

تأثیر بیوچار پسماند گل رز شاخه بریده بر صفات مورفولوژیک و فلزات سنگین در گیاه کاهو (*Lactuca sativa* L.) رقم "سیاهو"

اکرم ولی زاده قلعه بیگ^۱، سید حسین نعمتی^{۱*}، حجت امامی^۲ و حسین آروبی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۱۴)

چکیده

بیوچار، دسترسی زیستی طیف وسیعی از آلاینده ها، از جمله فلزات سنگین، را کاهش می دهد. به منظور بررسی تأثیر بیوچار حاصل از پسماند گل رز شاخه بریده بر شاخص های رشدی و تجمع فلزات سنگین سرب و کادمیوم در کاهو، آزمایشی گلخانه ای به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار انجام شد. مقدار بیوچار رز در سه سطح (صفر به عنوان شاهد، ۵ و ۱۰ گرم در کیلوگرم)، کادمیوم در سه سطح (صفر به عنوان شاهد، ۱۰ و ۲۰ میلی گرم در کیلوگرم) و سرب در سه سطح (صفر به عنوان شاهد، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم در کیلوگرم) مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار صفات سطح برگ، وزن تازه و خشک اندام هوایی و حجم ریشه در سطح ۵ گرم در کیلوگرم بیوچار رز مشاهده شد. افزایش سطح بیوچار رز از ۵ به ۱۰ گرم در کیلوگرم سبب کاهش کلیه صفات، به جز ارتفاع و قطر اندام هوایی، شد. به کارگیری ۶۰۰ میلی گرم در کیلوگرم سرب به ترتیب سبب کاهش ۶/۹۲، ۱۳/۳۸، ۱۸/۰۴، ۲۲/۴۴، ۱۲/۰۶ و ۸/۶۱ درصدی صفات تعداد برگ، وزن تازه و خشک اندام هوایی، وزن تازه و وزن خشک ریشه و طول ریشه نسبت به تیمار شاهد شد. بیشترین مقدار وزن تازه و خشک اندام هوایی و حجم ریشه در تیمار ۵ گرم در کیلوگرم بیوچار رز و سطح ۳۰۰ میلی گرم در کیلوگرم سرب و کمترین مقدار کلیه صفات ذکر شده در بالاترین سطوح بیوچار و سرب مشاهده شد. افزایش سطح بیوچار از صفر به ۵ و ۱۰ گرم در کیلوگرم در سطح ۲۰ میلی گرم در کیلوگرم کادمیوم، به ترتیب سبب کاهش ۴۷/۹۲ و ۲۴/۱۷ درصدی مقدار کادمیوم ریشه شد. در واقع، بیوچار رز (به ویژه در سطح ۵ گرم در کیلوگرم) از طریق کاهش زیست فراهمی سرب و کادمیوم در خاک، شاخص های رشدی کاهو را بهبود بخشیده است.

واژه های کلیدی: ضایعات کشاورزی، اصلاح خاک، سرب، کادمیوم

مقدمه

انرژی و سوخت، فاضلاب ها و تصفیه خانه ها و کاربرد کودها و علف کش ها، مشکلات بسیار زیاد زیست محیطی بروز کرده است (۳۱). فلزات سنگین موجود در محیط (خاک و هوا)،

امروزه با توجه به گسترش فعالیت های انسانی در زمینه های مختلف مانند صنایع خودروسازی، معادن، ذوب فلزات، تولید

۱. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: nemati@um.ac.ir

اکسیژن کم و یا بدون اکسیژن است (۲۳). پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام شده است که به برخی از آنها اشاره می‌شود. طبق گزارش لیو و همکاران (۱۸)، بیوچار لجن فاضلاب از طریق کاهش فراهمی فلزات سنگین کادمیوم، سرب، مس، روی و کروم منجر به افزایش رشد کلم (*Brassica pekinensis* L.) شد. بیوچار بادام هندی (*Anacardium occidentale* L.)، زیست‌توده ماده خشک گیاه ذرت (*Zea mays* L.) را افزایش و غلظت فلزات سنگین را در ساقه ذرت کاهش داد (۱). طبق گزارش پارک و همکاران (۲۴)، کاربرد بیوچار کود مرغی به میزان ۱٪، مقدار بیومس خشک ساقه و ریشه کلزا (*Brassica juncea* L.) را افزایش داد. در دانه برنج (*Oryza sativa* L.) کاربرد بیوچار منجر به کاهش محتوای سرب و کادمیوم شد (۶). با افزایش مقدار بیوچار باگاس نیشکر (صفر، ۱/۵، ۲/۲۵ و ۳/۰ تن در هکتار) قابلیت دسترسی فلزات سنگین برای اندام هوایی و ریشه‌های کلم چینی (*Brassica chinensis* L.) کاهش یافت (۳۰). طبق نتایج وانگ و همکاران (۳۲) کاربرد دو نوع بیوچار مشتق‌شده از کلش ذرت (*Zea mays* L.) و کود خوکی اثر فوق‌العاده‌ای بر ارتقاء رشد گیاه کاهو و کاهش غلظت فلزات سنگین روی و کادمیوم داشت. مطابق گزارش ژانگ و همکاران (۳۶)، کاربرد بیوچار بقایای برنج (*Oryza sativa* L.) سبب کاهش غلظت کادمیوم و سرب به میزان ۹۸ و ۷۲ درصد شد. طبق گزارش هوبن و همکاران (۱۲) کاربرد بیوچار در خاک آلوده به سرب و کادمیوم، سبب کاهش غلظت این عناصر در اندام هوایی و ریشه‌های کلزا (*Brassica juncea* L.) و تولید زیست‌توده سه برابر شد. کرمی و همکاران (۱۶) کاهش فراهمی و تحرک سرب و مس را در چاوددار (*Secale montanum* L.) تحت شرایط کاربرد بیوچار گزارش کردند. به‌طور کلی، با توجه به مشکلات سوزاندن بقایای گیاهی در کشور و همچنین افزایش تجمع فلزات سنگین در گیاهان، اهمیت ارائه یک راهکار مناسب برای کاهش آثار مخرب آلاینده‌های زیست‌محیطی الزامی است. بدین منظور، مطالعه‌ای با هدف بررسی کاربرد بیوچار حاصل از پسماندهای گل‌های شاخه بریده رز بر تجمع فلزات سنگین سرب و کادمیوم

توسط گیاهان جذب و به اندام هوایی منتقل می‌شوند. این امر منجر به اختلال در متابولیسم، رشد و عملکرد گیاهان می‌شود (۲۵). در میان فلزات سنگین، سرب پتانسیل بیشتری در آلوده کردن محیط، گیاهان و در نتیجه ایجاد مسمومیت در انسان دارد. آلودگی این فلز در گیاهان مناطق اطراف بزرگراه‌ها معمولاً از متوسط تا بسیار شدید بوده و غلظت سرب در آنها در دامنه غلظت بحرانی و فراتر از آن می‌تواند قرار گیرد (۴). کادمیوم نیز به‌عنوان یک عنصر غیرضروری، فلز سنگین و سمی برای گیاه محسوب شده و مانع از رشد اندام هوایی گیاهان می‌شود (۵). مهم‌ترین بخش از آلودگی عنصر کادمیوم از طریق کودهای فسفاته و معادن سرب و روی به زمین‌های کشاورزی وارد می‌شود (۷). سبزی‌ها منبع اصلی مواد معدنی، ویتامین‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها و سایر مواد غذایی مفید برای تغذیه انسان هستند. سبزی‌های برگ‌ی نسبت به سایر محصولات در تأمین این ترکیبات از اهمیت بیشتری برخوردارند. از طرفی، این گروه از سبزی‌ها حساسیت بیشتری نیز به غلظت‌های زیاد فلزات سنگین و سایر آلاینده‌ها نشان می‌دهند. کاهو از جمله مهم‌ترین سبزی‌های برگ‌ی و منبع اصلی ویتامین‌ها و مواد معدنی است که آلودگی آن تهدیدی جدی برای سلامت انسان‌ها محسوب می‌شود. لذا، در پرورش آن از حیث آلودگی به فلزات سنگین باید توجه زیادی صورت گیرد (۲۸).

در حال حاضر، روش‌های متعددی برای مقابله با آلودگی‌های خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. اصلاح خاک به‌روش‌های فیزیکی، شیمیایی و یا بیولوژیک امکان‌پذیر است. هدف این روش‌ها جداسازی، کاهش و تثبیت عوامل آلودگی در حد امکان است (۳۲). در سال‌های اخیر، استفاده از بیوچار به‌عنوان یک جاذب و اصلاح‌کننده طبیعی آلودگی‌های خاک به‌دلیل داشتن مزایایی چون بهبود کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک، افزایش عملکرد محصول، بهبود جذب عناصر غذایی توسط گیاهان، افزایش نگهداشت آب خاک، افزایش گنجایش تبادل کاتیونی و بهبود ساختمان خاک افزایش یافته است. در واقع، بیوچار، زغال نیم‌سوخته حاصل از فرایند پیرولیز مواد آلی در دمای زیاد و

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

رس	سیلت	شن	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	pH	رسانایی الکتریکی	ماده آلی	گنجایش	نقطه پژمردگی دائم	سرب	کادمیوم
(%)	(%)	(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)		(dS/m)	(%)	زراعی	(درصد وزنی)	(ppm)	(ppm)
۱۲	۱۸	۷۰	۸/۲۵	۱/۲۲	۲۵/۰۱	۶/۷	۱/۲۰	۰/۲۸۱	۲۴/۴	۱۲/۵	Nd	Nd

Nd: Not detectable (قابل تشخیص نبود)

و شاخص‌های مورفولوژیک گیاه کاهو، به‌عنوان گیاه شاخصی که مستعد تجمع آلاینده‌های فلزی است، صورت گرفت.

گیرند، مخلوط شد. ویژگی‌های شیمیایی بیوچار در جدول (۲) ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر بیوچار حاصل از پسماند گل شاخه بریده رز بر ویژگی‌های مورفولوژیک و تجمع فلزات سنگین در گیاه کاهو، آزمایشی در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در گلخانه پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. پس از توزین هر گلدان با ارتفاع ۲۵ و عرض دهانه ۳۰ سانتی‌متر، گلدان‌ها به‌نسبت ۱:۲ از خاک زراعی سطحی و شن پر شدند. سپس، خاک مورد نظر برای تعیین بافت خاک و عناصر تشکیل‌دهنده آن مورد تجزیه قرار گرفت. بر اساس نتایج آزمون، بافت خاک از نوع لوم شنی بود و عناصر تشکیل‌دهنده آن نیز در جدول (۱) ارائه شده‌اند. در این آزمایش، مقادیر بیوچار رز در سه سطح (صفر به‌عنوان شاهد، ۵ و ۱۰ گرم در کیلوگرم) و مقادیر فلزات سنگین هر یک در سه سطح شامل سرب (صفر به‌عنوان شاهد، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) و کادمیوم (صفر به‌عنوان شاهد، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) مورد استفاده قرار گرفت. پسماند گل‌های شاخه بریده رز شامل ساقه و برگ، به‌وسیله کوره‌ی پیرولیز در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس، طی فرایند تجزیه حرارتی در کوره الکتریکی در شرایط اکسیژن محدود (در قوطی در بسته) و طی مدت زمان دو ساعت به بیوچار تبدیل شد (۴)، سپس، بیوچارهای تهیه‌شده به‌میزان ۵ و ۱۰ گرم در کیلوگرم با خاک گلدان‌هایی که می‌بایست تحت تیمار قرار

برای آلوده‌کردن خاک، مقادیر محاسبه‌شده نمک فلزات سنگین از دو منبع نترات کادمیوم و نترات سرب به‌صورت محلول در آب مقطر تهیه شده و با استفاده از اسپری محلول‌پاشی شده و با خاک مخلوط شد. در این آزمایش، از بذر کاهوی اصلاح شده (*Lactuca sativa L.*) رقم "سیاهو" برای تهیه نشاء استفاده شد و یک عدد نشاء در مرحله چهاربرگی به‌هر گلدان منتقل شد. آبیاری گلدان‌ها بر اساس ۱۰۰٪ گنجایش زراعی خاک و در هر هفته یک‌بار انجام شد. پایان آزمایش، زمان حداکثر رشد رویشی کاهو بود (۹۰ روز پس از کشت بذر) و شاخص‌های مورفولوژیک مانند تعداد برگ، سطح برگ، ارتفاع بخش هوایی، قطر بخش هوایی، وزن تازه اندام هوایی، وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه، وزن خشک ریشه و حجم و طول ریشه مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین، وضعیت عناصر فلزی سرب و کادمیوم در اندام‌های هوایی (برگ و ساقه)، زیرزمینی و خاک مورد بررسی قرار گرفت. روش‌های مورد استفاده در اندازه‌گیری فاکتورهای مختلف به‌طور مستقل در ادامه شرح داده است.

اندازه‌گیری صفات مورفولوژیک

در مرحله حداکثر رشد رویشی، صفات تعداد برگ، سطح برگ، ارتفاع بخش هوایی، قطر بخش هوایی، وزن تازه اندام هوایی، وزن خشک اندام هوایی، وزن تازه ریشه، وزن خشک ریشه، حجم و طول ریشه اندازه‌گیری شد. ارتفاع و قطر بخش هوایی

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار مورد استفاده

۰/۳۵	رسانایی الکتریکی (dS/m)
۲۴/۹۸	گنجایش تبادل کاتیونی (cmol _c /kg)
۰/۲۲	چگالی ظاهری (g/cm ^۳)
۷/۵	pH
۵/۸	درصد خاکستر
۱/۷	نیترژن (%)
۰/۱۵	فسفر (%)
۱/۲۶	پتاسیم (%)

با خط‌کش، سطح برگ با استفاده از دستگاه سطح‌سنج برگ (Li-Cor, Model Li-1300, USA) اندازه‌گیری شد. سپس، اقدام به توزین جداگانه اندام هوایی و ریشه‌ها کرده و اندام‌های مذکور در داخل آون (دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۷۲ ساعت) قرار داده شدند و در نهایت وزن خشک آنها به‌طور جداگانه محاسبه شد. حجم ریشه از طریق اختلاف حجم ایجاد شده پس از قرار دادن ریشه در حجم مشخصی از آب تعیین شد (۲).

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS و مقایسه میانگین‌ها بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ ($p < 0.05$) انجام شد. نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel رسم شدند.

نتایج و بحث

صفات مورفولوژیک

با توجه به نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳)، اثر سطوح مختلف بیوچار رز، سرب، کادمیوم و برهم‌کنش آنها برای صفات سطح برگ، وزن تازه بخش هوایی و حجم ریشه معنی‌دار ($p < 0.01$) بود. اما سطوح مختلف کادمیوم در مورد صفات تعداد برگ، ارتفاع و قطر اندام هوایی، وزن تازه و طول ریشه و سطوح مختلف سرب در مورد ارتفاع و قطر اندام هوایی، اثر معنی‌داری را نشان نداد. برهم‌کنش سطوح رز و کادمیوم، در مورد کل صفات و برهم‌کنش سطوح رز و سرب در مورد کل صفات، به‌جز طول ریشه، در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شد. همچنین، برهم‌کنش سطوح سرب و کادمیوم بر صفات قطر و وزن خشک اندام هوایی و طول ریشه تأثیر معنی‌داری نداشت. بیشترین

اندازه‌گیری غلظت سرب و کادمیوم در خاک و اندام‌های گیاه سه گرم از هر یک از نمونه‌های خشک شده خاک و عبور داده شده از الک دو میلی‌متری و نیز دو گرم از نمونه‌های خشک شده اندام هوایی و ریشه‌های کاهو که توسط آسیاب برقی آسیاب شده بودند، در لوله‌های پیرکس ۲۵۰ میلی‌لیتری قرار داده شد. هضم اولیه در دمای اتاق به مدت ۱۶ ساعت توسط ۲۸ میلی‌لیتر از اسید کلریدریک ۳۷٪ و اسید نیتریک ۷۰٪ به نسبت ۱:۳ انجام شد. سپس، محلول سوسپانسیون روی گرم‌کن در دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس به مدت دو ساعت جوشانده شد تا نمونه‌ها هضم شدند. محلول به‌دست آمده توسط کاغذ واتمن شماره ۴ صاف شد و توسط اسید نیتریک ۰/۵ مول بر لیتر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد و در بطری‌های پلی‌اتیلنی در دمای ۴ درجه سلسیوس برای آنالیز نگهداری شد. سپس غلظت سرب و کادمیوم در نمونه‌ها با استفاده از دستگاه جذب اتمی

جدول ۳. تجزیه واریانس آثار سطوح بیوجار رز، سرب، کادمیوم و برهمکنش آنها بر صفات مورفولوژیک کاهو

طول ریشه	حجم ریشه	وزن خشک ریشه	وزن تازه ریشه	وزن خشک هوایی	وزن تازه هوایی	اندام هوایی قطر	اندام هوایی ارتفاع	سطح برگ	تعداد برگ	درجه آزادی	منابع تغییر
۸۴/۸۹**	۹۸۰/۵۹**	۳۳۶/۶۶**	۵۰۱/۱۹**	۱۳۱/۰۲**	۳۲۸۲/۶۰**	۸۹/۲۶**	۷۴/۴۲**	۳۰۹۵/۱۷**	۸۵/۳۳**	۲	سطح بیوجار رز
۳۱/۳۶**	۲۵۵/۰۰**	۱۶/۰۸**	۵۲۰/۴۴**	۱۱۲/۳۲**	۳۲۳۱/۶۱**	۶/۷۱ ^{ns}	۸/۰۶ ^{ns}	۲۰۹۲/۱۹**	۱۷/۱۹*	۲	سطح سرب
۹/۷۳ ^{ns}	۵۱۰/۶۷**	۷۹/۹۱**	۰/۲۲ ^{ns}	۲۲/۱۶**	۷۹۴۰/۵۵**	۱۲/۱۸ ^{ns}	۰/۴۳ ^{ns}	۵۹۴۳/۹۴**	۳/۴۴ ^{ns}	۲	سطح کادمیوم
۶/۱۷ ^{ns}	۵۲۱۲/۳۱**	۲۷/۵۵**	۲۸۲/۸۴**	۱۱۹/۹۵**	۲۵۱۶/۳۵**	۵۰/۱۶**	۴۵/۵۷**	۲۰۰۳/۵۱**	۳۴/۱۱**	۴	بیوجار رز × سرب
۲۵/۱۵**	۱۴۶/۷۳**	۱۶/۰۶**	۷۵/۷۶**	۵۵/۳۵**	۸۳۹۵/۳۸**	۱۸/۱۶**	۲۷/۰۳**	۶۸۷۵/۱۹**	۴۲/۶۱**	۴	بیوجار رز × کادمیوم
۷/۹۳ ^{ns}	۷۲/۳۵**	۱۰/۷۳*	۶۶/۷۴**	۴/۹۵ ^{ns}	۹۹۳/۶۷**	۵/۵۹ ^{ns}	۲۰/۰۳**	۱۱۷۸/۳۴**	۶۶/۸۸**	۴	سرب × کادمیوم
۲۹/۳۰**	۲۲۱/۱۴**	۲۲/۶۶**	۱۱۲/۹۴**	۴۶/۵۱**	۸۸۳۲/۵۵**	۲۴/۷۹**	۲۴/۸۰**	۸۶۸۵/۹۹**	۶۴/۹۰**	۸	بیوجار رز × سرب × کادمیوم
۴/۶۰	۲۰/۱۶	۳/۱۵	۸/۲۱	۴/۴۳	۱۷۹/۶۷	۴/۸۴	۴/۴۲	۲۸۱/۵۷	۴/۴۵	۸۱	خطای آزمایش
۱۰/۴۰	۱۳/۶۸	۱۹/۸۸	۱۰/۰۶	۱۲/۴۴	۱۰/۱۳	۱۱/۶۸	۱۱/۷۹	۵/۸۳	۱۱/۰۹		ضریب تغییرات (%)

ns و * به ترتیب بیانگر اثر معنی دار در سطوح احتمال ۱/۰ و ۵/۰٪ و بدون اثر معنی دار است.

جدول ۴. مقایسه میانگین آثار اصلی سطوح بیوچار رز، سرب و کادمیوم بر میانگین صفات مورفولوژیک کاهو

تیمار	تعداد برگ	سطح برگ (cm ²)	ارتفاع اندام هوایی (cm)	قطر اندام هوایی (mm)	وزن تازه اندام هوایی	وزن خشک اندام هوایی	وزن تازه ریشه	وزن خشک ریشه	حجم ریشه (cm ³)	طول ریشه (cm)	بیوچار رز (گرم در کیلوگرم)		
											سرب (میلی گرم در کیلوگرم)	کادمیوم (میلی گرم در کیلوگرم)	تفاوت معنی‌داری ندارند.
۰	۱۹/۹۱ ^a	۲۵۷/۱۱ ^c	۱۶/۲۲ ^b	۱۷/۰۱ ^b	۱۰۰/۳۰ ^c	۱۵/۹۶ ^b	۳۰/۹۷ ^a	۱۱/۶۴ ^a	۳۳/۶۶ ^b	۲۲/۰۱ ^a	بیوچار رز (گرم در کیلوگرم)	سرب (میلی گرم در کیلوگرم)	کادمیوم (میلی گرم در کیلوگرم)
۵	۱۹/۹۱ ^a	۳۱۵/۶۶ ^a	۱۸/۲۹ ^a	۱۹/۶۳ ^a	۱۶۰/۳۲ ^a	۱۹/۱۲ ^a	۳۰/۲۷ ^a	۸/۶۰ ^b	۳۷/۵۵ ^a	۲۰/۸۶ ^b	سرب (میلی گرم در کیلوگرم)	کادمیوم (میلی گرم در کیلوگرم)	تفاوت معنی‌داری ندارند.
۱۰	۱۷/۲۵ ^b	۲۸۹/۲۷ ^b	۱۸/۹۸ ^a	۱۹/۸۳ ^a	۱۳۶/۰۷ ^b	۱۵/۶۸ ^b	۲۴/۱۹ ^b	۶/۵۴ ^c	۲۷/۲۲ ^c	۱۸/۹۷ ^c	سرب (میلی گرم در کیلوگرم)	کادمیوم (میلی گرم در کیلوگرم)	تفاوت معنی‌داری ندارند.
۰	۱۹/۶۳ ^a	۲۷۹/۲۳ ^b	۱۷/۲۹ ^a	۱۹/۲۷ ^a	۱۴۱/۴۶ ^a	۱۸/۱۸ ^a	۳۲/۷۹ ^a	۹/۷۰ ^a	۳۱/۸۰ ^b	۲۱/۵۸ ^a	سرب (میلی گرم در کیلوگرم)	کادمیوم (میلی گرم در کیلوگرم)	تفاوت معنی‌داری ندارند.
۳۰۰	۱۹/۱۶ ^{ab}	۲۸۸/۴۵ ^a	۱۸/۱۶ ^a	۱۸/۷۹ ^a	۱۳۲/۶۹ ^b	۱۷/۶۸ ^a	۲۷/۲۱ ^b	۸/۵۶ ^b	۳۵/۸۳ ^a	۲۰/۵۴ ^b	سرب (میلی گرم در کیلوگرم)	کادمیوم (میلی گرم در کیلوگرم)	تفاوت معنی‌داری ندارند.
۶۰۰	۱۸/۲۷ ^b	۲۹۴/۳۶ ^a	۱۸/۰۴ ^a	۱۸/۴۱ ^a	۱۲۲/۵۳ ^c	۱۴/۹۰ ^b	۲۵/۴۳ ^c	۸/۵۳ ^b	۳۰/۸۰ ^b	۱۹/۷۲ ^b	سرب (میلی گرم در کیلوگرم)	کادمیوم (میلی گرم در کیلوگرم)	تفاوت معنی‌داری ندارند.
۰	۱۸/۰۹ ^a	۳۰۱/۶۶ ^a	۱۷/۹۱ ^a	۱۸/۵۱ ^a	۱۴۸/۵۴ ^a	۱۷/۷۰ ^a	۲۸/۳۹ ^a	۹/۲۶ ^b	۳۶/۵۰ ^a	۲۰/۴۰ ^a	سرب (میلی گرم در کیلوگرم)	کادمیوم (میلی گرم در کیلوگرم)	تفاوت معنی‌داری ندارند.
۱۰	۱۹/۰۸ ^b	۲۸۳/۵۸ ^b	۱۷/۷۰ ^a	۱۸/۴۷ ^a	۱۲۸/۶۶ ^b	۱۶/۹۳ ^{ab}	۲۸/۵۱ ^a	۷/۳۰ ^c	۲۸/۹۷ ^c	۲۱/۲۰ ^a	سرب (میلی گرم در کیلوگرم)	کادمیوم (میلی گرم در کیلوگرم)	تفاوت معنی‌داری ندارند.
۲۰	۱۹/۳۰ ^b	۲۷۶/۸۰ ^b	۱۷/۸۷ ^a	۱۹/۵۰ ^a	۱۱۹/۴۹ ^c	۱۶/۱۳ ^b	۲۸/۵۳ ^a	۱۰/۲۳ ^a	۳۲/۹۷ ^b	۲۰/۲۳ ^a	سرب (میلی گرم در کیلوگرم)	کادمیوم (میلی گرم در کیلوگرم)	تفاوت معنی‌داری ندارند.

در هر ستون و برای هر گروه، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال ۵٪ تفاوت معنی‌داری ندارند.

در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد (۱۱). هاوارد و همکاران (۱۳)، نامگی و همکاران (۲۱) در گیاه ذرت (*Zea mays* L.) و حجازی‌زاده و همکاران (۱۰) در گیاه آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.)، افزایش وزن تازه و خشک ریشه را در شرایط کاربرد بیوچار نسبت به تیمار شاهد و ااکاری و همکاران (۳۰) در گندم (*Triticum aestivum* L.) و کولتون و همکاران (۱۷) در فلفل گلخانه‌ای (*Capsicum annuum* L.)، افزایش عملکرد را گزارش کرده‌اند. با توجه به اینکه ماهیت بیوچار ماده آلی است، استفاده از بیوچار در خاک‌های فقیر از مواد آلی، علاوه بر تأمین ماده آلی خاک، موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک خاک نیز دسترسی عناصر غذایی مانند پتاسیم، کلسیم، منیزیم، سدیم، فسفر، روی، آهن و نیتروژن، افزایش فتوسنتز و میزان رنگدانه‌ها منجر به افزایش کیفیت و عملکرد محصولات مختلف شده است (۳۶). حال آنکه طبق نتایج این آزمایش و برخی آزمایش‌های دیگر، کاربرد مقادیر زیاد

مقدار صفات سطح برگ، وزن تازه و خشک اندام هوایی و حجم ریشه در سطح ۵ گرم در کیلوگرم بیوچار رز مشاهده شد. افزایش سطح بیوچار رز از سطح ۵ به ۱۰ گرم در کیلوگرم سبب کاهش کلیه صفات، به‌جز ارتفاع و قطر اندام هوایی، شد (جدول ۴). با توجه به سطوح بیوچار و نوع ماده اولیه آن، تأثیر بیوچار بر میزان زیست‌توده و سایر صفات مورفولوژیک متفاوت است. برخی از پژوهش‌ها در اثبات این مسئله به شرح زیر است.

استفاده از بیوچار چوب درخت اکالیپتوس (*Eucalyptus camaldulensis* L.) در خاک، به دلیل افزایش عناصر غذایی کم‌مصرف و پرمصرف، به ویژه فسفر و پتاسیم، باعث افزایش زیست‌توده پیاز بهاره (*Allium cepa* L.) نسبت به گیاهان شاهد شد (۳۴). افزودن بیوچار به خاک، از طریق بهبود ویژگی‌های فیزیکی و فراهمی آب در خاک، وزن خشک شاخساره گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) را

سایر فعالیت‌های مرتبط با حضور آب از جمله فعالیت آنزیمی، متابولیسم سلولی، فتوسنتز، تنفس و تعرق کاهش یافته و در نتیجه آن تسریع پیری، کاهش در وزن تازه و خشک ریشه، کاهش در زیست‌توده و افت عملکرد کمی و کیفی رخ می‌دهد (۲۲ و ۲۷).

با توجه به نتایج مقایسه میانگین برهمکنش بیوچار رز و سرب (جدول ۵)، بیشترین مقدار وزن تازه و خشک اندام هوایی و حجم ریشه در تیمار ۵ گرم در کیلوگرم بیوچار رز و سطح ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب، بیشترین مقدار وزن تازه، خشک و طول ریشه در تیمار ۵ گرم در کیلوگرم بیوچار رز و سطح صفر میلی‌گرم در کیلوگرم سرب، بیشترین مقدار سطح برگ در تیمار ۵ گرم در کیلوگرم بیوچار رز و سطح ۶۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب و کمترین مقدار کلیه صفات ذکر شده در تیمار ۱۰ گرم در کیلوگرم بیوچار رز و سطح ۶۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب مشاهده شد. همچنین، با توجه به نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سطوح بیوچار رز و کادمیوم (شکل ۱)، در دو سطح ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم، تیمار ۵ گرم در کیلوگرم بیوچار رز نسبت به شاهد سبب افزایش سطح برگ شد. در حالی که با افزایش سطح آن به ۱۰ گرم در کیلوگرم، کاهش در سطح برگ مشاهده شد. مطابق نتایج پژوهشگران، به دلیل آثار منفی فلزات سنگین، به‌ویژه کادمیوم، بر فعالیت هورمون‌های گیاهی، به‌ویژه سیتوکینین که نقش اصلی در تقسیم سلولی و رشد گیاه دارد، سمیت ناشی از آن باعث افت کیفیت و کاهش عملکرد گیاهان می‌شود (۱۵).

غلظت سرب و کادمیوم

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۶) نشان می‌دهد که آثار ساده و برهمکنش سطوح مختلف بیوچار رز، سرب و کادمیوم برای کلیه صفات در سطح خطای ۱٪ معنی‌دار شد؛ به‌جز موارد برهمکنش بیوچار رز و سرب و برهمکنش بیوچار رز و کادمیوم، که در مورد صفت مقدار سرب اندام هوایی در سطح خطای ۵٪ معنی‌دار شد. مطابق شکل (۲)، با افزایش سطح

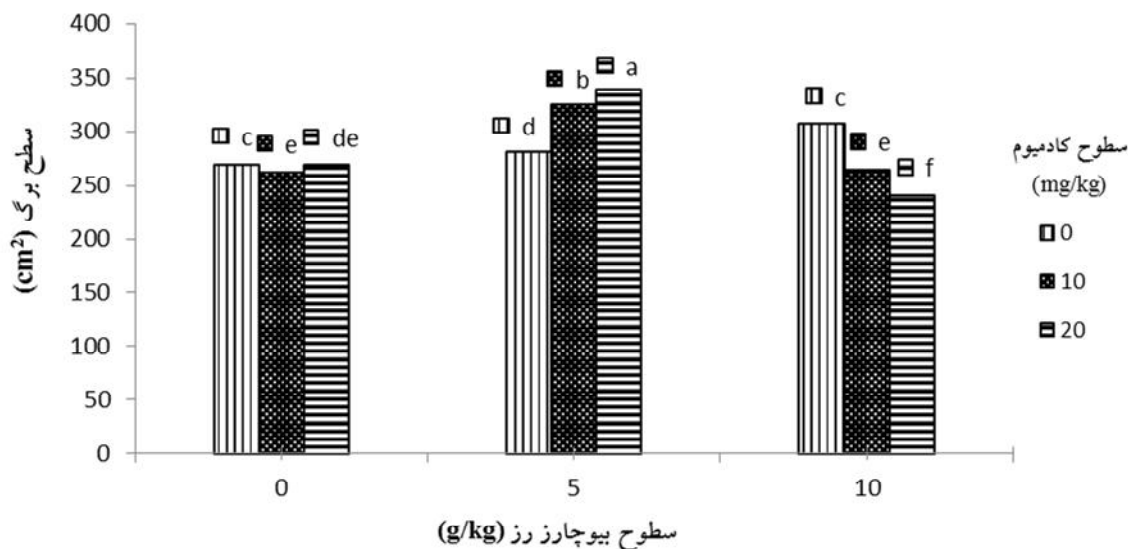
بیوچار، نتیجه عکس داده و منجر به کاهش رشد و عملکرد محصول می‌شود. طبق گزارش سالاری (۲۶)، کاربرد بیوچار بقایای پسته (*Pistacia vera* L.) در دو سطح ۵ و ۱۰ گرم در کیلوگرم باعث افزایش وزن خشک زیست‌توده اندام هوایی و ریشه ذرت (*Zea mays* L.) شد و سطح ۲۰ گرم در کیلوگرم به دلیل افزایش جذب سدیم و شوری محیط ریشه، باعث کاهش این شاخص‌ها شد. مطابق نتایج برخی پژوهشگران دیگر نیز علت کاهش رشد گیاه در شرایط به‌کارگیری سطوح بالای بیوچار، افزایش شوری خاک گزارش شده است (۱۳ و ۳۵).

به‌کارگیری ۶۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب به ترتیب سبب کاهش ۶/۹۲، ۱۳/۳۸، ۱۸/۰۴، ۲۲/۴۴، ۱۲/۰۶ و ۸/۶۱ درصدی صفات تعداد برگ، وزن تازه و خشک اندام هوایی، وزن تازه و وزن خشک ریشه و طول ریشه نسبت به شاهد شد. مطابق نتایج مقایسه میانگین اثرهای اصلی سطوح کادمیوم، بیشترین و کمترین وزن تازه بخش هوایی به ترتیب ۱۴۸/۵۴ و ۱۱۹/۴۹ گرم، در تیمار صفر و ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم به دست آمد. همچنین، با افزایش مقدار مصرف کادمیوم از صفر به ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، کاهش صفات تعداد و سطح برگ، وزن تازه و خشک اندام هوایی و حجم ریشه مشاهده شد (جدول ۴). آزادی و همکاران (۲)، گزارش کردند که میزان جذب فلزات سنگین تابعی از غلظت آن در خاک است و با افزایش سطح فلز، جذب آن نیز افزایش می‌یابد تا به یک حد بیشینه رسیده و پس از آن ثابت می‌شود. بنابراین، با افزایش سطح کاربرد کادمیم، غلظت کادمیم در گیاهان تربچه و اسفناج افزایش یافت و به دلیل افزایش سمیت ناشی از آن، وزن تازه و خشک این گیاهان کاهش نشان داد. لوسیبا و همکاران (۱۹) با افزایش غلظت کادمیوم، کاهش وزن خشک اندام هوایی و ریشه را در گیاه نخود و ژانگ و همکاران (۳۵) کاهش در وزن خشک بخش هوایی و ریشه، طول ریشه، ارتفاع بخش هوایی گندم و جلالی‌پور (۱۴) کاهش ارتفاع گیاه و وزن خشک ریشه آفتاب‌گردان را گزارش کردند. در واقع، در شرایط تنش فلزات سنگین، جذب آب و عناصر غذایی محدود شده و در نتیجه

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر برهمکنش سطوح بیوچار رز و سرب بر میانگین صفات مورفولوژیک کاهو

طول ریشه (cm)	حجم ریشه (cm ³)	ریشه خشک (g/pot)	وزن تازه ریشه (g/pot)	وزن تازه خشک (g/pot)	وزن هوایی ریشه (g/pot)	وزن تازه هوایی (g/pot)	قطر اندام هوایی (mm)	ارتفاع اندام هوایی (cm)	سطح برگ (cm ²)	تعداد برگ	تیمار	بیوچار رز	
												سرب (mg/kg)	(g/kg)
۲۲/۵ ^o ab	۲۴/۷۵ ^f	۱۲/۸۳ ^{ab}	۳۵/۹۶ ^{ab}	۱۵/۷۸ ^{ef}	۱۲۶/۱۹ ^d	۱۶/۰۴ ^e	۱۳/۷۵ ^d	۲۷۹/۳۱ ^{de}	۲۰/۱۶ ^a	۰	۰	۰	
۲۱/۵۴ ^{abc}	۳۶/۸۵ ^{bc}	۹/۹۸ ^b	۲۵/۳۵ ^{de}	۱۴/۳۴ ^f	۹۷/۲۹ ^e	۱۶/۸۷ ^{de}	۱۶/۴۱ ^c	۲۵۴/۷۴ ^e	۱۹/۱۶ ^{ab}	۳۰۰	۰	۰	
۲۱/۳۷ ^{bc}	۳۴/۰۸ ^{cd}	۱۰/۵۰ ^b	۳۱/۶۱ ^b	۱۷/۷۸ ^{cd}	۱۲۰/۱۴ ^d	۱۸/۱۲ ^{cd}	۱۸/۵۰ ^a	۲۷۴/۱۸ ^e	۲۰/۴۱ ^o a	۶۰۰	۰	۰	
۲۳/۱۲ ^a	۳۸/۶۶ ^{ab}	۱۴/۱۱ ^a	۳۷/۲۶ ^a	۱۹/۸۰ ^{ab}	۱۴۶/۳۵ ^{bc}	۲۱/۶۲ ^a	۱۹/۷۰ ^o a	۳۰۵/۹۷ ^b	۱۹/۲۵ ^{ab}	۰	۰	۰	
۲۰/۷۰ ^{cd}	۴۲/۱۶ ^a	۸/۲۲ ^c	۲۷/۵۸ ^{cd}	۲۱/۱۴ ^a	۱۷۸/۰۵ ^a	۲۰/۶۶ ^a	۱۸/۴۱ ^{ab}	۳۱۱/۴۱ ^b	۲۰/۶۶ ^a	۳۰۰	۰	۰	
۱۹/۳۷ ^{de}	۳۷/۲۵ ^{bc}	۷/۰۸ ^{cd}	۲۵/۹۷ ^{de}	۱۶/۴۲ ^{de}	۱۵۶/۵۴ ^b	۱۶/۶۲ ^{de}	۱۶/۸۵ ^{bc}	۳۲۹/۵۹ ^a	۱۹/۸۳ ^a	۶۰۰	۰	۰	
۱۹/۱۲ ^{de}	۳۲/۰۵ ^{de}	۶/۴۰ ^{de}	۲۵/۱۵ ^e	۱۷/۶۳ ^{cd}	۱۳۷/۷۷ ^c	۲۰/۱۶ ^{ab}	۱۸/۴۱ ^{ab}	۲۸۹/۳۱ ^{cd}	۱۹/۵۰ ^a	۰	۰	۰	
۱۹/۳۷ ^{de}	۲۸/۵۸ ^e	۷/۶۴ ^{cd}	۲۸/۷۰ ^e	۱۸/۹۰ ^{bc}	۱۴۴/۲۵ ^c	۱۸/۸۳ ^{bc}	۱۹/۶۶ ^a	۲۹۹/۲۰ ^{bc}	۱۷/۶۶ ^b	۳۰۰	۰	۰	
۱۸/۴۱ ^e	۲۱/۰۸ ^g	۵/۷۸ ^e	۱۸/۷۱ ^f	۱۰/۵۱ ^g	۸۳/۴۶ ^f	۲۰/۵۰ ^{ab}	۱۸/۸۷ ^a	۲۴۲/۴۱ ^f	۱۴/۵۸ ^e	۶۰۰	۰	۰	

در هر ستون، میانگین‌هایی که حداقل در یک حرف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ دارای تفاوت معنی‌داری نیستند.



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر برهمکنش سطوح بیوجار رز و کادمیوم بر میزان سطح برگ؛ میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال ۵٪، تفاوت معنی‌داری ندارند.

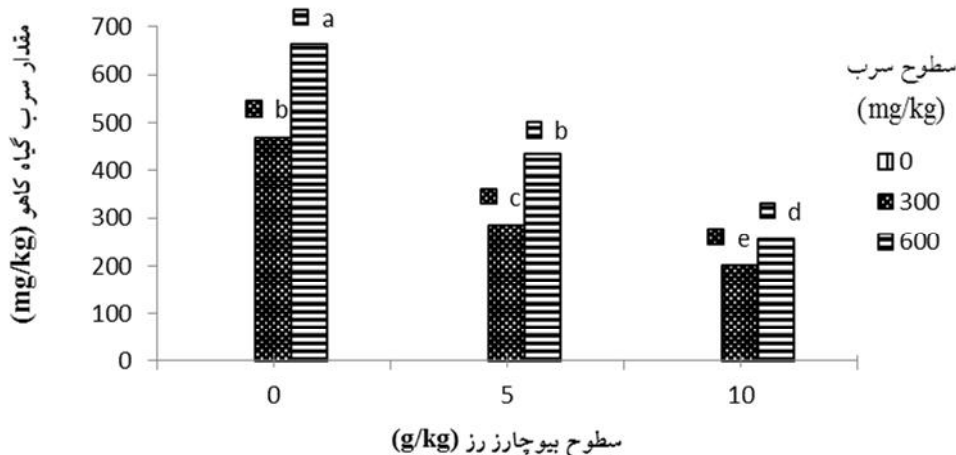
خود رسوب داده و باعث کاهش جذب این دو عنصر در اندام هوایی گیاه کلزا (*Brassica juncea* L.)، به ترتیب از ۶ و ۵ به ۱ میکروگرم بر گرم شده است. طبق گزارش نادری (۲۰)، با افزایش سطح بیوجار پوست انار، کاهش در میزان کادمیوم اندام هوایی گیاه توت‌فرنگی مشاهده شد، که علت آن را ترکیب فلز با گروه‌های عاملی فراوان بیوجار ذکر کرد. یونس و همکاران (۳۳) با افزایش سطح بیوجار غوزه پنبه از ۳ به ۵ درصد، کاهش غلظت کادمیوم اندام هوایی را در شنبلیله از ۵/۴۲ به ۳/۴۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در اسفناج از ۷/۷۲ به ۳/۸۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش کردند، که علت این کاهش را تغییر بخشی از کادمیوم از فرم قابل جذب به فرم غیرقابل جذب در حضور بیوجار دانستند. پژوهش‌هایی که توسط بیسلی و همکاران (۴) روی بیوجار تهیه شده از زباله سبز و کود مرغی انجام شد، نشان داد که با افزایش سطح بیوجار، افزایش pH و کربن آلی خاک رخ داده که منجر به عدم تحرک کادمیوم و مس و افزایش تثبیت آنها در خاک شده و در نتیجه غلظت این عناصر در گیاه خردل هندی کاهش یافته است. نامگی و همکاران (۲۱) در بررسی‌هایی که انجام دادند به این نتیجه رسیدند که کاهش معنی‌داری در غلظت کادمیوم موجود در اندام هوایی گیاه ذرت

بیوجار، مقدار سرب گیاه کاهو (اندام هوایی + ریشه) برای سطوح مختلف سرب کاهش پیدا کرده است، حال آنکه مطابق شکل (۳)، با افزایش سطوح بیوجار و سرب، مقدار سرب خاک افزایش یافته است. بیشترین مقدار کادمیوم ریشه در شرایط عدم کاربرد بیوجار و در سطح ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم، ۲۷۱/۲۲ میلی‌گرم در کیلوگرم است، که با افزایش سطح بیوجار از صفر به ۵ و ۱۰ گرم در کیلوگرم در سطح ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم، به ترتیب کاهش ۴۷/۹۲ و ۲۴/۱۷ درصدی در مقدار کادمیوم ریشه مشاهده شد (شکل ۴). به‌طور کلی، با افزایش سطح سرب و کادمیوم، میزان جذب در اندام هوایی نیز افزایش یافت. این امر به دلیل افزایش فراهمی عناصر فلزی و نیز افزایش جذب آن توسط ریشه گیاه است. حال آنکه در حضور تیمارهای مختلف بیوجار، کاهش در غلظت سرب و کادمیوم در اندام هوایی و ریشه و افزایش در خاک رخ داده است. پژوهشگران مختلف، طی پژوهش‌هایی که انجام داده‌اند به این نتیجه رسیده‌اند که جذب سطحی بیوجار، دستیابی زیستی آلاینده‌های فلزی را برای گیاه کاهش می‌دهد (۳۴). طبق نتایج فیاض و همکاران (۸)، بیوجار به دلیل داشتن سطح ویژه زیاد و همچنین ساختار بسیار متخلخل، سرب و کادمیوم را در سطح

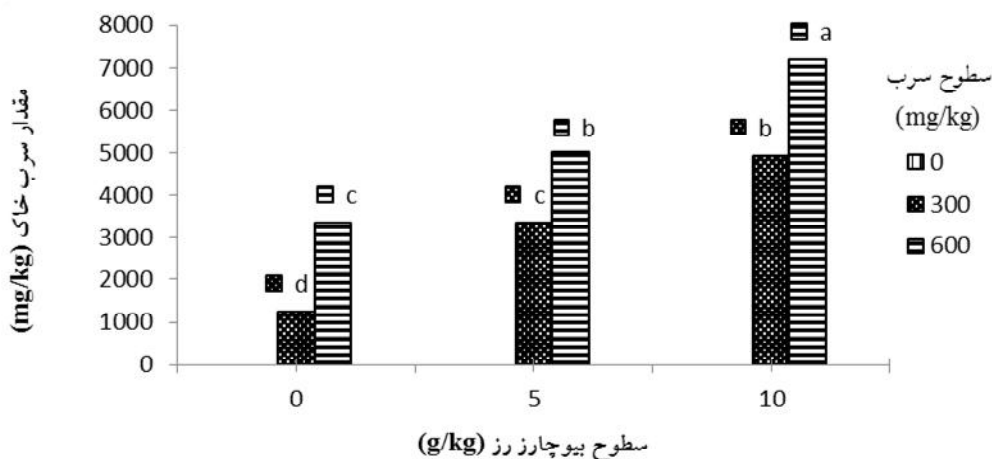
جدول ۶. تجزیه واریانس میانگین مربعات اثر سطوح بیوچار رز، سرب و کادمیوم بر مقدار تجمع و جذب عناصر سرب و کادمیوم در اندام هوایی، ریشه و خاک و گیاه کاهو

مقدار کادمیوم	مقدار سرب		مقدار کادمیوم		مقدار کادمیوم		مقدار کادمیوم		مقدار سرب		مقدار سرب		مقدار سرب		درجه آزادی	منابع تغییر
	گیاه	ریشه	خاک	مقدار کادمیوم	مقدار کادمیوم	مقدار کادمیوم	مقدار کادمیوم	مقدار کادمیوم	مقدار کادمیوم	مقدار سرب	مقدار سرب	مقدار سرب	مقدار سرب	مقدار سرب		
۹۸۰۵۷/۹۵**	۴۶۸۶۳۰/۸۶**	۶۵۰۰۶/۴۰**	۲۲۰۹۲/۳۰**	۴۲۵۶/۴۹**	۵۶۷۲۱۶۶۶/۸۰**	۱۱۱۶۴۳/۹۹**	۱۲۴۸۷۶/۶۹**	۲	بیوچار رز							
۲۰۵۲۵/۶۰**	۱۹۳۷۱۵۵/۹۷**	۱۶۳۳۸/۸۷**	۱۲۸۲/۳۸*	۲۰۵/۸۱**	۲۴۶۴۴۹۷۲۲۹/۸**	۷۶۴۵۶۹/۱۳**	۲۶۸۸۱۳/۶۵**	۲	سرب							
۳۸۸۳۵۷/۸۸*	۹۲۷۱/۳۷**	۲۷۹۴۹۹/۲۶**	۱۳۲۹۲۶/۵۲**	۹۵۱۸/۳۷**	۶۶۱۴۹۸/۸۰**	۱۲۳۳۰/۲۱**	۴۹۸۱/۶۶**	۲	کادمیوم							
۱۵۵۷/۳۴**	۱۳۲۷۴۴/۰۲**	۱۲۰۷/۸۰**	۸۱۲/۸۵**	۶۱/۱۴**	۱۴۴۵۴۷۸۴/۰۰**	۳۵۰۰۶/۳۳**	۳۹۴۸۰/۶۳*	۴	بیوچار رز × سرب							
۳۱۴۵۶/۵۳**	۵۹۳۰/۳۴**	۲۲۶۴۰/۳۵**	۵۷۶۴۸۷**	۱۱۷/۸۲**	۲۸۳۹۵۳/۰۰**	۳۶۹۳/۱۲**	۵۲۲/۱۵*	۴	بیوچار رز × کادمیوم							
۶۷۳۰/۳۸*	۴۳۲۰۷/۴۷**	۵۵۸۹/۶۵**	۹۸۱/۲۲**	۵۲/۶۳**	۴۹۰۴۲۹/۵۰**	۱۸۲۶۵/۹۳**	۱۰۰۳۷/۸۰**	۴	سرب × کادمیوم							
۱۴۴۶/۲۳**	۱۰۲۱۹/۹۷**	۱۵۶۵/۲۸*	۴۹۹/۲۳**	۴۹/۶۶**	۲۱۱۴۱۴۴/۸**	۴۵۹۰/۸۶**	۲۴۵۵/۵۹**	۸	بیوچار رز × سرب × کادمیوم							
۱۹۲/۸۶	۴۱۹/۰۹	۱۷۵/۴۵	۸۶/۵۸	۴/۲۸	۴۳۷۴۴/۵۰	۲۵۶/۶۶	۱۶۶/۵۴	۸۱	خطای آزمایش							
۱۲/۸۸	۷/۹۸	۱۳/۸۹	۱۳/۶۲	۱۱/۳۳	۷/۵۰	۹/۹۶	۱۳/۴۷		ضریب تغییرات							

*, ** و ns به ترتیب بیانگر اثر معنی دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و بدون اثر معنی دار است.



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر برهمکنش سطوح بیوچار رز و سرب بر میزان سرب گیاه کاهو؛ میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال ۵٪، تفاوت معنی‌داری ندارند.

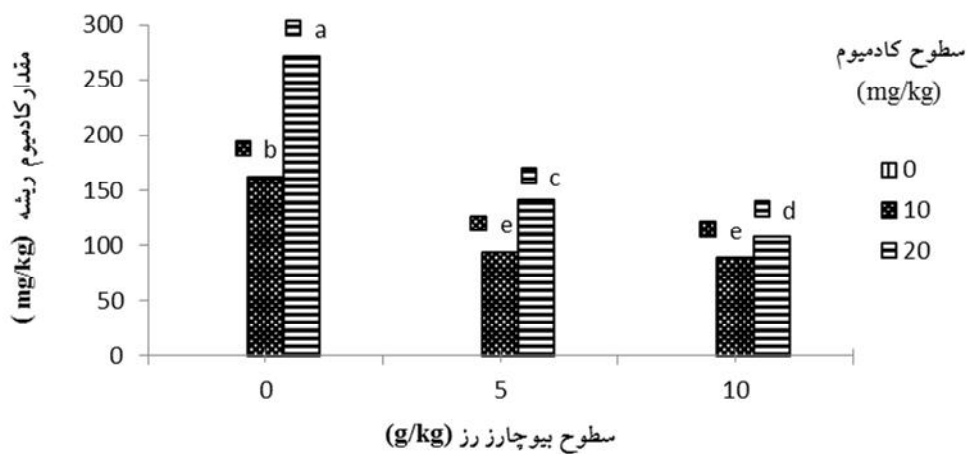


شکل ۳. مقایسه میانگین اثر برهمکنش سطوح بیوچار رز و سرب بر میزان سرب خاک؛ میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال ۵٪، تفاوت معنی‌داری ندارند.

بین ۷-۹ دارد، علاوه بر افزایش pH خاک‌های اسیدی، موجب کاهش همزمان در تحرک فلزات کاتیونی می‌شود. اما افزودن آن به خاک‌های خنثی یا قلیایی ممکن است موجب کاهش در تحرک فلزات نشود (۹). همچنین، بررسی‌ها نشان داده است که بیوچار فعالیت‌های میکروبی خاک را افزایش می‌دهد که همین مسئله می‌تواند باعث تحریک تجزیه آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین و در نهایت کاهش تجمع در گیاهان شود (۲۹). با توجه به نتایج آزمایش حاضر، بیوچار پسماند رز دارای

(*Zea mays* L.) در سطح ۱۵ گرم بر کیلوگرم بیوچار حاصل از چوب فعال رخ داد که می‌تواند به علت تشکیل کمپلکس مواد آلی- فلز باشد.

با توجه به تولید بیوچار در دماهای زیاد، سطح ویژه آن افزایش می‌یابد، که این سطح بزرگ و جذب سطحی فراوان بیوچار منجر به ایجاد یک سوله میکروبی در خاک سمی شده و بدین طریق بر تحرک آلاینده‌های فلزی تأثیر گذاشته و آن را محدود می‌کند (۳۶). از طرفی، افزودن بیوچار که معمولاً pH



شکل ۴. مقایسه میانگین برهمکنش سطوح بیوجار رز و کادمیوم بر میزان کادمیوم ریشه؛ میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال ۵٪، تفاوت معنی‌داری ندارند.

مشاهده شد. افزایش سطح بیوجار رز از سطح ۵ به ۱۰ گرم در کیلوگرم سبب کاهش کلیه صفات، بجز ارتفاع و قطر اندام هوایی، شد. در واقع، مقدار زیاد بیوجار به دلیل ایجاد محدودیت دسترسی به عناصر غذایی منجر به کاهش اغلب صفات مورفولوژیک و رشد گیاه کاهو شده است. با افزایش سطح بیوجار، مقدار سرب و کادمیوم در اندام هوایی و ریشه کاهش و در خاک افزایش پیدا کرد. مطابق نتایج این آزمایش، مقدار ۵ گرم در کیلوگرم بیوجار رز، به طور مؤثری توانست از طریق بهبود ویژگی‌های فیزیکی و بیولوژیک خاک و کاهش زیست‌فراهمی سرب و کادمیوم، ویژگی‌های مورفولوژیک و رشدی گیاه کاهو را بهبود بخشد. از این رو، مطالعه انواع بیوجار حاصل از پسماند محصولات کشاورزی، به‌ویژه سایر گل‌های شاخه بریده، در بحث بررسی بهبود رشد گیاهان و اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین و سایر آلاینده‌ها پیشنهاد می‌شود.

ظرفیت قابل توجهی در غیرمتحرک کردن و کاهش انحلال سرب و کادمیوم است، که توانسته است از طریق جذب سرب و کادمیوم و نگهداری آنها در ساختار درونی خود، از جذب آن توسط ریشه گیاه و تجمع در اندام هوایی بکاهد.

نتیجه‌گیری

گل‌های رز شاخه بریده پس از حذف خار، ساقه و برگ‌های اضافی به بازار عرضه می‌شود. بنابراین، میزان قابل توجهی پسماند پس از پاک‌سازی رز شاخه بریده در گلخانه‌های محل تولید و گلفروشی‌ها تولید می‌شود. از آنجایی که این پسماند در سایر موارد از جمله علوفه دام غیر قابل استفاده است، تولید بیوجار راهکاری مناسب و مقرون به صرفه در به‌کارگیری این نوع پسماند است. به‌طور کلی، بر اساس نتایج این پژوهش، بیشترین مقدار صفات سطح برگ، وزن تازه و خشک اندام هوایی و حجم ریشه در سطح ۵ گرم در کیلوگرم بیوجار رز

منابع مورد استفاده

- Al-Wabel, M.I., R.A. Usman, H. El-Naggar, A. Aly, M. Ibrahim, S. Elmaghraby and A. Al-Omran. 2015. Conocarpus biochar as a soil amendment for reducing heavy metal availability and uptake by maize plants. Saudi J. Biol. Sci. 22: 503–511.
- Azadi, F., A. Kasraian and N. Karimiyan. 2014. Effect of soil cadmium contamination on growth indices of spinach and radish. Iran. J. Soil Res. 28(3): 522–530. (In Persian)

3. Baba, A., F.S. Erees and H.S. Cam. 2008. An assessment of the quality of various bottled mineral water marketed in turkey. *Environ. Monit. Assess.* 85: 139–177.
4. Beesley, L., E. Moreno-Jiménez and J. Gomez-Eyles. 2010. Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil. *Environ. Pollut.* 158: 272–287.
5. Chen, D., X. Liu, R. Bian, K. Cheng, X. Zhang, J. Zheng, S. Joseph, D. Crowley, G. Pan and L. Li. 2018. Effects of biochar on availability and plant uptake of heavy metals-A meta-analysis. *J. Environ. Manage.* 222: 76–85.
6. Cui, L., L. Li, A. Zhang, G. Pan, D. Bao and A. Chang. 2011. Biochar amendment greatly reduces rice Cd uptake in a contaminated paddy soil: A two-year field experiment. *Bioresour.* 6(3): 2605–2618.
7. Deng, H.Z., H. Ye and M.H. Wong. 2004. Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wet land plant species thriving in metal contaminated sites in China. *Environ. Pollut.* 132: 29–40.
8. Fiaz, K., S. Danish, U. Younis, S. Malik, M.R. Shah and S. Niaz. 2014. Drought impact on Pb/Cd toxicity remediated by biochar in *Brassica campestris*. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 14: 845–854.
9. Gomez, J.L., T. Sizmur, M. Collins and E. Hodson. 2011. Effects of biochar and the earthworm *Eisenia fetida* on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons and potentially toxic elements. *Environ. Pollut.* 159: 616–622.
10. Hejazizadeh, A., A. Gholamalizadeh Ahangar and M. Ghorbani. 2016. Effect of biochar on lead and cadmium uptake from applied paper factory sewage sludge by sunflower (*Helianthus annuus* L.). *J. Water Soil Sci.* 26(2): 259–271. (In Persian)
11. Hossain, M.K., V. Strezov, K.Y. Chan and P.F. Nelson. 2010. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Chemosphere* 78: 1167–1171.
12. Houben, D., L. Evrard and P. Sonnet. 2013. Beneficial effects of biochar application to contaminated soils on the bioavailability of Cd, Pb and Zn and the biomass production of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Biomass Bioenerg* 57: 196–204.
13. Howard, T. 2011. The effect of biochar on the root development of corn and soybeans in Minnesota soil and sand. *Int. Biochar Initiative*, pp.1–23.
14. Jalalipour, S. 2014. The biochar effect on yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.) and cadmium bioavailability in soil. MSc. Thesis, University of Zabol, Zabol, Iran.
15. Jiang, X., Y. Luo, Q. Liu, S. Liu and Q. Zhao. 2004. Effects of cadmium on nutrient uptake and translocation by Indian mustard. *Environ. Geol. Health* 26: 319–324.
16. Karami, N., R. Clemente, E. Moreno-Jimenez, N.W. Lepp and L. Beesley. 2011. Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass. *J. Hazard. Mater.* 191: 41–48.
17. Kolton, M., Y. Meller Harel, Z. Pasternak, E.R. Graber, Y. Elad and E. Cytryn. 2011. Impact of biochar application to soil on the root-associated bacterial community structure of fully developed greenhouse pepper plants. *Appl. Environ. Microb.* 77: 4924–4930.
18. Liu, T., B. Liu and W. Zhang. 2014. Nutrients and heavy metals in biochar produced by sewage sludge pyrolysis: Its application in soil amendment. *Polish J. Environ. Stud.* 23(1): 271–275.
19. Lusiba, S., J. Ogola and J. Odhiambo. 2017. Effect of biochar and phosphorus fertilizer application on soil fertility: Soil physical and chemical properties. *Agron. Soil Sci.* 63(4): 477–490.
20. Naderi, S. 2016. Effect of pomegranate peel biochar on reducing cadmium stress in vegetative stage of strawberry. MSc. Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. (In Persian)
21. Namgay, T., B. Singh and B.P. Singh. 2010. Influence of biochar application to soil on the availability of As, Cd, Cu, Pb, and Zn to maize (*Zea mays* L.). *Soil Res.* 48: 638–647.
22. Nie, C., X. Yang, N. Niazi, K. Xu, X. Wen, Y. Rinklebe, J. Sikok, Y.S. Xu and H. Wang. 2018. Impact of sugarcane bagasse-derived biochar on heavy metal availability and microbial activity: A field study. *Chemosphere* 18: 303–461.
23. O'Connor, D., T. Peng, J. Zhang, D.C.W. Tsang, D.S. Alessi, Z. Shen, N.S. Bolan and D. Hou. 2018. Biochar application for the remediation of heavy metal polluted land: A review of in situ field trials. *Sci. Total Environ.* 162: 619–620.
24. Park, J.H., G.K. Choppala, N.J. Sirangie, W. Chung and T. Chuasavathi. 2011. Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. *Plant Soil* 348: 439–451.
25. Paz-Ferreiro, J., H. Lu, S. Fu, A. Mendez and G. Gasco. 2013. Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: A review. *Solid Earth Discuss.* 5: 2155–2179.
26. Salari, M. 2014. Effects of pistachio residues biochar on corn up take zinc and cadmium. MSc. Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. (In Persian)
27. Sharma, P. and R.S. Ubej. 2005. Lead toxicity in plants. *Plant Physiol.* 17: 35–52.

28. Souri, M.K., N. Alipanahi and G. Tohidloo. 2016. Heavy metal content of some leafy vegetable crops grown with waste water in southern suburb of Tehran-Iran. *Veg. Sci.* 43(2): 156–162.
29. Steinbeiss, S., G. Gleixner and M. Antonietti. 2009. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biol. Biochem.* 41: 1301–1310.
30. Vaccari, F.P., S. Baronti, E. Lugato, L. Genesio, S. Castaldi, F. Fornasie and F. Miglietta. 2011. Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat. *Eur. J. Agron.* 34: 231–238.
31. Wang, S., Y. Xu, N. Norbu and Z. Wang. 2017. Remediation of biochar on heavy metal polluted soils. *Earth Environ. Sci.* 108: 331–342.
32. Wang, T., H. Sun, X. Ren, B. Li and H. Mao. 2017. Evaluation of biochars from different stock materials as carriers of bacterial strain for remediation of heavy metal-contaminated soil. *Sci. Rep.* 7: 121–138.
33. Younis, U., M.F. Qayyum, M.H.R. Shah, S. Danish, A.N. Shahzad, S.A. Malik and S. Mahmood. 2015. Growth, survival, and heavy metal (Cd and Ni) uptake of spinach (*Spinacia oleracea*) and fenugreek (*Trigonella corniculata*) in a biochar-amended sewage-irrigated contaminated soil. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 178: 209–217.
34. Yu, X.Y., G.G. Ying and R.S. Kookana. 2009. Reduced plant uptake of pesticides with bio-char additions to soil. *Chemosphere* 76: 665–671.
35. Zhang, G., M. Fukami and H. Sekimoto. 2000. Genotypic differences in effects of cadmium on growth and nutrient compositions in wheat. *J. Plant Nutr.* 23: 1337–1350.
36. Zhang, X. 2013. Using biochar for remediation of heavy metals. *Soil Sci. Soc. Am.* 69: 1651–1658.

The Effect of Cutflower-Rose Waste Biochar on Morphological Traits and Heavy Metals in Lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Syaho)

A. Valizadeh Ghale Beig¹, S. H. Nemati^{1*}, H. Emami² and H. Aroie¹

(Received: 5 January 2019 ; Accepted : 4 June 2019)

Abstract

Biochar reduces the bioavailability of a wide range of pollutants, especially heavy metals (HMs). To evaluate the effects of waste biochar of cutflower rose on growth characteristics and accumulation of lead (Pb) and cadmium (Cd) HMs of in lettuce, a factorial experiment, based on completely randomized design, with four replications was conducted. The amount of rose biochar at 3 levels (0, 5 and 10 g/kg), Cd at 3 levels (0, 10 and 20 mg/kg) and Pb at 3 levels (0, 300, 600 mg/kg) were tested. Results showed that the highest amount of leaf area, fresh and dry weight of shoots, and root volume were observed at 5 g/kg level of rose biochar. Increasing the rose-biochar level from 5 to 10 g/kg decreased all traits except height and diameter of shoots. Application of 600 mg/kg Pb decreased the number of leaves, fresh and dry weight of the shoots, fresh and dry weights of roots, and root length by 6.92, 13.38, 18.04, 22.44, 12.66 and 8.61%, respectively, compared to the control treatment. The highest amount of fresh and dry weight of shoots and root volume was observed in 5 g/kg rose biochar and 300 mg/kg Pb treatment, and the least amount of all of the abovementioned traits was observed at the highest levels of biochar and Pb. Increasing the level of biochar from zero to 5 and 10 g/kg and 20 mg/kg of Cd reduced the loss of root Cd by 92.9 and 24.17 percent, respectively. In fact, rose biochar (especially at 5 g/kg level) has improved the lettuce growth characteristics by reducing the bioavailability of Pb and Cd in the soil.

Keywords: Agricultural wastes, Soil amendment, Lead, Cadmium.

1. Dept. of Hort. Sci., College of Agric, Ferdowsi Univ. of Mashhad, Mashhad, Iran.

2. Dept. of Soil Sci., College of Agric, Ferdowsi Univ. of Mashhad, Mashhad, Iran.

* Corresponding Author, Email: nemati@um.ac.ir