک‌های آلوده به هدروکربن‌های نفتی و فلزات سنگین سرب و نیکل به وسیله گیاهان. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، صفحهٔ ۸۶ – ۵۶.

۷. شعیبی نوبریان، م، ر.، بستانی، ع. و افشاری بدرلو، ت. ۱۳۹۱. بررسی سرنوشت فسفر در خاک‌های آلوده به سرب. منتشر شده در ششمین همایش ملی مهندسی محیط زیست.

۸. غازان شاهی، ج. ۱۳۸۵. آنالیزخاک وگیاه. انتشارات آییژ، تهران، ۲۹۶ صفحه.

۹. قربانی، م. و امیراحمدی، ا. ۱۳۹۷. اثر بیوچار پوسته برنج بر برخی ویژگی های فیزیکی خاک و رشد ذرت در یک خاک لومی. پژوهش های خاک (علوم خاک و آب)، ۳۲(۳): ۳۰۵-۳۱۸.

۱۰. قربانی، ه.، حیدری، م. و غفاری، م. ۱۳۹۵. تأثیر سطوح مختلف شوری و عناصر سنگین سرب و کادمیوم بر رشد، رنگدانه‌های فتوسنتزی و مقادیر سدیم و پتاسیم در اسفناج .مجله علوم و فنون کشت های گلخانه ای، ۷ (۱):۲۴-۱۵.

۱۱. کریمی، ر.۱۳۸۷.گیاه پالایی خاکهای آلوده به عناصر کادمیم، سرب و نیکل، سومین کنگره ملی بازیافت و استفاده از منابع آلی تجدید شونده در کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ۹ صفحه.

۱۲. موسوی، ر.، رسولی صدقیانی م.ح.، سپهر، ا. و برین م. ۱۴۰۲. تأثیر بیوچار غنی‌شده بر رفتار جذب فسفر در خاک‌های شور و غیر شور حوضه دریاچه ارومیه. علوم آب و خاک، ۲۷(۱):۲۳۰-۲۱۷.

13. Ahmad, M., Lee, S.S. Lim, J. E. Lee, S.E. Cho, J.S. Moon, D.H. Hashimoto Y. & O.k. Y.S. 2014. Speciation and phytoavailability of lead and antimony in

a small arms range soil amended with mussel shell, cow bone and biochar: EXAFS spectroscopy and chemical extractions. Chemosphere, 95: 433-441.

14. Baycu, G., Doganay. T., Hakan, O. & Sureyya, G. 2006. Ecophysiological and seasonal variations in Cd, Pb, Zn and Ni concentrations in the leaves of urban deciduous trees in Istanbul. Environmental Pollution, 143(3): 545-554.
15. Brennan, A., Moreno Jiménez, E., Puschenreiter, M., Antonio Alburquerque, J. & Switzer, C. 2014. Effects of biochar amendment on root traits and contaminant availability of maize plants in a copper and arsenic impacted soil. Plant Soil, DOI 10.1007/s11104-014-2074-0.
16. Brune, A. & Deitz, KJ. 1995. A comparative analysis of element composition of roots and leaves of barley seedlings grown in the presence of toxic cadmium, molybdenum, nickel and zinc concentrations. Journal of Plant Nutrition, 18:853–868.
17. Doumer, M., Rigol A., Vidal, M. & Mangrich, A. 2016. Removal of Cd, Cu, Pb, and Zn from aqueous solutions by biochars. Environmental Science and Pollution Research, 23(3): 2684-2692.
18. Fathi, M. & Chorom, M. 2013. The effect of zeolite on heavy metals in soils treated with sewage sludge and corn growth. M.Sc. Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz.
19. Golchin, I. P., Safavi, S. & Ateshnama, K. 2006. Native plant species superabsorbent lead and zinc in the province. Proceedings of the conference on soil, environment and sustainable development. Karaj. pp: 22-21.
20. Kabata-Pendias, A. 2001. Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Boca Rotan, Florida, USA.143-157.
21. Knowles, O., Robinson, B., Contangelo, A. & Clucas, L. 2011. Biochar for the mitigation of nitrate leaching from soil amended with biosolids. Science of the Total Environment, 409: 3206-3210.
22. Laird, D.A. Fleming, P.D. Karlen D.L. Wang, B. & Horton, R. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. Geoderma, 158:436–442.
23. Li, N., Kang, Y., Pan, W., Zeng, L., Zhang, Q. & Luo, J. 2015. Concentration and transportation of heavy metals in vegetables and risk assessment of human exposure to bioaccessible heavy metals in soil near a waste-incinerator site, South China. Science of the Total Environment, 521-522: 144-151.
24. Liang, B., Lehmann, J. Solomon, D. Kinyangi, J. Grossman, J. O'Neill, B. Skjemstad, J.O. Thies, J. Luizão, F.J. Petersen, J. & Neves, E.G. 2006. Black carbon increases cation exchanges capacity in soils. Soil Science Society of America Journal, 70: 1719–1730.
25. Lyu, H., Gao, B., He, F., Zimmerman, A, R., Ding, C., Huang, H. & Tang, J. 2018. Effects of ball milling on the physicochemical and sorptive properties of biochar: Experimental observations and governing mechanisms. Environmental Pollution, 233 546.
26. Masto, R.E., Kumar, S., Rout, T., Sarkar, P., George, J. & Ram. L. 2013. Biochar from water hyacinth (*Eichornia crassipes*) and its impact on soil biological activity. Catena, 111: 64-71.
27. Metwali, M.R., Ehab-Manal, H., Tarek, E. & Bayoumi, Y. 2010. Agronomical traits and biochemical genetic markers associated with salt tolerance in wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.). Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(5): 174-183.
28. Mohan, D., Kumar, A. & Pittman, C.U. 2016. Sustainable biochar-a tool for climate change mitigation, soil management and water and wastewater treatment. Geostatistical and Geospatial Approaches for the Characterization of Natural Resources in the Environment. Springer, 949-952.

29. Palacios, G., Gómez, I. Carbonell-Barrachina, A. Navarro, Pedreño J. & Mataix, J. 1998. Effect of nickel oncentration on tomato plant nutrition and dry matter yield. Journal of Plant Nutrition, 21(10): 2179-2191.
30. Rajkovich, S. Enders, A. & Hanley, K. 2012. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. Biology and Fertility of Soils, 48:271–284.
31. Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A.R. & Lehmann, J. 2011. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. Biology and Fertility of Soils, 48(3): 271-284.
32. Sharma, P. & Dubey, R.S. H. 2005. Lead toxicity in plants. Journal of Plant Physiology, 17:35–52.
33. Sohi, S., Lopez-Capel, E., Krull, E. & Bol, R. 2009. Biochar's role in soil and climate change: a review of research needs. CSIRO Land and Water Science Report, 59: 1–57.
34. Tabatabaei, S. J. 2009. Supplements of nickel affect yield, quality, and nitrogen metabolism when urea or nitrate is the sole nitrogen source for cucumber. Journal of Plant Nutrition, 32: 713-724.
35. Thies J. E. & Rillig M.C. 2009. Characteristics of biochar: biological properties. Sterling. In Lehmann, J. and Joseph, S. (eds.). Biochar for Environmental Management. Science and Technology. London. Earthscan Publishing, PP: 85-105.
36. Yang, X., 1996. Nickel effects on influx and transport of mineral nutrients in four plant species. Journal of Plant Nutrition,19: 265-279.
37. Yang, X.E., Long, X.X., Ye, H.B., He, Z.L., Calvert, D.V. & Stoffella, P.J. 2004. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn hyperaccumulating plant species (*Sedum alfredii Hance*). Plant Soil, 259:181-189.