

اثر زغال‌های زیستی و آلودگی سرب بر برخی ویژگی‌های خاک مرتعی زیر کشت گیاه ارزن علوفه‌ای (*Panicum miliaceum*)

- ❖ علیرضا محمودی؛ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی مرتع، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- ❖ علی طویلی*؛ دانشیار، گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- ❖ حمیدرضا بوستانی؛ دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز، ایران.
- ❖ محمد جعفری؛ استاد، گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- ❖ سلمان زارع؛ استادیار، گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

چکیده

استفاده از زغال زیستی‌های می‌تواند بر افزایش جذب عناصر غذایی گیاه و تثبیت عناصر سنگین در خاک موثر باشد. هدف از پژوهش حاضر بررسی تاثیر کاربرد زغال‌های زیستی و آلودگی سرب بر برخی ویژگی‌های یک خاک مرتعی تحت کشت گیاه ارزن علوفه‌ای (*Panicum miliaceum*) در شرایط گلخانه بود. آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار انجام شد. فاکتور اول شامل زغال زیستی در هفت سطح (عدم کاربرد زغال زیستی (C)، زغال زیستی بقایای گندم ۱/۵ درصد وزنی (GB₁)، زغال زیستی بقایای گندم ۳ درصد وزنی (GB₂)، زغال زیستی بقایای پنبه ۱/۵ درصد وزنی (PB₁) و زغال زیستی بقایای پنبه ۳ درصد وزنی (PB₂) و فاکتور دوم شامل کاربرد سرب در سه سطح (Pb₀)، ۱۵۰ (PB₁) و ۳۰۰ (PB₂) میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) بود. این پژوهش نشان داد که افزایش کاربرد سطوح زغال‌های زیستی بقایای گیاهی گندم، ذرت و پنبه از سطح ۰ به ۳ درصد وزنی سبب افزایش قابلیت هدایت الکتریکی (۱۵/۳۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۲ دسی زیمنس بر متر)، کربن آلی خاک (۵۳، ۵۹ و ۶۳ درصد)، پهاش خاک (۰/۱۳، ۰/۰۵ و ۰/۱۵ واحد) و کاهش غلظت سرب قابل استفاده (۱۲/۱۶، ۸۳/۱۲ و ۱۰/۲۵ درصد) در خاک شد. همچنین کاربرد انواع زغال‌های زیستی بقایای گیاهی گندم، ذرت و پنبه در سطح ۳ درصد وزنی سبب افزایش فراهمی آهن (به ترتیب ۶۵، ۷۲ و ۶۹ درصد)، منگنز (۱۰۵، ۷۴ و ۴۱ درصد)، مس (۱۰، ۱۵/۶۲ و ۲۲/۵ درصد) و پتاسیم (۱۶۷، ۱۱۴ و ۵۰ درصد) شد. به طور کلی کاربرد انواع زغال‌های زیستی مورد استفاده در این پژوهش سبب بهبود برخی ویژگی‌های خاک شد. زغال زیستی گندم در سطح ۳ درصد وزنی (GB₂) از نظر تاثیرگذاری بر ویژگی‌های خاک از جمله افزایش کربن آلی خاک، افزایش فراهمی عناصر غذایی مانند پتاسیم و منگنز و کاهش فراهمی سرب در خاک نسبت به بقیه موثرتر بود. با در نظر گرفتن اثرات مثبت زغال‌های زیستی، از آنها می‌توان به عنوان یک کود آلی پایدار برای بهبود خصوصیات خاک مرتعی جهت اجرای پروژه‌های اصلاحی مراتع استفاده شوند.

کلید واژگان: زغال زیستی گندم، سطوح زغال زیستی، سرب، عناصر غذایی

۱. مقدمه

اغلب خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک ایران از جمله اراضی مرتعی، آهکی و دارای پهاش قلیایی هستند. این شرایط همراه با مقدار پایین ماده آلی در این خاک‌ها سبب کاهش عملکرد بسیاری از گیاهان به واسطه کمبود عناصر غذایی می‌شود [۳۲]. استفاده از زغال زیستی به عنوان یک بهساز خاک، در خاک‌های خشک و نیمه خشک [۲۴] به دلیل کم بودن ماده آلی و پایین بودن قابلیت استفاده برخی از عناصر غذایی از جمله فسفر، آهن، روی، منگنز و مس به عنوان یک چالش و ایده مهم در تحقیقات بسیاری از محققین جای گرفته است [۱۷].

زغال زیستی یک ماده متخلخل و غنی از کربن است که از تجزیه حرارتی زیست توده‌ها در دماهای مختلف (۲۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سلسیوس) و در شرایط بدون اکسیژن یا اکسیژن محدود تهیه می‌شود [۲۹ و ۵۱]. امروزه زغال زیستی، به عنوان یک راه حل مناسب در بهبود کیفیت خاک و افزایش سطح حاصلخیزی آن مطرح می‌شود. اصلاح و بهبود وضعیت خاک، مدیریت مواد زائد، کاهش اثر تغییرات اقلیم و تولید انرژی چهار جنبه کاربردی مهم زغال زیستی می‌باشد [۲۶]. تاثیر زغال زیستی بر فراهمی عناصر غذایی و ویژگی‌های شیمیایی خاک با توجه به نوع خاک، نوع زیست توده بیوپچار و شرایط گرماکافت آن از جمله دمای گرماکافت و سطح کاربرد بیوپچار متفاوت است [۴۹ و ۵۱]. زغال زیستی می‌تواند در فضاهای خالی مراتع، باغ‌های میوه و سایر پوشش‌های چندساله به عنوان یک خاکپوش برای مدت طولانی باقی بماند و ضمن تامین نیازهای غذایی گیاهان از خطرات فرسایش در لایه‌های سطحی جلوگیری کند [۳۱]. نتایج پژوهشی در یک چراگاه چند ساله در انگلستان نشان داد که کاربرد زغال زیستی در سطح خاک، دارای اثرات مثبت و بهبود بخشی در کیفیت خاک می‌باشد [۱۴]. برخی از تحقیقات استفاده از بیوپچار در خاک‌های با پهاش بالا را سبب بهبود وضعیت عناصر غذایی پرمصرف از قبیل پتاسیم و فسفر و عناصر کم مصرف دانسته‌اند [۲۴، ۹ و ۲۶]. یافته‌های پژوهش مرادی و همکاران (۲۰۱۷) نشان

داد در اثر افزودن بیوپچار کاه و کلش گندم به یک خاک آهکی غلظت قابل استفاده فسفر، پتاسیم و منگنز افزایش یافت در حالی که غلظت قابل استفاده آهن کاهش یافت. آنها همچنین گزارش کردند با افزایش سطح کاربرد بیوپچار مقدار کربن آلی خاک نیز افزایش یافت [۳۵].

کریمی و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند کاربرد بیوپچار باگاس نیشکر بر فراهمی عناصر غذایی و ویژگی شیمیایی خاک تاثیر معنادار داشت و نتایج آنها نشان داد کاربرد بیوپچار باعث افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، کربن آلی خاک و افزایش غلظت قابل استفاده فسفر، پتاسیم و منگنز در یک خاک آهکی شد [۲۰]. پژوهشگران متعددی گزارش کرده‌اند که کاربرد زغال زیستی با توجه به ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح ویژه بالای آن و حضور کربوکسیل، فنولیک، هیدروکسیل و دیگر گروه‌های عاملی، سبب تثبیت فلزات سنگین و بهبود وضعیت خاک از لحاظ آلودگی می‌شوند [۱۱ و ۲۵]. سرب از جمله مهم‌ترین آلاینده‌های زیست محیطی محسوب می‌شود و در فهرست سازمان محیط زیست آمریکا به جزو خطرناکترین فلزات سنگین معرفی شده است [۴۵]. در بین فلزات سنگین، سرب به دلیل گستردگی بیش‌تر و نیز اثراتی که می‌تواند بر سلامتی انسان، حیوانات و محیط زیست داشته باشد، به عنوان یکی از نگرانی‌های اصلی به شمار می‌رود. با جذب سرب به وسیله گیاهان مرتعی و چرای آن توسط دام و ورود آن به زنجیره غذایی سلامتی انسان‌ها و حیوانات را به طور جدی تهدید می‌کند.

تاکنون مطالعات بسیار محدودی در ارتباط با تاثیر زغال زیستی بر فراهمی سرب، برخی عناصر غذایی و ویژگی‌های خاک‌های مرتعی انجام شده است. از آنجا که اثرات کاربرد زغال‌های زیستی مختلف با مواد اولیه و شرایط گرماکافت متفاوت، بر ویژگی‌های خاک، یکسان نیست، لذا هدف از انجام پژوهش حاضر بررسی اثر کاربرد سطوح سرب و زغال‌های زیستی حاصل از بقایای گیاهی متفاوت (گندم، ذرت و پنبه) بر برخی ویژگی‌های یک خاک مرتعی زیر کشت گیاه ارزن علوفه‌ای در شرایط گلخانه بود.

طریق روش گرماکافت آهسته در شرایط اکسیژن محدود تهیه شد. بقایای گیاهی مورد نظر در آغاز هوا خشک شد و بعد از آسیاب کردن در یک کوره الکتریکی در شرایط اکسیژن محدود در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس حرارت داده شد. دمای گرماکافت به صورت تدریجی بالا برده شد. به طوریکه از دمای اتاق شروع و در هر یک دقیقه، پنج درجه سلسیوس دمای کوره افزایش یافت تا دما به ۴۰۰ درجه سلسیوس (دمای نهایی) رسید و سپس نمونه‌ها به مدت ۴ ساعت در این دما نگهداری شد. پس از آن، زغال‌های زیستی تولیدی در دمای اتاق به تدریج سرد شدند و قبل از استفاده از الک ۰/۵ میلیمتری عبور داده شدند (۳۱ و ۳۲). برخی از ویژگی‌های شیمیایی زغال‌های زیستی تولیدی توسط روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد (جدول ۲). پهاش با روش [۴۸] با استفاده از سوسپانسیون ۱:۲۰ زغال زیستی به آب مقطر، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۱:۱۰ زغال زیستی به آب مقطر [۵۲] و درصد کربن، هیدروژن و نیتروژن توسط دستگاه آنالیز عنصری CHN Analyzer (ThermoFinnigan Flash EA 1112 Series) اندازه‌گیری شد. جهت تعیین غلظت کل عناصر فسفر، پتاسیم، سرب و عناصر کم مصرف از عصاره حاصل از روش خشک سوزانی و حل خاکستر حاصل در اسید کلریدریک ۲ نرمال استفاده شد [۱۲]. در عصاره حاصل، غلظت فسفر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۸۰ نانومتر و غلظت سرب و عناصر کم مصرف توسط دستگاه دستگاہ جذب اتمی (AAS; PG 990, PG Instruments Ltd UK) تعیین شد.

۳.۲. طرح آماری و کشت گلخانه‌ای

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار در شرایط گلخانه انجام شد. فاکتور اول شامل زغال زیستی در هفت سطح بدون کاربرد زغال زیستی (C)، زغال زیستی بقایای گندم ۱/۵ درصد وزنی (GB₁)، زغال زیستی بقایای گندم ۳ درصد

۲. روش شناسی

۱.۲. نمونه برداری و آماده سازی خاک

برای انجام این پژوهش مقدار مناسبی خاک از افق سطحی (۰-۳۰ سانتی‌متر) از مراتع شهرستان داراب واقع در ۲۶۰ کیلومتری جنوب شرقی شیراز واقع در استان فارس برداشته شد. پس از هواخشک کردن و عبور از الک دو میلیمتری، برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه از جمله بافت خاک به روش هیدرومتری [۱۵]، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع، پهاش در عصاره گل اشباع، مقدار کربن آلی با اکسیداسیون مرطوب با اسید کرومیک و تیتراسیون برگشتی با فروس آمونیم سولفات [۳۸]، کربنات کلسیم معادل به روش خثنی کردن با اسید کلریدریک [۴۳]، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش جانشیننی کاتیون‌ها با استات آمونیوم [۴۴] و نیتروژن کل به روش کلجدال [۸] اندازه‌گیری شد. غلظت فسفر فراهم خاک با بهره‌گیری از بیکربنات سدیم نیم مولار استخراج و به روش رنگ سنجی با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Apel PD-303) اندازه‌گیری شد [۳۸]. غلظت پتاسیم فراهم خاک به روش استخراج با استات آمونیوم یک مولار عصاره‌گیری شد و غلظت پتاسیم در عصاره، با بهره‌گیری از دستگاه فلیم فتومتر اندازه‌گیری شد [۲۳]. مقدار زیست‌فراهمی عنصر سرب و عناصر کم مصرف خاک با استفاده از محلول DTPA تعیین شد و غلظت آن‌ها در عصاره توسط دستگاه جذب اتمی (AAS; PG 990, PG Instruments Ltd UK) اندازه‌گیری شد [۳۰]. برخی ویژگی‌های شیمیایی و غلظت اولیه عناصر در خاک مطالعه شده در جدول ۱ آمده است.

۲.۲. تولید زغال‌های زیستی و تعیین ویژگی‌های آن

بقایای گیاهی شامل کاه گندم، کاه و کلش ذرت و ساقه پنبه از مزارع شهرستان داراب جمع‌آوری شد. زغال‌های زیستی مورد استفاده حاصل سه نوع ماده آلی از

۴.۲. تعیین خصوصیات خاک پس از برداشت

گیاه ارزن علوفه‌ای

پس از جداسازی ریشه از خاک گلدان، هوا خشک کردن و عبور از الک ۲ میلی‌متری برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک‌ها توسط روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد. پ‌هش در گل اشباع [۴۰] توسط دستگاه پ‌هش متر، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع [۴۰] توسط دستگاه شوری سنج مقدار کربن آلی با اکسیداسیون مرطوب با اسید کرومیک و تیتراسیون برگشتی با فروس آمونیم سولفات [۳۸] اندازه‌گیری شد. مقدار زیست‌فراهمی عنصر سرب و عناصر کم مصرف نیز توسط عصاره‌گیری با محلول DTPA و قرائت توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

۵.۲. تجزیه و تحلیل داده‌ها

تجزیه و تحلیل داده‌ها با بهره‌گیری از نرم‌افزار SAS انجام شد. همچنین مقایسه میانگین‌های مربوط به اثر تیمارهای اصلی و برهمکنش آنها با بهره‌گیری از آزمون حداقل فاصله معناداری (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

۳. نتایج

۱.۳. ویژگی‌های خاک

مقدار کربنات کلسیم معادل زیاد، میزان کربن آلی کم، ظرفیت تبادل کاتیونی نسبتاً پایین و قابلیت استفاده پایین از عناصر کم مصرف، عدم سرب قابل تشخیص از مهمترین مشخصه‌های خاک مورد مطالعه است (جدول ۱).

برخی از ویژگی‌های شیمیایی زغال‌های زیستی تولید شده از منابع گیاهی در جدول (۲) نشان داده شده است. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثرات اصلی زغال‌های زیستی بر پ‌هش خاک، قابلیت هدایت الکتریکی و کربن آلی خاک معنادار بود ($P < 0.01$).

وزنی (GB₂)، زغال زیستی بقایای ذرت ۱/۵ درصد وزنی (ZB₁)، زغال زیستی بقایای ذرت ۳ درصد وزنی (ZB₂)، زغال زیستی بقایای پنبه ۱/۵ درصد وزنی (PB₁) و زغال زیستی بقایای پنبه ۳ درصد وزنی (PB₂) و فاکتور دوم شامل کاربرد سرب در سه سطح (Pb₀)، (Pb₁₅₀) ۱۵۰ و (Pb₃₀₀) ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) بود. در ابتدا نمونه‌های خاک طبق طرح آزمایشی به سطوح سرب آلوده شدند. به این صورت که نمونه‌های ۳ کیلوگرمی از خاک مورد آزمایش، در نایلون‌های ضخیم پلاستیکی قرار داده شد. به هرکدام از نمونه‌ها محلول آبی حاوی عنصر سرب تهیه شده از آب مقطر، نمک نترات سرب افزوده شدند و کاملاً مخلوط شدند به طوری که مقدار سرب افزوده شده به هر کیلوگرم خاک طبق سطوح آزمایش شد. سپس نمونه‌ها در دمای اتاق نگهداری شد تا خشک شوند. پس از آن نمونه‌ها را نرم کرده و رطوبت آن‌ها توسط آب مقطر به روش وزنی به حد ظرفیت زراعی رسانده شدند و سپس در دمای اتاق رها شدند تا خشک شوند. تر و خشک شدن متوالی خاک جهت یکنواخت تر شدن عنصر سنگین سرب در خاک، رسیدن به حالت تعادل و شبیه‌سازی شرایط واقعی مزرعه سه بار متوالی تکرار شد [۴۴] پس از این مرحله تیمارهای زغال زیستی را طبق طرح آزمایشی به نمونه‌های خاک افزوده، کاملاً مخلوط شده و به گلدان‌های پلاستیکی انتقال داده شدند. در این مرحله رطوبت خاک گلدان‌ها را به ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه رسانده و به مدت دو هفته در دمای اتاق جهت حصول تعادل و انجام واکنش‌های لازم نگهداری شد. سپس تعداد ۶ عدد بذر گیاه ارزن علوفه‌ای در عمق ۲ سانتی متری خاک کاشته شد پس از سبز شدن و گذشت دو هفته، تعداد بوته‌ها به ۴ عدد در هر گلدان تقلیل یافت. در طول دوره رشد، رطوبت گلدان‌ها روزانه بصورت وزنی با استفاده از آب مقطر در ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه نگه داشته شدند. بعد از کامل شدن رشد رویشی گیاهان (۶۰ روز از زمان کاشت)، پایه‌های گیاهی از ۵/۰ سانتی متری سطح خاک قطع و برداشت شدند.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش.

پارامتر	واحد	مقدار
شن	%	۵۳/۵
سیلت	%	۳۷/۲
رس	%	۹/۱۶
بافت خاک	-	لومی
گنجایش تبادل کاتیونی	(سانتی مول بار بر کیلوگرم)	۱۷/۴
قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع	(دسی زیمنس بر متر)	۰/۲۶
پ‌هاش	-	۷/۵۲
کربن آلی	(گرم بر صد گرم)	۰/۸۴
کربنات کلسیم معادل	%	۶۱
نیتروژن کل	(گرم بر کیلوگرم)	۰/۰۷
فسفر قابل استفاده	(میلی گرم بر کیلوگرم)	۱۰
پتاسیم قابل استفاده	(میلی گرم بر کیلوگرم)	۴۲۶
آهن قابل استفاده	(میلی گرم بر کیلوگرم)	۲/۷۵
روی قابل استفاده	(میلی گرم بر کیلوگرم)	۱/۱۴
مس قابل استفاده	(میلی گرم بر کیلوگرم)	۰/۱۶
منگنز قابل استفاده	(میلی گرم بر کیلوگرم)	۱/۴۰
سرب قابل استفاده	(میلی گرم بر کیلوگرم)	ND*

ND= Non detectable by atomic absorption *

جدول ۲. برخی از خصوصیات شیمیایی زغال‌های زیستی به کار رفته در آزمایش.

پارامتر	واحد	مقدار		
		زغال زیستی ذرت	زغال زیستی گندم	زغال زیستی پنبه
گنجایش تبادل کاتیونی	(سانتی مول بار بر کیلوگرم)	۲۷	۳۲	۱۶/۷
قابلیت هدایت الکتریکی (۱:۱۰)	(دسی زیمنس بر متر)	۴/۰۳	۶/۹۷	۰/۷۰
پ‌هاش (۱:۱۰)	-	۱۰	۱۰/۴	۱۰
کربن کل	%	۴۲/۶	۴۱	۴۳/۶
نیتروژن کل	%	۲/۷۶	۱/۵۶	۱/۴۸
هیدروژن کل	%	۵/۵۶	۵	۵/۸۱
فسفر	%	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۸
پتاسیم	(میلی گرم بر کیلوگرم)	۲۰۵۷۸	۲۸۳۲۱	۷۴۱۹
آهن	(میلی گرم بر کیلوگرم)	۶۴۲	۱۳۸	۲۱۸
روی	(میلی گرم بر کیلوگرم)	۳۷	۲۳	۳۳/۴
مس	(میلی گرم بر کیلوگرم)	۱۰/۲	۲/۵۸	۱۲/۵
منگنز	(میلی گرم بر کیلوگرم)	۵۳/۷	۴۹/۱	۳۰/۱
سرب	(میلی گرم بر کیلوگرم)	ND	ND	ND

خاک شد. اثرات اصلی کاربرد تیمارهای زغال زیستی نشان داد که همه‌ی تیمارهای زغال زیستی سبب افزایش معنادار پهاش خاک شد (جدول ۴). همچنین اثرات اصلی کاربرد تیمارهای زغال زیستی نشان داد که همه‌ی تیمارهای زغال زیستی سبب افزایش معنادار کربن آلی در خاک شد (جدول ۴).

همچنین اثرات متقابل زغال زیستی و سرب تنها بر قابلیت هدایت الکتریکی معنادار بود ($P < 0.01$) و بر بقیه ویژگی‌های خاک معنادار نبود (جدول ۳).
آزمون میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد زغال زیستی بقایای گندم و ذرت در سطح ۱/۵ و ۳ درصد وزنی سبب افزایش معنادار ($P < 0.01$) قابلیت هدایت الکتریکی

جدول ۳. نتایج میانگین مربعات تاثیر زغال‌های زیستی و سطوح سرب بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		پهاش	هدایت الکتریکی (۱:۱۰)	کربن آلی
سرب	۲	۰/۰۴۷ ^{ns}	۰/۰۰۹ ^{**}	۰/۰۰۹ ^{ns}
زغال زیستی	۶	۰/۰۲۹ ^{**}	۰/۱۴۴ ^{**}	۰/۳۷۲ ^{**}
سرب×زغال زیستی	۱۲	۰/۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۲ ^{**}	۰/۰۰۸ ^{ns}
خطا	۶۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
ضریب تغییرات (%)		۰/۰۶	۰/۶۳	۰/۳۵

ns و ** به ترتیب غیرمعنادار و معنادار در سطح احتمال ۱ درصد است.

جدول ۴. آزمون میانگین پیامد کاربرد زغال‌های زیستی بر پهاش، EC، کربن آلی خاک.

تیمار	پهاش خاک	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	کربن آلی (درصد)
شاهد	۷/۵۲b	۰/۳۰e	۰/۸۲f
زغال زیستی گندم ۱/۵ درصد (GB ₁)	۷/۶۴a	۰/۴۳c	۱/۲۰e
زغال زیستی گندم ۳ درصد (GB ₂)	۷/۶۵a	۰/۶۱a	۱/۲۶d
زغال زیستی ذرت ۱/۵ درصد (ZB ₁)	۷/۵۵b	۰/۴۲d	۱/۲۰e
زغال زیستی ذرت ۳ درصد (ZB ₂)	۷/۵۷b	۰/۴۵b	۱/۳۱b
زغال زیستی پنبه ۱/۵ درصد (PB ₁)	۷/۶۲a	۰/۳۱e	۱/۳۰c
زغال زیستی پنبه ۳ درصد (PB ₂)	۷/۶۷a	۰/۳۲e	۱/۳۴a

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر پایه آزمون Lsd اختلاف معناداری ندارند.

نشان داد اثرات اصلی تیمارهای زغال زیستی و سرب و همچنین اثر متقابل آنها بر غلظت منگنز و پتاسیم قابل استفاده خاک معنادار بود. در ارتباط با آهن و مس قابل استفاده نیز فقط اثرات اصلی تیمارهای زغال زیستی معنادار بود. همچنین اثرات اصلی تیمارهای زغال زیستی و سرب و اثر متقابل آنها بر غلظت روی و فسفر قابل استفاده خاک معنادار نبود (جدول ۵).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی تیمارهای زغال زیستی و سرب و همچنین اثر متقابل آنها بر غلظت سرب قابل استفاده خاک معنادار بود (جدول ۵).
اثرات اصلی تیمار کاربرد سرب نشان داد که با افزایش سطوح سرب در خاک از Pb₀ به Pb₃₀₀ غلظت قابل استفاده آن در خاک به طور معناداری به میزان ۱۲۸ میلی گرم در کیلوگرم خاک افزایش یافت.

فراهمی عناصر غذایی: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها

جدول ۵: نتایج میانگین مربعات تاثیر زغال‌های زیستی و سطوح سرب بر فراهمی عناصر غذایی و سرب قابل استفاده خاک.

میانگین مربعات							درجه آزادی	منبع تغییرات
سرب قابل استفاده	فسفر قابل استفاده	پتاسیم قابل استفاده	روی قابل استفاده	مس قابل استفاده	منگنز قابل استفاده	آهن قابل استفاده		
۱۱۶۸۴۸**	۱۶/۱ ^{ns}	۹۲۶۳	۰/۰۵۵**	۰/۰۰۱ ^{ns}	۱/۰۱**	۰/۸۰ ^{ns}	۲	سرب
۲۰۱**	۶۴/۴ ^{ns}	۶۸۹۶۳۰	۰/۰۶۸**	۰/۰۰۱**	۲/۵۱**	۴/۴۵**	۶	زغال زیستی
۱۱۶**	۱۰۵ ^{ns}	۱۷۲۴	۰/۰۳۱**	۰/۰۰۱**	۰/۱۸۸*	۰/۳۸**	۱۲	سرب×زغال زیستی
۰/۳۹	۱/۳۹	۰/۱۷	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۶۳	خطا
۱/۰۳	۸/۵۶	۰/۰۵۸	۱/۶۱	۰/۷۴	۲/۲۰	۱/۲۴		ضریب تغییرات

ns و ** به ترتیب غیرمعنادار و معنادار در سطح احتمال ۱۰ درصد است.

قابل مشاهده بود (جدول ۲). همه زغال‌های زیستی تهیه شده دارای پتاسیم محلول بالایی بودند، به نحوی که میزان پتاسیم محلول آنها از ۷۴۱۹ تا ۲۸۳۲۱ (میلی‌گرم بر کیلوگرم) متغیر بوده که کمترین و بیشترین پتاسیم محلول به ترتیب متعلق به زغال زیستی بقایای پنبه و زغال زیستی بقایای گندم بود. مواد خام اولیه چوبی معمولاً حاوی مقادیر کم خاکستر (کمتر از ۱٪ وزنی) می‌باشند. ولی زیست توده‌های غیرچوبی مانند علف‌ها، پوسته‌های غلات و بقایای کاه و کلش، حاوی مقادیر زیادی از انواع عناصر بوده و بیوچار آنها دارای مقادیر زیادی از خاکستر است [۱۲]. در بین سه نوع زغال زیستی مورد آزمون بیشترین غلظت آهن، منگنز، مس و روی قابل استفاده به ترتیب در زغال‌های زیستی بقایای ذرت، ذرت، پنبه و پنبه قابل مشاهده بود.

۲.۴. ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های تیمار شده با

زغال‌های زیستی و سطوح سرب

آزمون میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد زغال زیستی بقایای گندم و ذرت در سطح ۱/۵ و ۳ درصد وزنی سبب افزایش معنادار ($P < 0.01$) قابلیت هدایت الکتریکی خاک شد. در حالیکه زغال زیستی پنبه اثرات معناداری بر قابلیت هدایت الکتریکی خاک نداشت. مقدار افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک‌های تیمار شده بستگی به

کاربرد تمامی زغال‌های زیستی در خاک سبب کاهش معنادار سرب قابل استفاده در خاک شد (جدول ۶) به طوری که بیشترین کاهش سرب قابل استفاده مربوط به کاربرد زغال زیستی بقایای گندم در سطح ۳ درصد وزنی نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد زغال زیستی) به میزان ۱۸ درصد بود.

۴. بحث و نتیجه گیری

۱.۴. خصوصیات زغال‌های زیستی

همه نمونه‌های زغال‌های زیستی تهیه شده دارای پ‌هاش بالایی بودند (بالای ۱۰). در بین سه نوع زغال زیستی مورد آزمون بیشترین و کمترین قابلیت هدایت الکتریکی به ترتیب در زغال زیستی بقایای گندم و زغال زیستی بقایای پنبه بود. (۶/۹۷ و ۰/۷ دسی‌زیمنس بر متر). بیوچارهایی با مواد اولیه چوبی دارای مقادیر کمتری از خاکستر نسبت به بیوچارهای مواد اولیه گیاهی و کود حیوانی می‌باشند [۱۲]. بنابراین، قابلیت هدایت الکتریکی آنها نیز کمتر از قابلیت هدایت الکتریکی بیوچارهای مواد خام اولیه گیاهی و کود حیوانی است. همچنین بیشترین گنجایش تبادل کاتیونی در زغال زیستی بقایای گندم مشاهده شد. در همه زغال‌های زیستی بالا بودن نسبت پتاسیم محلول، غلظت کربن، آهن و منگنز قابل استفاده

اثرات اصلی کاربرد تیمارهای زغال زیستی نشان داد که همه‌ی تیمارهای زغال زیستی سبب افزایش معنادار کربن آلی در خاک شد (جدول ۴)، بدین ترتیب که در تیمارهای زغال‌های زیستی بقایای گندم، ذرت و پنبه در سطح ۳ درصد وزنی مقدار کربن آلی خاک به ترتیب ۵۳، ۵۹ و ۶۳ درصد نسبت به تیمار شاهد آزمایش افزایش یافت. ترتیب مقدار کربن آلی خاک در اثر کاربرد زغال زیستی به صورت زغال زیستی پنبه < زغال زیستی ذرت < زغال زیستی گندم < شاهد بود. بیشترین مقدار افزایش کربن آلی خاک در تیمار زغال زیستی بقایای پنبه در ۳ درصد وزنی مشاهده شد. مقدار سطح ۳ درصد وزنی انواع زغال‌های زیستی نسبت به سطح ۱/۵ درصد وزنی تاثیرگذاری بیشتری بر روی مقدار کربن آلی خاک داشت. افزایش کربن آلی کل خاک در اثر افزودن بیوچار به خاک به دلیل درصد بالای کربن بیوچار می‌باشد، که توسط بسیاری از پژوهشگران نیز گزارش شده است [۱۸، ۲۰] و [۳۳]. مرادی و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی مشاهده کردند که میزان کربن آلی خاک‌های تیمار شده با بیوچار با مقادیر مصرفی مختلف، تأثیرهای مختلفی بر میزان کربن آلی خاک داشته به صورتی که میزان مقادیر مصرفی بالاتر موجب افزایش کربن آلی خاک گردیده است [۳۵].

۳.۴. تاثیر زغال‌های زیستی و سطوح سرب

بر غلظت سرب قابل استفاده خاک

ترتیب غلظت سرب قابل استفاده در تیمارهای مختلف زغال زیستی به صورت شاهد < زغال زیستی پنبه < زغال زیستی ذرت < زغال زیستی گندم بود. نتایج داده‌ها نشان داد انواع زغال‌های زیستی بقایای گیاهی در سطح ۳ درصد وزنی نسبت به سطح ۱/۵ درصد وزنی توانستند سرب قابل استفاده بیشتری را در خاک کاهش دهند. بنابراین زغال‌های زیستی در این آزمایش نقش موثری در تثبیت و کاهش مقدار سرب قابل دسترس در خاک داشتند. اثرات متقابل تیمارها نشان داد که به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار سرب قابل استفاده در تیمارهای

نوع و مقدار زغال زیستی مورد استفاده داشت. در اثر کاربرد زغال‌های زیستی بقایای گندم و ذرت در سطح ۳ درصد وزنی قابلیت هدایت الکتریکی خاک به ترتیب ۰/۳۱ و ۰/۱۵ دسی‌زیمنس بر متر افزایش یافت. به طور کلی تاثیر تیمارهای ۱/۵ درصد وزنی زغال زیستی در افزایش قابلیت هدایت الکتریکی کمتر از سطح ۳ درصد وزنی زغال زیستی بود (جدول ۴). افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک در اثر کاربرد زغال‌های زیستی می‌تواند به دلیل آزاد شدن کاتیون‌های قلیایی (پتاسیم، کلسیم و منیزیم) موجود در ساختار زغال‌های زیستی در محلول خاک باشد [۳۴]. در اثر کاربرد بیوچار در خاک، آزاد شدن کاتیون‌های قلیایی که پیوند ضعیفی با ساختار بیوچار دارند می‌تواند قابلیت هدایت الکتریکی خاک را افزایش دهد [۱۰]. کاربرد بیوچار بقایای کنوکارپوس سبب افزایش معنادار قابلیت هدایت الکتریکی یک خاک قلیایی شد [۵۰]. افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک با کاربرد زغال زیستی به وسیله سونگ و همکاران (۲۰۱۸) [۴۵] و زلفی باوریانی (۲۰۱۶) [۵۶] گزارش شده است.

اثرات اصلی کاربرد تیمارهای زغال زیستی نشان داد که تیمارهای زغال زیستی گندم و پنبه سبب افزایش معنادار پهاش خاک شد، اما تاثیر زغال زیستی ذرت بر پهاش خاک معنی دار نبود (جدول ۴). هر چند بین تمامی تیمارهای زغال زیستی ۱/۵ و ۳ درصد وزنی از نظر آماری تفاوت معناداری مشاهده نشد. در اثر کاربرد زغال‌های زیستی بقایای گندم، ذرت و پنبه در سطح ۳ درصد وزنی، پهاش خاک به ترتیب ۰/۱۳، ۰/۰۵ و ۰/۱۵ واحد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. خاک دارای خاصیت بافری است و در مقابل تغییرات پهاش از خودش مقاومت نشان می‌دهد در واقع ساختار خاک به گونه‌ای است که مانند یک بافر عمل می‌کند و در حالت کلی سطح پهاش خاک را به حالت قابل قبول می‌رساند [۴۲]، خاک‌های آهکی ظرفیت بافری بالایی دارند و به همین دلیل با افزایش زغال‌های زیستی به خاک مورد مطالعه تغییرات پهاش کم بوده است.

سرب در خاک زیر کشت ذرت شد [۶].

۵.۴. تاثیر زغال‌های زیستی و سطوح سرب

برغلظت آهن قابل استفاده خاک

اثرات اصلی کاربرد تیمارهای زغال زیستی نشان داد که همه‌ی تیمارهای زغال زیستی سبب افزایش معنادار آهن قابل استفاده در خاک شد (جدول ۶)، به طوری که بیشترین مقدار آهن قابل استفاده مربوط به کاربرد تیمار زغال زیستی بقایای ذرت در سطح ۳ درصد وزنی نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد زغال زیستی) به میزان ۷۲ درصد بود. ترتیب غلظت آهن قابل استفاده در تیمارهای مختلف زغال زیستی به صورت زغال زیستی ذرت < زغال زیستی پنبه < زغال زیستی گندم < شاهد بود. نتایج داده‌ها نشان داد که با افزایش مقدار زغال زیستی از سطح ۱/۵ به ۳ درصد وزنی مقدار غلظت آهن قابل استفاده خاک افزایش یافت. اثرات متقابل تیمارها نشان داد که به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار آهن قابل استفاده در تیمارهای مرکب زغال زیستی بقایای ذرت در سطح ۳ درصد وزنی و بدون کاربرد سرب (ZB_2+Pb_0) (۵/۱۹ میلی‌گرم در کیلوگرم) و تیمار کاربرد سرب به میزان ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و بدون کاربرد زغال زیستی ($C+Pb_{300}$) (۲/۶۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) مشاهده شد.

کریمی و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که کاربرد سطوح ۱ و ۲ درصد بیوپچار باگاس نیشکر (B_{200}) سبب افزایش غلظت آهن قابل استفاده خاک به مقدار ۶ و ۱۰ درصد در یک خاک آهکی شد که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد [۲۰]. یافته‌های پژوهش [۳۷] نیز نشان داد که کاربرد بیوپچار تهیه شده از ضایعات پنبه و کنجد در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس، در سطح ۲ درصد وزنی سبب افزایش معناداری در قابلیت استفاده آهن خاک شد. در خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک به دلیل پایین بودن مقادیر ماده آلی، آهن قابل دسترس کمتری در خاک برای استفاده گیاه وجود دارد، لذا افزودن ماده آلی

مرکب کاربرد سرب به میزان ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و بدون کاربرد زغال زیستی ($C+Pb_{300}$) (۱۴۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) و تیمار کاربرد زغال زیستی بقایای گندم در سطح ۳ درصد وزنی و کاربرد سرب در سطح ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک (GB_2+Pb_{150}) (۴۶/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم) مشاهده شد.

زغال زیستی به دلیل خواص آن مانند ساختار متخلخل، حضور گروه‌های عامل مختلف، پهاش سطحی بالا و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا به عنوان یک اصلاح کننده بالقوه برای خاکهای آلوده با فلزات سنگین مورد بررسی قرار گرفته است [۵۶]. همچنین با توجه به اینکه زغال‌های زیستی دارای کربنات بوده و افزودن آنها به خاک می‌تواند سبب افزایش کربنات‌ها در خاک شود [۳]. بنابراین احتمالاً یکی از دلایل کاهش فراهمی سرب در خاک در تیمارهای زغال زیستی می‌تواند تبادل یونی بین سرب و کربنات کلسیم و تشکیل شکل نامحلول کربنات سرب در خاک باشد [۳].

ثبیت بیشتر سرب در تیمار زغال زیستی بقایای گندم می‌تواند به جهت بالا بودن ظرفیت تبادل کاتیونی آن و احتمالاً بیشتر بودن گروه‌های عاملی سطحی اکسیژن دار و در نتیجه افزایش پیدایش کمپلکس‌های پایدار سرب-زغال زیستی در خاک باشد. روی هم رفته تبادل یونی، برهم کنش الکتروستاتیک، ته نشینت و پیدایش کمپلکس‌های سطحی راهکارهای مؤثر در تثبیت فلزهای سنگین در خاک‌های تیمارشده با زغال زیستی گزارش شده است [۵۴]. بقائی (۲۰۱۸) در پژوهشی در ارتباط با تاثیر زغال زیستی بر تثبیت سرب در خاک‌های آلوده زیر کشت گیاه سورگوم به این نتیجه رسید که کاربرد بیوپچار تهیه شده از بقایای پوست انار در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس، سبب کاهش غلظت سرب فراهم در خاک به میزان ۱۱ درصد نسبت به تیمار شاهد شد، که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد [۵]. کاربرد ۴ درصد وزنی زغال زیستی باگاس نیشکر تولید شده در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس موجب کاهش آبشویی عنصر

کمترین مقدار منگنز قابل استفاده در تیمارهای مرکب زغال زیستی بقایای ذرت در سطح ۳ درصد وزنی و بدون کاربرد سرب (GB₂+Pb₀) (۲/۸۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) و تیمار کاربرد سرب به میزان ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و بدون کاربرد زغال زیستی (C+Pb₃₀₀) (۱/۳۴ میلی‌گرم در کیلوگرم) مشاهده شد.

منگنز در خاک‌های قلیایی و آهنی معمولاً با مواد آلی خاک کمپلکس تشکیل می‌دهد [۱۹]. افزودن زغال‌های زیستی به خاک سبب افزایش معنادار کربن آلی خاک شد (جدول ۲). بنابراین احتمالاً افزایش کربن محلول قابل دسترس خاک سبب افزایش غلظت منگنز قابل استفاده در محلول خاک شده است. بیوچار حاصل از پوست گردو در یک دوره آزمایش ۶۷ روز توانست غلظت منگنز خاک را افزایش دهد [۳۹]. در تحقیقی کاربرد بیوچار در سطح ۲ درصد وزنی تهیه شده از ضایعات ذرت در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس، سبب افزایش غلظت منگنز فراهم در خاک به میزان ۵۰ درصد نسبت به تیمار شاهد شد که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد [۳۷]. افزایش غلظت منگنز قابل استفاده در خاک‌های آهنی در اثر کاربرد بیوچارهای گوناگون توسط سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است [۱۹، ۲۸ و ۳۳].

۷.۴. تاثیر زغال‌های زیستی و سطوح سرب

بر غلظت مس قابل استفاده خاک

کاربرد تمامی زغال‌های زیستی در خاک سبب افزایش معنادار مس قابل استفاده در خاک شد (جدول ۶). به طوری که بیشترین مقدار مس قابل استفاده مربوط به کاربرد زغال زیستی بقایای پنبه در سطح ۳ درصد وزنی نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد زغال زیستی) بود. ترتیب غلظت آهن قابل استفاده در تیمارهای مختلف زغال زیستی به صورت زغال زیستی پنبه < زغال زیستی ذرت < زغال زیستی گندم < شاهد بود. نتایج داده‌ها نشان داد که با افزایش مقدار زغال زیستی از سطح ۱/۵ به ۳ درصد وزنی مقدار غلظت مس قابل استفاده خاک

به خاک سبب بهبود قابلیت دسترسی عناصر کم مصرف از جمله آهن خواهد شد. همچنین افزایش غلظت آهن قابل استفاده خاک را می‌توان به بیشتر بودن مقدار CEC خاک تیمار شده با زغال‌های زیستی ارتباط داد (جدول ۲). چرا که افزایش CEC خاک سبب افزایش مکان‌های جذب قابل برگشت بر سطوح خاک می‌شود، بنابراین آهن می‌تواند بیشتر در شکل قابل استفاده خاک قرار گیرد. یکی دیگر از دلایل بیشتر بودن آهن قابل استفاده خاک در اثر کاربرد تمامی زغال‌های زیستی مورد آزمایش می‌تواند رقابت یونی در خاک و جذب سایر کاتیون‌ها توسط زغال زیستی باشد [۱].

۶.۴. تاثیر زغال‌های زیستی و سطوح سرب

بر غلظت منگنز قابل استفاده خاک

نتایج میانگین اثرات اصلی تیمار کاربرد سرب نشان داد که با افزایش سطوح سرب در خاک از Pb₀ به Pb₁₅₀، غلظت منگنز قابل استفاده در خاک به طور معناداری کاهش یافت (۱۷/۲۷ درصد) (جدول ۶). علت کاهش قابلیت منگنز در اثر افزایش سطوح سرب، احتمالاً منگنزهای تبادلی از سطوح خارج شده و به محلول خاک انتقال یافته است و به خاطر شرایط قلیایی محلول خاک به صورت هیدروکسید منگنز رسوب پیدا کرده است و قابلیت استفاده آن کاهش یافته است [۷]. همچنین کاربرد تمامی زغال‌های زیستی در خاک سبب افزایش معنادار منگنز قابل استفاده در خاک شد، به طوری که بیشترین مقدار منگنز قابل استفاده مربوط به کاربرد زغال زیستی بقایای گندم در سطح ۳ درصد وزنی نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد زغال زیستی) بود. ترتیب غلظت منگنز قابل استفاده در تیمارهای مختلف زغال زیستی به صورت زغال زیستی گندم < زغال زیستی ذرت < زغال زیستی پنبه < شاهد بود. نتایج داده‌ها نشان داد که با افزایش مقدار زغال زیستی از سطح ۱/۵ به ۳ درصد وزنی مقدار غلظت منگنز قابل استفاده خاک افزایش یافت. اثرات متقابل تیمارها نشان داد که به ترتیب بیشترین و

افزایش یافت. اثرات متقابل تیمارها نشان داد که به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار مس قابل استفاده در تیمارهای مرکب زغال زیستی بقایای ذرت در سطح ۳ درصد وزنی و بدون کاربرد سرب (PB_2+PB_0) و تیمار کاربرد سرب به میزان ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلو گرم خاک و بدون کاربرد زغال زیستی ($C+PB_{300}$) مشاهده شد. نتایج تحقیقات [۲۲] نشان داد که بیوچارهای تولیدشده که کاربرد ۵ درصد وزنی زغال زیستی ضایعات پسته تولید شده در

دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، قابلیت استفاده مس را در خاک افزایش داد، که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد. اتکینسون و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که اضافه نمودن بیوچار به خاک با تاثیر بر ظرفیت تبادل یونی و فعالیت‌های میکروبی بر قابلیت استفاده یون‌های غذایی موثر است [۴]. تشکیل گروه‌های عامل و محل‌های جذب در سطح بیوچار نیز ظرفیت خاک را در ایجاد کمپلکس با یون‌های فلزی و جذب آن‌ها افزایش می‌دهد [۴۷].

جدول ۶. اثر کاربرد سطوح سرب و زغال‌های زیستی بر فراهمی برخی عناصر غذایی و سرب قابل استفاده در خاک مرتعی.

تیمارها	C	PB ₁	PB ₂	ZB ₁	ZB ₂	GB ₁	GB ₂	
سرب قابل استفاده								
Pb ₀	ND m	ND m	ND m	ND m	ND m	ND m	ND m	۰ C
Pb ₁₅₀	۵۸/۴g	۵۶/۱h	۵۴/۹i	۵۶/۳h	۵۳/۱j	۴۸/۲k	۴۶/۳۱	۵۳/۳B
Pb ₃₀₀	۱۴۵/۲a	۱۳۵/۹b	۱۲۴d	۱۲۴d	۱۱۹/۱f	۱۳۱c	۱۲۰/۶e	۱۲۸A
	۶۷/۸A	۶۴B	۵۹/۶C	۶۰/۱C	۵۷/۴D	۵۹/۸C	۵۵/۶E	
آهن قابل استفاده								
Pb ₀	۲/۷۵m	۴/۱۰jk	۴/۵۴ef	۴/۸۴b	۵/۱۹a	۴/۱۸i	۴/۸۷b	۴/۳۵۵ A
Pb ₁₅₀	۲/۷۱m	۴/۳۲h	۴/۴۰g	۴/۰۶k	۴/۱۱j-k	۴/۱۷jz	۴/۶۳d	۴/۰۶A
Pb ₃₀₀	۲/۶۲m	۴/۱۷jz	۴/۷۶c	۴/۴۹f	۴/۶۰de	۳/۸۹l	۳/۸۹l	۴/۰۵A
	۲/۶۹F	۴/۱۹D	۴/۵۶B	۴/۴۶C	۴/۶۳E	۴/۰۸A	۴/۴۶C	
منگنز قابل استفاده								
Pb ₀	۱/۳۹l	۱/۸۷h	۲/۳۱e	۲/۰۹f	۲/۶۳b	۲/۳۵de	۲/۸۲a	۲/۲۰A
Pb ₁₅₀	۱/۳۵l	۱/۵۹g	۱/۷۲j	۲/۰۵f	۲/۴۰d	۱/۷۹i	۲/۷۷b	۲/۰۱B
Pb ₃₀₀	۱/۳۴l	۱/۴۰l	۱/۷۱j	۱/۵۶k	۲/۰۵f	۱/۹۵g	۲/۶۷c	۱/۸۲C
	۱/۳۶F	۱/۷۴E	۱/۹۱D	۱/۹۳D	۲/۳۶B	۲/۰۳C	۲/۷۵A	
مس قابل استفاده								
Pb ₀	۰/۱۶۰k	۰/۱۸۸c	۰/۲۱۶a	۰/۱۹۲b	۰/۱۹۲b	۰/۱۸۳e	۰/۱۸۶d	۰/۱۸۸A
Pb ₁₅₀	۰/۱۶۰k	۰/۱۸۲ef	۰/۱۸۶d	۰/۱۸۰gh	۰/۱۸۰gh	۰/۱۷۹h	۰/۱۷۹h	۰/۱۷۸A
Pb ₃₀₀	۰/۱۶۰k	۰/۱۸۱gf	۰/۱۸۷c	۰/۱۷۶i	۰/۱۸۳e	۰/۱۶۴j	۰/۱۶۴j	۰/۱۷۳A
	۰/۱۶۰E	۰/۱۸۳C	۰/۱۹۶A	۰/۱۸۲C	۰/۱۸۵B	۰/۱۷۵D	۰/۱۷۶D	
پتاسیم قابل استفاده								
Pb ₀	۴۲۶n	۵۲۵l	۶۳۷j	۶۷۶h	۹۱۳d	۷۶۸f	۱۱۳۹a	۷۲۶A
Pb ₁₅₀	۴۱۱o	۵۱۳m	۵۳۴k	۶۷۰i	۹۰۱e	۷۴۵g	۱۰۹۹b	۶۹۶B
Pb ₃₀₀	۴۰۱p	۵۱۳m	۵۳۴k	۶۷۰i	۹۱۳d	۷۴۵g	۱۰۷۹c	۶۹۳B
	۴۱۳G	۵۱۷F	۵۶۸E	۶۷۲D	۹۰۹B	۷۵۲C	۱۱۰۵A	

*میانگین‌های دارای حروف لاتین بزرگ و کوچک مشترک در هر ستون یا سطر در متن جدول در هر قسمت از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد معنادار نیستند.

۸.۴. تاثیر زغال‌های زیستی و سطوح سرب

بر غلظت پتاسیم قابل استفاده خاک

نتایج میانگین اثرات اصلی تیمار کاربرد سرب نشان داد که با افزایش سطوح سرب در خاک از Pb_0 به Pb_{300} ، غلظت پتاسیم قابل استفاده در خاک به طور معناداری کاهش یافت (۴/۵۴ درصد). هر چند بین تیمارهای Pb_{150} و Pb_{300} از نظر آماری تفاوت معنادار مشاهده نشد. همچنین کاربرد تمامی زغال‌های زیستی در خاک سبب افزایش معنادار پتاسیم قابل استفاده در خاک شد (جدول ۶). به طوری که بیشترین مقدار پتاسیم قابل استفاده مربوط به کاربرد زغال زیستی بقایای گندم در سطح ۳ درصد وزنی نسبت به تیمار شاهد (عدم کاربرد زغال زیستی) بود. ترتیب غلظت پتاسیم قابل استفاده در تیمارهای مختلف زغال زیستی به صورت زغال زیستی گندم < زغال زیستی ذرت < زغال زیستی پنبه < شاهد بود. نتایج داده‌ها نشان داد که با افزایش مقدار زغال زیستی از سطح ۱/۵ به ۳ درصد وزنی مقدار غلظت پتاسیم قابل استفاده خاک افزایش یافت. اثرات متقابل تیمارها نشان داد که به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار پتاسیم قابل استفاده در تیمارهای مرکب زغال زیستی بقایای ذرت در سطح ۳ درصد وزنی و بدون کاربرد سرب (GB_2+Pb_0) (۱۱۳۹ میلی‌گرم در کیلوگرم) و تیمار کاربرد سرب به میزان ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و بدون کاربرد زغال زیستی ($C+Pb_{300}$) (۴۰۱ میلی‌گرم در کیلوگرم) مشاهده شد.

کاربرد بیوپچار ذرت در یک خاک آهکی سبب افزایش معنادار پتاسیم قابل استفاده خاک می‌شود [۴۵]. نتایج تحقیقی در بررسی اثر کاربرد بیوپچار (بقایای گیاهی برنج) بر میزان پتاسیم خاک نشان داد که کاربرد بیوپچار باعث افزایش قابلیت پتاسیم در خاک شده است [۱۶]. کاربرد بیوپچار تهیه شده از کاه و کلش گندم در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس در سطح ۸ درصد وزنی، سبب افزایش قابلیت استفاده پتاسیم خاک به میزان ۲ درصد نسبت به تیمار

شاهد می‌شود که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد [۳۵]. در اثر کاربرد زغال زیستی تهیه شده از بقایای کلزا غلظت پتاسیم تبادلی در خاک افزایش می‌یابد [۴۶]. در تحقیقی نجفی قیری (۲۰۱۴) تأثیر کاربرد زغال زیستی را بر ویژگی‌های خاک بررسی نمود [۳۷]. یافته‌های ایشان نشان داد که مصرف زغال زیستی باعث افزایش معنادار پتاسیم محلول و تبادلی شد. ایشان افزایش پتاسیم محلول و تبادلی را ناشی از ارتباط تعادلی بین شکل‌های پتاسیم دانست. بدین معنی که با کاربرد زغال زیستی به خاک، پتاسیم موجود در آن وارد فاز محلول شده و به علت تعادل بین پتاسیم محلول و تبادلی، یون‌های پتاسیم از محلول خاک به نقاط تبادلی پخش می‌شوند و در نتیجه هر دو شکل محلول و تبادلی پتاسیم افزایش یافت.

به طور کلی نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد که افزایش کاربرد سطوح زغال‌های زیستی بقایای گیاهی گندم، ذرت و پنبه از سطح ۰ به سطح ۳ درصد وزنی سبب افزایش قابلیت هدایت الکتریکی، کربن آلی خاک، پ‌هاش خاک و کاهش غلظت سرب قابل استفاده در خاک شد. همچنین کاربرد انواع زغال‌های زیستی بقایای گیاهی گندم، ذرت و پنبه از سطح ۰ به سطح ۳ درصد وزنی سبب افزایش فراهمی آهن، منگنز، مس و پتاسیم قابل استفاده خاک شد. در بین زغال‌های زیستی مورد آزمون زغال زیستی گندم در سطح ۳ درصد وزنی از نظر تاثیر گذاری بر ویژگی‌های شیمیایی از جمله افزایش کربن آلی خاک، افزایش فراهمی پتاسیم و منگنز و کاهش فراهمی سرب در خاک نسبت به بقیه زغال‌های زیستی موثرتر بود. با توجه به فراوانی بقایای گیاهی گندم، ذرت و پنبه در کشور به ویژه در استان فارس، همچنین با در نظر گرفتن اثرات مثبت زغال‌های زیستی حاصل از آنها در امر بهبود ویژگی‌های خاک از جمله افزایش فراهمی برخی عناصر غذایی و کاهش زیست فراهمی عنصر سنگین سرب می‌توان از زغال‌های زیستی بقایای گیاهی گندم، ذرت و پنبه در قالب یک کود آلی پایدار برای بهبود خاک‌های مرتعی جهت اجرای پروژه‌های اصلاحی در

خاک‌های مرتعی در نقاط مختلف کشور، برای تایید این موضوع لازم است.

مراعات کشور استفاده کرد. انجام تحقیقات بیشتر در زمینه تاثیر کاربرد زغال‌های زیستی در امر بهبود ویژگی‌های

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 (*Triticum aestivum L.*) grown in a soil with aged contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 140, 37-47.
- [2] Al-Wabel, M. I., Hussain, Q. Usman, A. R. Ahmad, M. Abduljabbar, A. Sallam, A. S. and Ok, Y.S. (2017). Impact of biochar properties on soil conditions and agricultural sustainability: A review *Land Degradation and Development*, 29, 2124-2161.
- [3] Ansari- Mahabadi, A., Hajabbasi, M.A. Khademi, H. and Kazemian, H. (2007). Soil cadmium stabilization using an Iranian natural zeolite. *Geoderma*, 137, 388-393.
- [4] Atkinson, C.J. Fitzgerald, J.D. and Hips, N.A. (2010). Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *Plant and Soil*, 337: 1-18.
- [5] Baghaie, A.H. (2018). Effect of applying Shazand municipal compost waste and Saveh pomegranate peel biochar on decreasing Pb availability in soil and Sorghum plant. *Journal Health & Environ*, 11, 167-157.
- [6] Biri, M., Moezzi, A. and AmeriKhah, H. (2017). Effect of sugarcane bagasse made biochar on maize plant growth, grown in lead and cadmium contaminated soil. *Journal Water and Soil*, 31, 609-626.
- [7] Boostani, H. R., Najafi-Ghiri, M. Hardie, A. G. and Khalili, D. (2019). Comparison of Pb stabilization in a contaminated calcareous soil by application of vermicompost and sheep manure and their biochars produced at two temperatures. *Applied Geochemistry*, 102, 121-28.
- [8] Bremner, J.M. (1960). Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method. *Journal Agric. Sci*, 55, 11-33.
- [9] Brewer, C. E., Hu, Y.-Y. Schmidt-Rohr, K. Loynachan, T. E. Laird, D. A. and Brown, R. C. (2012). Extent of pyrolysis impacts on fast pyrolysis biochar properties. *J. Environmental Quality*, 41, 1115-1122.
- [10] Cimo G., Kucerik J. Berns A.E. Schaumann G.E. Alonzo G. and Conte P. (2014). Effect of heating time and temperature on the chemical characteristics of biochar from poultry manure. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62, 1912-1918.
- [11] Del Rio – Celestino, M., Font R. and More no – Rajas, R. (2006). Uptake of lead and zinc by wild plant growing on contaminated soils. *Industrial Crops and Products*, Article in press.
- [12] Demirbas, A. (2004). Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 72(2), 243-248.
- [13] Ding, Z., Hu, X. Wan, Y. Wang, S. and Gao, B. (2015). Removal of lead, copper, cadmium, zinc and nickel from aqueous solutions by alkali-modified biochar: Batch and column tests. *Journal Ind. Engin. Chem*, 15, 300-307.
- [14] Gathorne-Hardy, A., Knight, J. and Woods, J. (2008). Surface application of biochar to pasture changes in yield, diversity, forage quality, and its incorporation into the soil. Poster presented at the 2nd Annual meeting of the International Biochar Initiative (IBI), Newcastle, UK.
- [15] Gee, G.W. and Bauder, J.W. (1986). Particle-Size Analysis. In: Klute, A., Ed., *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, Agronomy Monograph No. 9, 2nd Edition, American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, Madison, WI, 383-411.
- [16] Haefele, S., Konboon, Y. Wongboon, W. Amarante, S. Maarifat, A. Pfeiffer, E. and Knoblauch, C. (2011). Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems. *Field Crops Research*, 121, 430-440.
- [17] Havlin, J. L., Beaton, J. D. Tisdale, S. L. and Nelson, W. L. (2005). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management (Vol. 515): Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.*

- [18] Hejazizadeh, A., Gholamalizadeh Ahangar, A., Ghorbani, M. (2016). Effect of Biochar on Lead and Cadmium Uptake from Applied Paper Factory Sewage Sludge by *Heliantus annus*. Journal Water and Soil Science, 26, 259-271.
- [19] Ippolito J.A., Ducey, T.F. Cantrell, K.B. Novak, J.M. and Lentz, R.D. (2016). Designer, acidic biochar influences calcareous soil characteristics. Chemosphere, 142, 184-191.
- [20] 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. Applied Soil Research, 8, 1-17.
- [21] Khadem, A., Raiesi, F. and Besharati, H. (2018). The effects of corn biochar on the chemical and microbiological characteristics of two calcareous clay and sandy soils. Journal Soil Management and Sustainable Production, 8, 25-47.
- [22] Khademi-jolgeh, A., Fekri, M. and Mahmoodaadi, M. (2018). The Effect of Different Pistachio Wastes Biochar Application on Some Fertility Properties of a Loam Soil. Iranian Journal of Soil and Water Research, 50, 231-246.
- [23] Knudsen, D., Peterson, G.A. and Pratt, P.F. (1982). Lithium, sodium and potassium. P 225-246, In: A.L. Page (ed.), Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Madison, WI: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.
- [24] Laird, D. A., Fleming, P. Davis, D. D. Horton, R. Wang, B. and Karlen, D. L. (2010). Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. Geoderma, 158, 443-449.
- [25] Lehmann, J. and Joseph, S. (2009). Biochar for Environmental Management: Science and Technology. Earthscan, London & Sterling, VA. 416p.
- [26] Lehmann, J., and Joseph, S. eds. (2015). Biochar for environmental management: science, technology and implementation. Routledge.
- [27] Lehmann, J., da Silva, J. P. Steiner, C. Nehls, T. Zech, W. and Glaser, B. (2003). Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. Plant and soil, 249, 343-357.
- [28] Lentz, R. and Ippolito, J. (2012). Biochar and manure affect calcareous soil and corn silage nutrient concentrations and uptake. Journal Environmental Quality, 41, 1033-1043.
- [29] Lian, F. and Xing, B. (2017). Black carbon (biochar) in water/soil environments: Molecular structure, sorption, stability, and potential risk. Environmental Science and Technology, 51, 13517-13532.
- [30] Lindsay, W.L. and Norvel, W.A. (1978). Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Sci. Soc. Amer. Journal, 42, 421-428
- [31] Major, G. (2010). Guidelines on Practical Aspects of Biochar Application to Field Soil in various Soil Management Systems. International Biochar Initiative. Document Version Information: Ver. 1.0,9.
- [32] Malakouti, M.J. and Homaie, M. (2004). Soil Fertility of Arid and Semiarid Regions, Problems and Solutions. Second edition, publisher, Tarbiat Modarres University, Tehran.
- [33] Melo, C.A., Coscionc, A.R. Aberu, C.A. Puga, A.P. and Camargo, O.A. (2013). Influence of pyrolysis temperature on cadmium and zinc sorption capacity of sugar cane straw derived biochar. Bio Resources, 8, 4992-5004.
- [34] Mendez, A., Gomez, A. Paz-Ferreiro, J. and Gasco, G. (2012). Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil. Chemosphere, 89, 1354-1359.
- [35] Moradi, N., Rasouli-Sadaghiani, M.H. and Sepehr, E. (2017). Effect of biochar types and rates on some soil properties and nutrients availability in a calcareous soil. Journal Water and Soil, 31, 1232-1246.
- [36] Naeem, M.A., Khalid, M. Aon, M. Abbas, G. Tahir, M. Amjad, M. Murtaza, B. Yang, A. and Akhtar, S.S. (2017). Effect of wheat and rice straw biochar produced at different temperatures on maize growth and nutrient dynamics of a calcareous soil. Archives of Agronomy and Soil Science, 63, 2048-2061.
- [37] Najafi, M. G. (2015). Effect of different biochars application on some soil properties and nutrients availability in a calcareous soil. Iranian Journal of Soil Research, 29, 352-358.

- [38] 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 Book Series No. 5. Soil science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, pp, 961-1010.
- [39] Novak, J.M. Lima, I. Xing, B., Gaskin, J.W. Steiner, C. Das, K. (2009). Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science*, 3:195-206.
- [40] Olsen, S.R. and Sommers, L.E. (1982). Phosphorus. In: Page A. L. et al. (Ed.), Methods of Soil analysis. Part 2, 2nd (Ed.), Argon. Mongr. 9. ASA and Soil Science Society of America, Madison, WI, 1143p.
- [41] Olsen, S.R., Kole, C.W. Wantanabe, F.S. and Dean, L.A. (1954). Estimation of available Phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate, Circular. US Dept of Agriculture, p. 939.
- [42] Probert, M.E. and Moody, P.W. (1998). Relating phosphorus quantity, intensity and buffer capacity to phosphorus uptake. *Aus. J. of Soil Research*, 36, 389-394.
- [43] Rayment, G.E. and Higginson, F.R. (1992). Laboratory handbook of soil and water chemical methods. Inkata Press, Melbourne, 330p.
- [44] Rengasamy, P. and Churchman, G.J. (1999). Cation exchange capacity, exchangeable cations 415 and sodicity. P 147-157, In: K.I. Peverill, L.A. Sparrow and D.J. Reuter (eds.), *Soil analysis: an interpretation manual*. Melbourne, CSIRO Publishing.
- [45] Song, D., Tang, J. Xi, X., Zhang, S. Liang, G., Zhou, W. and Wang, X. (2018). Responses of soil nutrients and microbial activities to additions of maize straw biochar and chemical fertilization in a calcareous soil. *European Journal Soil Biology*, 84, 1-10.
- [46] Sousaraee, N., Baranimotlagh, M. Khormali, F. Dordipour, E. (2019). The Effect of Biochars Prepared from Agricultural Residues at Different Temperatures on Some Chemical Properties of a Calcareous Soil and Na and K Concentration of Corn (*Zea mays*). *Applied Soil Research*, 7, 164-179. [47] Sparks, D. L. (2003). *Environmental soil chemistry*, Academic Press. San Diego.
- [48] Sun, Y., GAO, B. Yao, Y., Fang, J. Zhang, M. Zhou, Y. Chen, H. and Yang, L. (2014). Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties. *Chemical Engineering Journal*, 240, 574-578.
- [49] Uchimiya, M., Klasson, K.T. Wartelle, L.H. and Lima, I.M. (2011). Influence of soil properties on heavy metal sequestration by biochar amendment: 1. Copper sorption isotherms and the release of cations. *Chemosphere*, 82, 1431-1437.
- [50] Usman, A.R.A., Al-Wabel, M.I. Ok, Y.S. AL-Harbi, A. Wahb-Allah, M. El-Naggar, A.H. Ahmad, M. Al-Faraj, A. and Al-Omran, A. (2016). *Conocarpus Biochar Induces Changes in Soil Nutrient Availability and Tomato Growth Under Saline Irrigation*. *Pedosphere*, 26, 27-38.
- [51] Vahedi, R., and Rasouli-Sadaghiani, M.H. (2019). The effect of application of biochar and pruning waste compost with plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on availability of macronutrient in wheat rhizosphere. *Applied Soil Research*, 6, 16-30.
- [52] Yang, X., Liu, J. McGrouther, K. Hung, H. Lu, K. Gao, X. He, L. Lin, X. Che, L. Ye, Z. and Wang, H. (2015). Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) and enzyme activity in soil. *Environ, Sci. Pollut. Res*, 22, 3183-3190.
- [53] Yu, H., Zou, W. Chen, J. Chen, H. Yu, Z., Huang, J. Tang, H. Wei, X. and GAO, B. (2019). Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review. *J. Environmental Management*, 232, 8-21.
- [54] Wang, M., Zhu, Y. Cheng, L. Anderson, B. Zhao, X. Wang, D. and Ding, A. (2018). Review on utilization of biochar for metal-contaminated soil and sediment remediation. *Journal Environ. Sci*, 63, 56-173.
- [55] Zhang, H., Xu, M. and Zhan, F. (2009). Long-term effect of manure application on grain yield under different cropping systems and ecological conditions in china. *Journal of Agricultural Science*, 147, 31-42.
- [56] Zolfi -Bavariani, M., Ronaghi, A. Karimian, N. Ghasemi, R. and Yasrebi, J. (2016). Effect of poultry manure derived biochars at different temperatures on chemical properties of a calcareous soil. *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*, 20, 73-86

