

بررسی تأثیر بیوچارهای مختلف بر جذب کادمیم و رشد گیاه کاهو (*Lactuca sativa* L.) در یک خاک آلوده شده

ندا مرادی^۱، میرحسن رسولی صدقیانی^{۲*}، ابراهیم سپهر^۳

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۰۴ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۴/۲۷

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه

۲- استاد، گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه

۳- دانشیار، گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.rsadaghiani@urmia.ac.ir

چکیده

بیوچار به عنوان یک اصلاح کننده خاک می‌تواند با تأثیر بر زیست‌فراهمی فلزات سنگین در خاک‌های آلوده، خطر ورود آنها به زنجیره غذایی را کاهش دهد. برای بررسی اثر بیوچارهای تولیدشده از ضایعات هرس درخت سیب، انگور و کاه و کلش گندم بر زیست‌فراهمی کادمیم و رشد گیاه کاهو آزمایشی در شرایط گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه فاکتور شامل (۱) غلظت کادمیم (صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، (۲) نوع بیوچار (هرس سیب، هرس انگور و کاه و کلش گندم) و (۳) مقدار بیوچار (صفر (B_0)، ۲ (B_2) و ۵ (B_5) درصد وزنی/وزنی) در سه تکرار اجرا گردید. در پایان دوره رشد گیاه کاهو برخی از پارامترهای گیاه شامل وزن خشک بخش هوایی و ریشه، غلظت کادمیم بخش هوایی و ریشه، فاکتور انتقال (TF)، ضریب تغلیظ زیستی بخش هوایی و ریشه (BCF) و کادمیم زیست‌فراهم خاک اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که افزایش سطح آلودگی خاک باعث افزایش کادمیم زیست‌فراهم خاک، غلظت کادمیم بخش هوایی، غلظت کادمیم ریشه و ضریب تغلیظ زیستی بخش هوایی و ریشه (BCF) شد. همچنین با افزایش مقدار بیوچار در خاک مقدار کادمیم زیست‌فراهم خاک و غلظت کادمیم بخش هوایی و ریشه در تیمارها به‌طور معنادار بدین ترتیب کاهش یافت ($B_5 < B_2 < B_0$). غلظت کادمیم زیست‌فراهم خاک در تیمارهای بیوچار ضایعات هرس سیب، هرس انگور و کاه و کلش گندم در تیمار ۵ درصد نسبت به تیمار بدون بیوچار به ترتیب ۶۷/۸، ۶۵/۹ و ۷۶/۵ درصد کاهش یافت. به‌طور کلی، تأثیر بیوچار بر کاهش زیست‌فراهمی کادمیم به نوع ماده خام، مقدار بیوچار و غلظت فلز بستگی داشت.

واژه‌های کلیدی: انگور، بیوچار، سیب، کادمیم، کاه و کلش گندم، کاهو

Investigating the Effect of Different Biochars on Cadmium Uptake and Growth of Lettuce Plant (*Lactuca sativa* L.) in a Cadmium spiked Soil

N Moradi¹, MH Rasouli-Sadaghiani^{*2}, E Sepehr³

Received December 24, 2016

Accepted: July 18, 2017

1-PhD Student, Dept. of Soil Science, Urmia University, Iran

2-Prof., Dept. of Soil Science, Urmia University, Iran

3-Assoc. Prof., Dept. of Soil Science, Urmia University, Iran

*Corresponding Author, Email: m.rsadaghiani@urmia.ac.ir

Abstract

Biochar as a soil amendment can control bioavailability of heavy metals in contaminated soils and can reduce the hazard of their transferring to the food chain. In order to investigate the effects of biochar derived from the apple and grape pruning wastes and wheat straw on bioavailability of Cd and growth of lettuce plants an experiment was conducted in a completely randomized design under greenhouse condition with the factors of: 1) the concentration of Cd (0, 10 and 20 mg kg⁻¹), 2) type of biochar (apple pruning, grape pruning and wheat straw) and 3) biochar level (0 (B₀), 2 (B₂) and 5 (B₅) % w/w) in 3 replications. At the end of the lettuce growth period, some parameters including shoot dry weight, root dry weight, Cd concentrations in root and shoot, translocation factor (TF), bio concentration factor for shoot and root (BCF), and bioavailability of Cd in soil were measured. The results showed that the increase of the soil pollution level, raised the intensity of the Cd bioavailability, Cd concentrations of shoots and roots, bio concentration factor of shoot and root (BCF). Furthermore, with increasing the level of biochar in soil, bioavailable Cd, Cd concentrations of roots and shoots were decreased in treatments (B₅ < B₂ < B₀). Bioavailable Cd concentrations in soil in biochar treatments including apple pruning, grape pruning and wheat straw at the level of 5% w/w were decreased, by 46.81, 65.96 and 76.59 %, as compared to control respectively. Therefore biochar impact on decreasing Cd bioavailability depended on its raw material, biochar amount and metal concentrations.

Keywords: Apple, Biochar, Cadmium, Grape, Lettuce, Wheat straw

مقدمه

کادمیم یکی از انواع فلزات سنگین است که در محدوده pH اغلب خاکها کادمیم به صورت کاتیون دوظرفیتی ظاهر می‌شود. از این‌رو، ذرات رس و مواد آلی به‌شدت می‌توانند آن را جذب کنند. کادمیم در طبیعت بیشتر در سنگ‌های معدنی همراه با روی یافت می‌شود. این عنصر از طریق فعالیت‌های معدن‌کاوی، آبکاری فلزات، استفاده از سوخت‌های فسیلی، کودهای فسفاتی و حشره‌کش‌ها در کشاورزی و از طریق

فاضلاب‌های شهری و صنعتی وارد خاک می‌شود (رابینسون و همکاران ۲۰۰۱). نمک‌های کادمیم به‌راحتی جذب گیاه می‌شوند و باعث آسیب‌های سلولی و بافتی می‌شوند. کادمیم عنصر غیرضروری برای گیاه است و هیچگونه عملکرد بیولوژیکی شناخته شده‌ای ندارد. هنگامی که مقدار آن به ۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم برسد، برای گیاه سمی است (رابینسون و همکاران ۲۰۰۰). ازجمله صدمات ناشی از کادمیم اضافی در محصولات کشاورزی می‌توان به کاهش و توقف رشد ریشه، چوب

دارد و می‌تواند کربن را برای دوره‌های طولانی ذخیره کند (لهمن و همکاران ۲۰۰۶). از دیدگاه کشاورزی یکی از مزایای بیوچار، مدیریت ضایعات کشاورزی می‌باشد. بیوچار از تجزیه حرارتی زیست توده در فرآیند گرماکافت^۲ تولید می‌شود. بیوچار به دلیل ویژگی‌هایی نظیر ساختار متخلخل، حضور گروه‌های عامل مختلف، pH و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا به‌عنوان یک اصلاح کننده برای خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مورد بررسی قرار گرفته است (ژانگ و همکاران ۲۰۱۴). یکی از ویژگی‌های بیوچار داشتن سطح جذب بالا است که به معنی ظرفیت بالا برای کمپلکس فلزات سنگین در سطح آنهاست. جذب فلزات سنگین در سطوح بیوچار در موارد متعددی با استفاده از میکروسکوپ روبشی الکترونیکی (SEM) مشاهده شده است (لو و همکاران ۲۰۱۲). این جذب می‌تواند به دلیل کمپلکس فلزات سنگین با گروه‌های عامل مختلف موجود در بیوچار باشد. کربوکسیل، فنولیک هیدروکسیل و دیگر گروه‌های عاملی که شامل اکسیژن‌های سطحی‌اند، بیوچار را قادر می‌سازند تا آلایندگی حاصل از آلاینده‌های آلی را کاهش دهد (یو و همکاران ۲۰۰۹). بیوچار بر روی سطح خود دارای گروه‌های عاملی آلی است و بار منفی گروه‌های عاملی در طول زمان و در طی اکسیداسیون در خاک افزایش می‌یابد (چنگ و همکاران ۲۰۰۸). تعدادی مطالعات در هر دو مقیاس آزمایشگاهی و مزرعه‌ای نشان دادند که بیوچار می‌تواند به‌طور معنی‌دار تحرک و قابلیت فراهمی زیستی فلزات سنگین را در خاک کاهش دهد (لو و همکاران ۲۰۱۴، جیانگ و همکاران ۲۰۱۲). مطالعات جدید به توانایی بیوچار در جذب آلاینده‌های آلی و معدنی و کاهش تحرک و زیست فراهمی آنها در خاک اشاره می‌کنند (بیسلی و همکاران ۲۰۱۱). کیم و همکاران (۲۰۱۴)، در یک مطالعه انکوباسیون مشاهده کردند که مخلوط کردن بیوچار با خاک سبب کاهش معنادار (>۸۰٪) در فراهمی زیستی

پنبه‌ای شدن و صدمه دیدن ساختار داخلی و خارجی ریشه، کاهش هدایت هیدرولیکی آب در ریشه، تداخل با جذب و انتقال طبیعی عناصر غذایی، کاهش میزان کلروفیل، کلروز برگ و رنگ قرمز مایل به قهوه‌ای و اختلال در فعالیت‌های آنزیمی و به‌ویژه آنزیم‌های دخیل در فتوسنتز اشاره کرد (آلوی ۱۹۹۰). کاهو، اسفناج، جعفری، کلم، گوجه و شلغم قادر به تجمع مقادیر بالای کادمیم بوده در حالی‌که غده سیب زمینی، ذرت، بقولات و برنج مقادیر کمی از کادمیم را جذب می‌کنند (آلوی ۱۹۹۰). یکی از راه‌حل‌ها برای کاهش اثرات منفی فلزات سنگین، تثبیت آنها در خاک^۱ می‌باشد که خطر ورود عناصر سنگین را به چرخه غذایی موجودات زنده کاهش می‌دهد. این روش به‌وسیله افزودن برخی اصلاح‌کننده‌ها از جمله کانی‌های رسی، مواد آلی و آهکی و کانی‌های فسفات خاک به خاک انجام می‌شود (پارک و همکاران ۲۰۱۱). مواد آلی با تشکیل پیوند با فلزات سنگین از جمله کادمیم زیست فراهمی، سمیت، تحرک و توزیع آنها را در سیستم خاک و آب کاهش می‌دهند (تان ۲۰۰۳). همچنین مواد آلی، فلزات سنگین را در خاک توسط جذب سطحی و واکنش‌های پیچیده کنترل می‌کنند. اما با تجزیه مواد آلی، فلزاتی که جذب شده‌اند، آزاد می‌شوند (برادل ۲۰۰۴).

بیوچار^۲ یک نوع ماده آلی تهیه شده از زیست توده‌های گیاهی و ضایعات کشاورزی است که سوختن آنها در حضور کم و یا عدم حضور اکسیژن و در دماهای متوسط (<۷۰۰°C) انجام می‌شود، این ماده به علت سرعت تجزیه بسیار کند نسبت به سایر مواد آلی ظرفیت زیادی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای از قبیل دی‌اکسید کربن و متان که از ضایعات آزاد می‌شود،

¹ Stabilization² Biochar³ pyrolysis

اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی بیوپچار:

بیوپچارها برای تعیین ویژگی‌های شیمیایی از الک نیم میلی متر عبور داده شدند. سپس برخی از ویژگی‌های بیوپچارها مانند pH (در نسبت ۱:۲۰ آب و بیوپچار) (راجکویچ و همکاران ۲۰۱۲)، هدایت الکتریکی (در نسبت ۱:۲۰ آب و بیوپچار) (راجکویچ و همکاران ۲۰۱۲)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات آمونیوم یک مولار اصلاح شده (pH=7) (گاسکین و همکاران ۲۰۰۸)، خاکستر (بی‌نام ۲۰۱۳) و کربن، نیتروژن و هیدروژن کل به روش سوزاندن خشک با دستگاه ECS 4010 CHNSO Analyzer اندازه‌گیری شدند.

خاک مورد مطالعه: برای انجام آزمایش گلدانی،

تعداد ۵ نمونه خاک از زمین‌های زراعی شهرستان ارومیه از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متر نمونه‌برداری شد و سپس از بین نمونه‌های خاک ۱ نمونه براساس مقدار کربن آلی و آهک انتخاب شد. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه، هوا-خشک شده و از الک ۲ میلی متری عبور داده شدند. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نظیر بافت به روش هیدرومتری (گی و بادر ۱۹۸۶)، pH در سوسپانسیون ۱:۵ (محلول ۰/۰۱ مولار کلرید کلسیم و خاک)، کربن آلی با روش والکی و بلک اصلاح شده (نلسون و سامرز ۱۹۸۶)، کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش خنثی سازی با اسید کلریدریک (آلیسون و مودی ۱۹۶۵) و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش استات سدیم نرمال (چپمن ۱۹۶۵) اندازه‌گیری شدند. کادمیم کل در خاک به روش مخلوط اسیدکلریدریک و اسید نیتریک با نسبت ۱:۳ به روش مک گراث و کانلیف (۱۹۸۵) آماده‌سازی شد و با دستگاه جذب اتمی اسپکترومتری (Shimadzu6300 AA) قرائت شد.

آزمایش گلدانی: برای مطالعه تأثیر نوع و مقدار

بیوپچار بر جذب کادمیم توسط گیاه کاهو یک آزمایش گلدانی اجرا شد. غلظت کادمیم با توجه به حدود غلظت مجاز کادمیم در خاک انتخاب شد به گونه‌ای که دامنه‌ای

فلزات سنگین گردید، که احتمالاً به دلیل افزایش جذب فلزات سنگین با کاربرد بیوپچار و افزایش pH خاک بود. با توجه به اثرات مخرب عنصر کادمیم در خاک و همچنین اثر قابل توجه بیوپچار بر کاهش فراهمی آن در خاک، در این مطالعه اثر نوع و مقدار بیوپچار بر فراهمی کادمیم در خاک‌های آلوده شده برای گیاه کاهو مورد مطالعه قرار گرفت. اکثر مطالعات بیوپچار در خاک‌های اسیدی و در شرایط آب و هوایی مرطوب انجام شده‌اند، لذا مطالعه حاضر در یک خاک آهکی با هدف بررسی تاثیر بیوپچار بر فراهمی کادمیم در خاک آهکی انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

تهیه بیوپچار: برای تهیه بیوپچار، نظر به اهمیت

موضوع مقادیر بالایی از شاخه‌های هرس (ترجیحاً شاخه‌های یک یا دو ساله) از باغ‌های شهرستان ارومیه جمع‌آوری گردید. ضایعات هرس درختان سیب و انگور (اندازه ۲۰-۳۰ میلی متر) و کاه و کلش گندم (اندازه ۲۰-۱۰ میلی متر) خرد و با آب مقطر شسته شدند. سپس به مدت ۲ روز در دمای ۷۵ درجه سلسیوس داخل آون قرار راره شدند. سپس بقایا در داخل استوانه فلزی به قطر ۷ و ارتفاع ۳۱ سانتی‌متر در داخل کوره الکتریکی قرار گرفت. بقایا به مدت ۲ ساعت (برور ۲۰۱۲)، در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس در شرایط بدون حضور گاز اکسیژن (وارد کردن گاز N₂ از طریق محفظه ورودی راکتور) با سرعت افزایش دمای ۳ درجه سلسیوس بر دقیقه حرارت داده شدند. (کیم و همکاران ۲۰۱۲). بعد از اتمام زمان پیرولیز، راکتورها از کوره خارج شدن و به مدت ۲۴ ساعت در دمای معمولی اتاق قرار داده شدند تا در دمای محیط خنک شوند. بعد از این مدت درپوش راکتور رو باز کردیم و بیوپچارها را داخل شیشه تیره ریختیم. عملکرد بیوپچارها نیز از رابطه (جرم زیئوده / جرم بیوپچار) = عملکرد بیوپچار) محاسبه شدند (سانگ و گو ۲۰۱۲).

روز بعد از انتقال نشاء گیاه برداشت شد و اندازه‌گیری- های زیر انجام شد.

اندازه‌گیری کادمیم گیاه: ۰/۵ گرم از پودر

آسیاب شده بافت‌های خشک هوایی و ریشه کاهو با ۵ میلی لیتر اسید نیتریک غلیظ هضم شد (کیم و همکاران ۲۰۱۰). در نهایت غلظت کادمیم در گیاه با دستگاه جذب اتمی اسپکترومتری (Shimadzu 6300 AA) قرائت شد.

اندازه‌گیری کادمیم زیست‌فراهم خاک: برای

عصاره‌گیری کادمیم زیست‌فراهم خاک، مقدار ۸ گرم خاک هواخشک توزین و در ظرف‌های شیشه‌ای درب‌دار ۱۲۰ میلی‌لیتری ریخته و ۲۰ میلی‌لیتر محلول نیترات- آمونیم ۱ نرمال به آن افزوده شد. نمونه‌ها به مدت دو ساعت در تکان‌دهنده‌ای با دور ۳۰۰ دور بر دقیقه تکان داده شدند (یوره ۱۹۹۶) و سپس با کاغذ صافی واتمن ۴۲ صاف شدند. پس از به هم زدن نمونه‌ها غلظت کادمیم با دستگاه جذب اتمی (Shimadzu 6300 AA) اندازه‌گیری شد. به دلیل اینکه دستگاه جذب اتمی مورد اندازه‌گیری مجهز به کوره گرافیتی نبود لذا مقادیر به- دست آمده ناچیز بودند به همین دلیل در جدول تجزیه واریانس از اصلاح nil استفاده شد.

فاکتور تغلیظ زیستی کادمیم در ریشه و شاخساره

گیاه (BCF): فاکتور تغلیظ زیستی (BCF) مشخص کننده توانایی گیاهان برای تحمل و تجمع فلزات سنگین در اندامهای خود می‌باشد. برای ارزیابی تأثیر بیوچار، فاکتور تغلیظ زیستی کادمیم در ریشه و بخش هوایی گیاهان با استفاده از رابطه زیر تعیین شد (گوپتا و همکاران ۲۰۰۸):

$$BCF = \frac{C_p}{C_s} \quad [1]$$

از غلظت صفر آن فلز تا چند برابر غلظت مجاز را بپوشاند. برای آلوده کردن خاک ابتدا مقدار لازم کادمیم (۰، ۱۰ و ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم) از منبع نمک نیترات کادمیم محاسبه شد و به ۳ کیلوگرم از خاک افزوده شد و کاملاً با آن مخلوط گردید. برای صرف نظر از اثر نیترات همراه کادمیم، نیتروژن افزوده شده به خاک توسط نمک نیترات کادمیم، با افزودن مقادیر محاسبه شده نیترات آمونیوم به تیمارها تصحیح شد. رطوبت مخلوط خاک و کادمیم به ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه رسانده شد و به مدت ۵ ماه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس نگهداری شد. سپس هر یک از بیوچارها در مقادیر ۲ و ۵ درصد با خاک مخلوط و به رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه رسانده و به مدت ۴ هفته در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انکوباسیون شدند (در طول دوره انکوباسیون کاهش رطوبت توسط آب مقطر از طریق وزن کردن تیمارها جبران شد). سپس ۵۰۰ گرم از هر یک از خاک‌های تیمار شده به گلدان‌های پلاستیکی با قطر ۱۰ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر ریخته شد. سپس نشاء گیاه کاهو به تعداد ۲ عدد به هر یک از گلدان‌ها انتقال داده شدند. برای جلوگیری از تنش تغذیه ای، عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان توسط محلول غذایی پایه راریسون (هویت ۱۹۶۶) بدون عنصر روی به دلیل شباهت رفتاری کادمیم و روی (شامل ۶۲/۰۱ گرم $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ، ۱۱۹/۰۲ گرم $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ ، ۵۷/۶۹ گرم $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$ ، ۶۲/۲۵ گرم $FeEDTA$ ، ۰/۵۶ گرم $MnSO_4 \cdot 4H_2O$ ، ۰/۷۱۶ گرم H_3BO_3 ، ۰/۴۶ گرم و ۰/۰۹۹ گرم $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ در ۱ لیتر) و پس از رقیق سازی با نسبت حجمی ۲ (محلول غذایی) در هزار (آب مقطر) به فاصله های زمانی ۴۸-۷۲ ساعت و به مقدار ۱۰۰ میلی لیتر برای هر گلدان تا پایان مراحل رشد تامین گردید. وزن هر گلدان در رطوبت ظرفیت مزرعه بر روی آن یادداشت شد تا در مراحل بعدی آبیاری برای جلوگیری از هر گونه تنش رطوبتی آبیاری گردد. ۶۰

۵ درصد انجام شد. ترسیم نمودارها با استفاده از نرم افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک و بیوچارهای مورد استفاده:

جدول ۱ برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه را نشان می‌دهد (خاک مورد مطالعه آهکی بوده و دارای شوری پایین بود). بعضی از ویژگی‌های بیوچارهای تولید شده در جدول ۲ نشان داده شده است. هر سه بیوچار تولید شده دارای pH قلیایی بودند. بیوچارهای تولیدی دارای مقدار کربن کل بالا و نیتروژن کل پایین بودند. بیوچار کاه و کلش گندم مقدار هدایت الکتریکی و pH بالاتر اما محتوای کربن پایین‌تری داشت. مقدار CEC بیوچار حاصل از ضایعات هرس سیب، انگور و کاه و کلش گندم به ترتیب ۲۴/۹۴، ۳۴/۴۳ و ۵۹/۰۹ سانتی مول بر کیلوگرم بود. بیشترین کمترین مقدار درصد خاکستر به ترتیب مربوطه به بیوچار کاه و کلش گندم و بیوچار هرس انگور بود (جدول ۲).

که در آن BCF، فاکتور تغلیظ زیستی کادمیم، C_p غلظت کادمیم در گیاه و C_s غلظت کادمیم در خاک است. فاکتور انتقال گیاهی (TF): برای ارزیابی توانایی گیاه و نیز تأثیر بیوچار در انتقال کادمیم از ریشه به شاخساره گیاهان فاکتور انتقال گیاهی کادمیم تعیین شد (ما و همکاران ۲۰۰۱):

$$TF = \frac{C^{shoot}}{C^{root}} \quad [2]$$

که در آن TF فاکتور انتقال کادمیم از ریشه به بخش هوایی، C^{shoot} و C^{root} به ترتیب غلظت کادمیم در بخش هوایی و ریشه گیاه است. این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه فاکتور غلظت کادمیم (صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، نوع بیوچار (هرس سیب، هرس انگور و کاه و کلش گندم) و مقدار بیوچار (صفر (B_0)، ۲ (B_2) و ۵ (B_5) درصد وزنی/وزنی) با سه تکرار در گیاه کاهو اجرا گردید. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای MSTATC و SPSS و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه.

بافت	سیلت		رس	کادمیم کل (mg kg ⁻¹)	CEC (cmol _c kg ⁻¹)	OC	CCE (%)	pH	EC (dS m ⁻¹)
	ش	ش							
لوم رسی	۲۱	۵۲	۲۷	۱/۶	۲۳/۵۲	۰/۶۴	۲۶	۷/۸۵	۰/۶۶
Cu	Zn	Mn	Fe	P قابل استفاده	K قابل استفاده			N کل	
(mg kg ⁻¹)									(%)
۰/۸	۱/۱۲	۷/۳۱	۴/۶۸	۲۷۹	۱۳				۰/۰۷

CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی؛ EC: هدایت الکتریکی خاک؛ CCE: کربنات کلسیم معادل.

جدول ۲- برخی ویژگی‌های بیوچارهای تولید شده از بقایای مختلف گیاهی.

نوع بیوچار	pH	EC (dS m ⁻¹)	CEC (cmolc kg ⁻¹)	نیترژن کل	کربن کل	هیدروژن کل (%)	خاکستر	عملکرد بیوچار
هرس درختان سیب	۸/۶۷	۰/۰۹	۲۴/۹۴	۰/۷۵	۶۸/۸۸	۲/۷	۱۴/۶۸	۳۲
هرس درختان انگور	۹/۵۹	۰/۲	۳۴/۴۳	۰/۸۷	۷۱/۵۳	۲/۸۸	۱۱/۱۸	۳۱
کاه و کلش گندم	۹/۹۴	۰/۶۸	۵۹/۰۹	۰/۲۲	۶۴/۳۱	۳/۸۹	۲۲/۹۸	۳۲/۴

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس سطوح مختلف کادمیم، نوع و مقدار بیوچار بر شاخص‌های اندازه‌گیری شده در خاک و گیاه کاهو.

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات							
		کادمیم زیست فراهم خاک	TF	RDW	SDW	غلظت کادمیم در بخش هوایی	غلظت کادمیم در ریشه	BCF بخش هوایی	BCF ریشه
نوع بیوچار (Type)	۲	۰/۰۶۹***	۰/۰۲۲***	۰/۴۲***	۰/۵۶***	۶/۶۳***	۶/۹۹***	۰/۰۳۲***	۰/۰۳۴***
مقدار بیوچار (Rate)	۲	۰/۰۶۲***	۰/۰۲۴***	۲/۰۸***	۲/۸۴***	۷۷۹***	۳۳۱***	۳/۵۶***	۱/۴۰***
غلظت کادمیم (Conc.)	۲	۲/۳۲***	۳/۵۱***	۷/۶۹***	۱۲/۳۰***	۶۵۰۸***	۳۰۲۷***	۱۱/۲۸***	۸/۴۲***
type*rate	۴	۰/۰۱۸***	۰/۰۷۳***	۰/۱۷***	۰/۲۵***	۱۱/۱۸***	۵/۱۸***	۰/۰۳۴***	۰/۰۱۴***
type*conc.	۴	۰/۰۲۱***	۰/۰۲۴***	۰/۲۳***	۰/۱۳***	۹/۵۳***	۱۷/۵۶***	۰/۰۴۲***	۰/۰۶۳***
rate*conc.	۴	۰/۰۱۷***	۰/۰۶۸***	۰/۱۳***	۰/۱۴***	۲۶۴***	۹۳/۴۴***	۰/۴۹***	۰/۲۹***
type*rate *conc.	۸	۰/۰۰۵۷***	۰/۰۹۳***	۰/۰۷۹***	۰/۰۵۷***	۹/۵۱***	۶/۵۷***	۰/۰۲۶***	۰/۰۲۳***
خطا	۵۴	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۶۷	۰/۴۷	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۲۴
ضریب تغییرات (%)	-	۱/۶۸	۵/۱۹	۱/۵۲	۱/۱۵	۵/۵۵	۶/۰۴	۵/۹۹	۶/۴۵

***، به ترتیب معنادار در سطح ۰/۱ درصد، ۵ درصد.

گیاه کاهو و BCF بخش هوایی به‌طور معنادار افزایش یافتند. و همچنین با افزایش غلظت کادمیم در خاک تا سطح ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم، مقادیر ضریب تغلیظ زیستی ریشه به‌طور معنادار در مقادیر مختلف بیوچار افزایش یافت، اما در غلظت ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم کادمیم، مقدار آن کاهش یافت. مقدار فاکتور انتقال گیاهی (TF) با افزایش غلظت کادمیم در خاک روند منظمی نشان نداد. فاکتور انتقال گیاهی (TF) در تیمارهای Cd_۰ و Cd_۱ با Cd_۲ در مقادیر مختلف بیوچار به‌طور معنادار کاهش یافت (جدول ۳). همچنین با افزایش غلظت کادمیم در خاک، وزن خشک بخش هوایی و ریشه گیاه به‌طور معنادار کاهش یافت. منساح و

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان دادند که در همه شاخص‌های مورد اندازه‌گیری هم اثرات اصلی و هم اثرات متقابل دو گانه و سه گانه تیمارها در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنادار بودند (جدول ۳).

تأثیر غلظت کادمیم در خاک و مقدار بیوچار: جدول ۴ نتایج مقایسه میانگین اثر سطوح کادمیم و مقادیر بیوچار را بر مقدار کادمیم زیست‌فراهم خاک، وزن خشک اندام هوایی و ریشه، غلظت کادمیم در بخش هوایی و ریشه گیاه، BCF بخش هوایی و ریشه و فاکتور انتقال، تحت کشت گیاه کاهو را نشان داده است. نتایج نشان داد در مقادیر مختلف بیوچار با افزایش غلظت کادمیم اضافه شده در خاک، غلظت کادمیم زیست‌فراهم، غلظت کادمیم در بخش هوایی و ریشه

افزایش یافت. مطالعات اخیر نشان داده‌اند افزودن بیوپچار به خاک‌های آلوده به فلزات سنگین باعث کاهش جذب و سمیت فلزات سنگین برای گیاهان و افزایش رشد گیاه می‌شود (پارک و همکاران ۲۰۱۱ و ژنگ و همکاران ۲۰۱۳). در مقادیر بیوپچار ۲ و ۵ درصد در مقایسه با بیوپچار صفر، غلظت کادمیم در ریشه گیاه کاهو به ترتیب ۲۵/۲ و ۴۸/۱ درصد و غلظت کادمیم در بخش هوایی به ترتیب ۱/۴۸ و ۲/۰۸ برابر کاهش نشان دادند. بسلی و همکاران (۲۰۱۰) با مطالعه بر روی بیوپچار تهیه‌شده از زباله سبز و کود مرغی نشان دادند، افزایش مقدار بیوپچار، غلظت کادمیم و مس در گیاه خردل هندی کاهش یافت. بیوپچار سبب عدم تحرک و تثبیت فلزات شده و همین عامل می‌تواند سبب کاهش غلظت فلز در گیاه شود. همچنین اکسیداسیون کربن آروماتیک و شکل‌گیری گروه‌های عاملی کربوکسیلیک در طول اکسیداسیون بیوپچار، CEC خاک را افزایش می‌دهد و احتمالاً باعث تشکیل کمپلکس‌های پایدار بیوپچار-فلز سنگین در خاک می‌شود (لیانگ و همکاران ۲۰۰۶). کاهش در غلظت کادمیم گیاهان در حضور بیوپچار ممکن است به دلیل غیرمتحرک شدن زیست‌فراهمی زیستی فلزات و اثر رقت با افزایش بیوماس گیاه باشد (پارک و همکاران ۲۰۱۱).

همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند با افزایش غلظت کادمیم در خاک، وزن تر و وزن خشک اندام هوایی گیاه کاهو کاهش می‌یابد. با افزایش مقدار بیوپچار در خاک در همه سطوح کادمیم افزوده شده به خاک، مقدار کادمیم زیست‌فراهم خاک، غلظت کادمیم بخش هوایی و ریشه گیاه کاهو، BCF بخش هوایی و ریشه به‌طور معنادار کاهش یافت. بیش‌ترین مقدار کادمیم زیست‌فراهم خاک در مقدار صفر بیوپچار (۰/۸۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در سطح ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم بدست آمد. برخی از بررسی‌های آزمایشگاهی و مزرعه نشان داده‌اند، بیوپچار می‌تواند به‌طور معنادار تحرک و قابلیت زیست-فراهمی فلزات سنگین را در خاک کاهش دهد (جیانگ و همکاران ۲۰۱۲ و لو و همکاران ۲۰۱۴). کیم و همکاران (۲۰۱۴)، در یک مطالعه انکوباسیون مشاهده کردند مخلوط کردن بیوپچار با خاک باعث کاهش معنی‌دار زیست‌فراهمی فلزات سنگین شد، که احتمالاً به دلیل افزایش جذب فلزات سنگین به‌وسیله بیوپچار و افزایش pH خاک بود. این محققان همچنین نتایج مشابهی در آزمایش‌گلدانی مشاهده کردند، به‌طوری‌که جذب فلزات سنگین توسط کاهو با افزایش مقدار بیوپچار در خاک به‌طور معنادار کاهش یافت. وزن خشک بخش هوایی گیاه کاهو در مقادیر بیوپچار ۲ و ۵ درصد در مقایسه با مقدار صفر بیوپچار (B₀) به ترتیب ۱۱/۴ و ۳۹/۵ درصد

جدول ۴- نتایج مقایسه میانگین تأثیر سطوح کادمیم و مقادیر بیوپچار بر شاخص‌های اندازه‌گیری شده در خاک و گیاه کاهو.

وزن خشک بخش هوایی گیاه کاهو (g pot ⁻¹)			غلظت کادمیم زیست‌فراهم (mg kg ⁻¹)			کل کادمیم افزوده به خاک (mg kg ⁻¹)
B ₅	B ₂	B ₀	B ₅	B ₂	B ₀ *	
۱/۷۳ ^{a,a}	۱/۴۶ ^{b,a}	۱/۳۶ ^{c,a}	nil	nil	nil	.
۱/۴۳ ^{a,b}	۱/۰۳ ^{b,b}	۰/۹۲ ^{c,b}	۰/۱۹ ^{c,b}	۰/۳۱ ^{b,b}	۰/۵۳ ^{a,b}	۱۰
۱/۰۱ ^{a,c}	۰/۸۵ ^{b,c}	۰/۷۱ ^{c,c}	۰/۳۲ ^{c,a}	۰/۶۱ ^{b,a}	۰/۸۷ ^{a,a}	۲۰
غلظت کادمیم در بخش هوایی گیاه کاهو (mg kg ⁻¹)			وزن خشک ریشه گیاه کاهو (g pot ⁻¹)			.
B ₅	B ₂	B ₀	B ₅	B ₂	B ₀	
۰/۲۳ ^{c,c}	۰/۳۳ ^{b,c}	۰/۵۶ ^{a,c}	۱/۲۶ ^{a,a}	۱/۱۵ ^{b,a}	۰/۹۷ ^{c,a}	

۸/۶۰ ^{c,b}	۱۰/۶۴ ^{b,b}	۱۸/۵۱ ^{a,b}	۱/۰۲ ^{a,b}	۰/۱۸ ^{b,b}	۰/۷۵ ^{c,b}	۱۰
۲۰/۶۴ ^{c,a}	۳۰/۶۵ ^{b,a}	۴۲/۳۳ ^{a,a}	۰/۷۷ ^{a,c}	۰/۵۰ ^{b,c}	۰/۴۱ ^{c,c}	۲۰
BCF بخش هوایی			غلظت کادمیم در ریشه گیاه کاهو (mg kg ⁻¹)			
B ₅	B ₂	B ₀	B ₅	B ₂	B ₀	
۰/۱۴ ^{c,c}	۰/۲۱ ^{b,c}	۰/۳۵ ^{a,c}	۰/۱۵ ^{c,c}	۰/۱۸ ^{b,c}	۰/۳ ^{a,c}	.
۰/۷۴ ^{c,b}	۰/۹۲ ^{b,b}	۱/۵۹ ^{a,b}	۸/۳۰ ^{c,b}	۱۲/۳۸ ^{b,b}	۱۶/۴۲ ^{a,b}	۱۰
۰/۹۵ ^{c,a}	۱/۴۲ ^{b,a}	۱/۹۶ ^{a,a}	۱۴/۶۹ ^{c,a}	۲۰/۷۷ ^{b,a}	۲۷/۸۴ ^{a,a}	۲۰
فاکتور انتقال گیاهی (TF)			ریشه BCF			
B ₅	B ₂	B ₀	B ₅	B ₂	B ₀	
۱/۵۳ ^{c,a}	۱/۸۳ ^{b,a}	۱/۸۷ ^{a,a}	۰/۰۹ ^{c,c}	۰/۱۱ ^{b,c}	۰/۱۹ ^{a,c}	.
۱/۰۴ ^{b,c}	۰/۸۶ ^{c,c}	۱/۱۳ ^{a,c}	۰/۷۲ ^{c,a}	۱/۰۷ ^{b,a}	۱/۴۱ ^{a,a}	۱۰
۱/۴۱ ^{c,b}	۱/۴۸ ^{b,b}	۱/۵۲ ^{a,b}	۰/۶۸ ^{c,b}	۰/۹۶ ^{b,b}	۱/۲۹ ^{a,b}	۲۰

- حروف بالانویس اول و دوم بر روی هر عدد به ترتیب نشان دهنده اختلاف آماری ($P \leq 0.05$) در هر ردیف و هر ستون می‌باشند.

- میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر ردیف، بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ دارای اختلاف معنادار نیستند.

* B₀, B₂ و B₅ به ترتیب بیوچار صفر، ۲ و ۵ درصد وزنی/وزنی می‌باشد.

هوایی و ریشه، غلظت کادمیم در بخش هوایی و ریشه گیاه، فاکتور تغلیظ زیستی کادمیم (BCF) بخش هوایی و ریشه و فاکتور انتقال (TF)، تحت کشت گیاه کاهو در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش سطح کادمیم افزوده شده به خاک در هر سه نوع بیوچار مقدار کادمیم زیست فراهم خاک، غلظت کادمیم در بخش هوایی و ریشه و BCF بخش هوایی به‌طور معنادار افزایش یافت. اما با افزایش غلظت کادمیم در خاک، وزن خشک بخش هوایی و ریشه گیاه در همه تیمارهای بیوچار به‌طور معنادار کاهش یافت.

غلظت کادمیم زیست فراهم خاک در سطوح کادمیم بدین ترتیب AB < GB < SB بود. کادمیم در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم بین بیوچار ضایعات هرس انگور و بیوچار کاه و کلش گندم اختلاف معنادار مشاهده نشد. حمید و همکاران (۲۰۱۵) بیان کردند، غلظت کادمیم زیست فراهم خاک با افزایش مقدار بیوچار حاصل از بقایای پوسته زیتون کاهش معنی‌دار نشان داد. بیسلی و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند، بیوچار تولید شده از درختان جنگلی به‌طور معنادار غلظت کادمیم قابل استخراج با آب را در خاک کاهش

در شرایط بدون کاربرد بیوچار در مقایسه با مقادیر ۲ و ۵ درصد بیوچار فاکتور تغلیظ زیستی بخش هوایی به ترتیب ۱/۵۳ و ۳/۴۵ برابر کاهش یافت. ترتیب مقادیر فاکتور تغلیظ زیستی ریشه گیاه کاهو در مقادیر بیوچار بدین ترتیب B₀ < B₂ < B₅ بود. فاکتور تغلیظ زیستی (BCF) مشخص کننده توانایی گیاهان برای تحمل و تجمع فلزات سنگین در اندامهای خود بوده که این پارامترها با استفاده از غلظت فلز در اندامهای ریشه / مقدار فلز در خاک (فاکتور تغلیظ زیستی ریشه) و غلظت فلز در اندام‌های هوایی / مقدار فلز در خاک (فاکتور تغلیظ زیستی اندامهای هوایی) محاسبه گردیدند (زاچینی و همکاران ۲۰۰۸). تأثیر افزودن بیوچار به خاک نیز روند منظمی نشان نداد. فاکتور انتقال گیاهی (TF) یک شاخص ساده برای ارزیابی کمی انتقال عناصر از خاک به گیاه می‌باشد و نشان‌دهنده نسبت غلظت عنصر فلزی در اندام هوایی گیاه به غلظت همان عنصر در ریشه می‌باشد (آلوی ۱۹۹۵).

تأثیر غلظت کادمیم در خاک و نوع بیوچار:

نتایج مقایسه میانگین اثر سطوح کادمیم و نوع بیوچار بر مقدار کادمیم زیست‌فراهم خاک، وزن خشک اندام

غلظت کادمیم در بخش هوایی در تیمارهای بیوچار ضایعات هرس درختان سیب، انگور و کاه کلش گندم به ترتیب ۲۸/۹، ۲۵/۴ و ۲۹/۹ درصد کاهش یافت. بیشترین کاهش غلظت بخش هوایی گیاه کاهو در بیوچار کاه و کلش گندم مشاهده شد (جدول ۴). بیشترین کاهش غلظت کادمیم ریشه گیاه در سطوح کادمیم صفر و ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم در تیمار بیوچار کاه و کلش گندم مشاهده شد. در سطوح مختلف کادمیم خاک، کمترین مقدار BCF اندام هوایی در بیوچار کاه و کلش گندم مشاهده شد. مقدار فاکتور انتقال گیاهی (TF) در بیوچار ضایعات هرس سیب، هرس انگور و کاه و کلش گندم در سطوح مختلف کادمیم متفاوت بود که از لحاظ آماری اختلاف معنادار داشتند. در بالاترین غلظت کادمیم افزوده شده به خاک، بیوچار کاه و کلش گندم بیشترین مقدار فاکتور انتقال گیاهی را نشان داد که این مقدار بیشتر از ۱ بود. فاکتور انتقال گیاهی بیشتر از ۱ در حقیقت بیان کننده انتقال آسان فلز از ریشه به اندام هوایی و در نتیجه انباشتگی زیاد فلزات سنگین در اندام هوایی گیاه بوده و یکی از فاکتورهای موثر برای شناسایی گیاهان مناسب در استخراج گیاهی می باشد و فاکتور انتقال کمتر از ۱ نشانه غیرانباشتگر بودن آن گیاه است (مک گراث و همکاران ۱۹۸۲).

داد. وزن خشک بخش هوایی گیاه در سطح ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم کادمیم در بیوچار ضایعات هرس درختان سیب، انگور و کاه کلش گندم به ترتیب ۴۷/۹، ۴۴/۹۸ و ۴۴/۳ درصد در مقایسه با تیمار صفر (بدون کادمیم) کاهش معنادار یافت. وزن خشک ریشه گیاه کاهو در بیوچار ضایعات هرس درختان سیب، انگور و کاه و کلش گندم در مقایسه با شرایط بدون بیوچار به ترتیب ۸/۹، ۲۳/۰ و ۱۷/۴ درصد افزایش یافت و بیشترین افزایش در وزن خشک ریشه در تیمار بیوچار ضایعات هرس انگور مشاهده شد. لو و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که بیوچار بامبو و کاه و کلش برنج به طور معنادار باعث افزایش وزن خشک بخش هوایی گیاه در خاک‌های آلوده به فلزات کادمیم و سرب شدند که ممکن است به دلیل تأثیر در کاهش سمیت فلزات سنگین از طریق بهبود pH خاک و افزایش زیست‌فراهمی فسفر خاک باشد. کرمی و همکاران (۲۰۱۱) نیز گزارش کردند، بهبود عملکرد ماده خشک گیاهان خردل هندی و چمن در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین تیمار شده با بیوچار کود دامی و بقایای سبز، به دلیل توانایی بیوچار برای افزایش حاصلخیزی خاک و کاهش سمیت زیستی فلزات بود.

جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین تأثیر سطوح کادمیم اضافه شده به خاک و نوع بیوچار بر شاخص‌های اندازه‌گیری شده در

خاک و گیاه کاهو.

وزن خشک بخش هوایی گیاه کاهو (g pot ⁻¹)			غلظت کادمیم زیست فراهم (mg kg ⁻¹)			کل کادمیم افزوده به خاک (mg kg ⁻¹)
SB	GB	AB	SB	GB	AB*	
۱/۷۶ ^{a,a}	۱/۵۷ ^{b,a}	۱/۴۵ ^{c,a}	nil	nil	nil	.
۱/۲۰ ^{a,b}	۱/۱۳ ^{b,b}	۱/۰۴ ^{c,b}	۰/۲۵ ^{c,b}	۰/۳۴ ^{b,b}	۰/۴۴ ^{a,b}	۱۰
۰/۹۸ ^{a,c}	۰/۸۷ ^{b,c}	۰/۷۶ ^{c,c}	۰/۵۷ ^{b,a}	۰/۵۶ ^{b,a}	۰/۶۷ ^{a,a}	۲۰
غلظت کادمیم در بخش هوایی گیاه کاهو (mg kg ⁻¹)			وزن خشک ریشه گیاه کاهو (g pot ⁻¹)			
SB	GB	AB	SB	GB	AB	
۰/۲۶ ^{c,c}	۰/۴۱ ^{b,c}	۰/۴۵ ^{a,c}	۱/۰۸ ^{b,a}	۱/۱۳ ^{a,a}	۰/۹۸ ^{c,a}	.
۱۳/۱۵ ^{a,b}	۱۲/۷۵ ^{b,b}	۱۱/۸۵ ^{c,b}	۰/۹۰ ^{a,b}	۰/۹۱ ^{a,b}	۰/۸۵ ^{b,b}	۱۰
۲۹/۵۹ ^{c,a}	۳۲/۶۷ ^{a,a}	۳۱/۳۶ ^{b,a}	۰/۵۲ ^{b,c}	۰/۵۸ ^{a,c}	۰/۴۹ ^{b,c}	۲۰
BCF بخش هوایی			غلظت کادمیم در ریشه گیاه کاهو (mg kg ⁻¹)			

SB	GB	AB	SB	GB	AB	
۰/۱۶ ^{b,c}	۰/۲۶ ^{a,c}	۰/۲۸ ^{a,c}	۰/۱۶ ^{b,c}	۰/۲۳ ^{a,c}	۰/۲۴ ^{a,c}	۰
۱/۱۳ ^{b,b}	۱/۱۱ ^{b,b}	۱/۰۲ ^{a,b}	۱۳/۲۲ ^{a,b}	۱۲/۳۳ ^{b,b}	۱۱/۵۵ ^{c,b}	۱۰
۱/۳۷ ^{c,a}	۱/۵۱ ^{a,a}	۱/۴۵ ^{b,a}	۱۸/۹۷ ^{c,a}	۲۱/۸۴ ^{b,a}	۲۲/۴۹ ^{a,a}	۲۰
فاكتور انتقال گياهى (TF)			ريشه BCF			
SB	GB	AB	SB	GB	AB	
۱/۶۲ ^{c,a}	۱/۷۸ ^{b,a}	۱/۸۷ ^{a,a}	۰/۱۰ ^{b,c}	۰/۱۴ ^{a,c}	۰/۱۵ ^{a,c}	۰
۰/۹۹ ^{a,c}	۱/۰۳ ^{a,c}	۱/۰۲ ^{a,c}	۱/۱۴ ^{a,a}	۱/۰۶ ^{b,a}	۱/۰۰ ^{c,b}	۱۰
۱/۵۶ ^{a,b}	۱/۴۹ ^{b,b}	۱/۳۹ ^{c,b}	۰/۸۸ ^{b,b}	۱/۰۱ ^{a,b}	۱/۰۴ ^{a,a}	۲۰

- حروف بالانويس اول و دوم بر روى هر عدد به ترتيب نشان دهنده اختلاف آمارى ($P \leq 0.05$) در هر ردیف و هر ستون می باشند.

- میانگین های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر ردیف، بر اساس آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ دارای اختلاف معنادار نیستند.

* AB: بيوچار هرس درختان سيب، GB: بيوچار هرس انگور و SB: بيوچار كاه و كلش گندم

تأثير مقدار بيوچار و نوع بيوچار: نتايج

مقايسه میانگین اثر مقادير بيوچار و نوع بيوچار بر مقدار كادميم زيست فراهم خاک، وزن خشك اندام هوايی و ريشه، غلظت كادميم در بخش هوايی و ريشه گياه، BCF بخش هوايی و ريشه و فاكتور انتقال، تحت كشت گياه كاهو در جدول ۶ نشان داده شده است. نتايج نشان داد مقدار كادميم زيست فراهم خاک در تيمارهای بيوچار ضايعات هرس سيب، هرس انگور و كاه و كلش گندم در مقدار بيوچار ۵ درصد نسبت به بيوچار صفر به ترتيب ۴۶/۸، ۶۵/۹ و ۷۶/۶ درصد کاهش يافت. بيشترين و كمترين کاهش به ترتيب در بيوچار كاه و كلش گندم و بيوچار هرس سيب بود. مكانيسم غيرمتحرك شدن فلزات سنگين در خاكهای آلوده به خواص خاك و مواد اصلاح كننده، حضور مواد آلی و ديگر فلزات در خاك كه زيست فراهمی فلزات را تحت تأثير قرار می دهد، بستگی دارد (رمكنز و همكاران ۲۰۰۹). نقش بيوچار در کاهش شكل های زيست فراهم فلزات در خاك عمدتاً از طريق جذب يونهای فلزی بر روى مقادير بيوچار رخ می دهد (پارك و همكاران ۲۰۱۱).

بيوچار) بود. همچنين وزن خشك ريشه گياه در بيوچار ضايعات هرس درختان سيب، انگور و كاه كلش گندم به ترتيب ۱/۴۶، ۱/۹۱ و ۱/۸۲ برابر در مقايسه با تيمار شاهد بدون بيوچار افزايش نشان داد، ليكن اختلاف معنادار بين بيوچار ضايعات هرس انگور و كاه و كلش گندم وجود نداشت. ژنگ و همكاران (۲۰۱۳) گزارش كردند، مقدار ۵ درصد بيوچار غلظت مطلوب برای بهبود رشد گياه نرت بود. کاربرد بيوچار بدست آمده از بقايای سبز در مقدار ۱۵ درصد بيشترين رشد خردل هندی را در پی داشت (پارك و همكاران ۲۰۱۱). غلظت كادميم در بخش هوايی گياه در مقدار ۵ درصد در بيوچارهای ضايعات هرس درختان سيب، انگور و كاه كلش گندم به ترتيب ۱/۴۶، ۱/۹۱ و ۱/۸۲ برابر در مقايسه با شرايط بدون بيوچار کاهش يافت كه اختلاف معنادار بين بيوچار ضايعات هرس انگور و كاه و كلش گندم در مقدار ۵ درصد وجود نداشت و ميزان كادميم در ريشه گياه كاهو در تيمارهای بيوچار ضايعات هرس سيب، هرس انگور و كاه و كلش گندم در مقدار ۵ درصد نسبت به بيوچار صفر به ترتيب ۱/۶۹، ۱/۹۶ و ۲/۱۸ برابر کاهش يافت. به طور کلی بيوچار كاه و كلش گندم كارايی بيشتری در کاهش غلظت كادميم در ريشه گياه كاهو در مقايسه با بيوچار ضايعات هرس درختان سيب و انگور داشت. لو و همكاران (۲۰۱۴) نیز بيان كردند، غلظت كادميم در بخش هوايی گياه با مصرف

بيشترين و كمترين وزن خشك بخش هوايی در تيمار ۵ درصد (B_5) بيوچار كاه و كلش گندم و بيوچار هرس درختان سيب را مشاهده گرديد كه به ترتيب ۱۹/۴ و ۴۲/۷ درصد بيشتر از تيمار شاهد (بدون

معناست که غلظت فلز در گیاه بیشتر از غلظت فلز در خاک باشد (زاید و همکاران ۱۹۹۸). فاکتور تغلیظ زیستی بخش هوایی گیاه در غلظت‌های بالای کادمیم بزرگتر از ۱ بود. اما با افزایش مقدار بیوپچار (۵ درصد) فاکتور تغلیظ زیستی بخش هوایی کمتر از ۱ بدست آمد. نتایج مقایسه میانگین اثر در بیوپچارهای ضایعات هرس درختان سیب و هرس انگور با افزایش مقدار بیوپچار فاکتور انتقال کاهش یافت اما در بیوپچار کاه و کلش گندم فاکتور انتقال ابتدا تا مقدار ۲ درصد کاهش و سپس در مقدار ۵ درصد افزایش یافت. در کل بیشترین مقدار فاکتور انتقال در مقدار صفر بیوپچار مشاهده شد. زاچینی و همکاران (۲۰۰۸) بیان کردند، گونه‌های که دارای فاکتور تغلیظ زیستی در ریشه بزرگتر از یک و فاکتور انتقال کوچکتر از یک باشد، برای تثبیت گیاهی و گونه‌ای که دارای فاکتور تغلیظ زیستی در اندام‌های هوایی بزرگتر از یک باشد، برای استخراج گیاهی مناسب است.

بیوپچار مشتق شده از بامبو و کاه و کلش برنج به ترتیب ۴۹ و ۲۰ درصد کاهش یافت. ژانگ و همکاران (۲۰۱۳) گزارش دادند، بیوپچار مشتق شده از کاه گندم در مقدار ۵ درصد غلظت کادمیم گیاه سازو را به‌طور معنادار کاهش داد.

مقدار BCF اندام هوایی و ریشه با افزایش مقدار بیوپچار در هر سه نوع بیوپچار ضایعات هرس سیب، انگور و کاه و کلش گندم به‌طور معنی دار کاهش یافت. اما مقدار BCF اندام هوایی بین نوع بیوپچارها در مقادیر ۰ و ۵ درصد اختلاف معناداری مشاهده نگردید. فاکتور تغلیظ زیستی ریشه در تیمارهای بیوپچار ضایعات هرس سیب، هرس انگور و کاه و کلش گندم در مقدار بیوپچار ۵ درصد نسبت به بیوپچار صفر به‌ترتیب ۴۴، ۵۰ و ۵۲ درصد کاهش یافت. بیشترین کاهش در فاکتور تغلیظ زیستی ریشه در بیوپچار کاه و کلش گندم بود (جدول ۳). گیاه مناسب برای انباشتن فلزات باید فاکتور تغلیظ زیستی بیشتر از ۱ داشته باشد و این بدان

جدول ۶- نتایج مقایسه میانگین تأثیر مقدار بیوپچار و نوع بیوپچار بر خصوصیات اندازه‌گیری شده در خاک و گیاه کاهو.

وزن خشک بخش هوایی گیاه کاهو (g pot ⁻¹)			غلظت کادمیم زیست فراهم (mg kg ⁻¹)			کل بیوپچار افزوده به خاک (%)
SB	GB	AB	SB	GB	AB*	
۱/۰۳ ^{a,a}	۱/۰۳ ^{a,a}	۱/۰۳ ^{a,a}	۰/۴۷ ^{a,a}	۰/۴۷ ^{a,a}	۰/۴۷ ^{a,a}	۰
۱/۳۷ ^{a,b}	۱/۲۱ ^{b,b}	۱/۱۶ ^{c,b}	۰/۲۵ ^{b,c}	۰/۲۸ ^{b,b}	۰/۴۱ ^{a,b}	۲
۱/۴۷ ^{a,c}	۱/۳۷ ^{b,c}	۱/۲۳ ^{c,c}	۰/۱۱ ^{c,c}	۰/۱۶ ^{b,c}	۰/۲۵ ^{a,c}	۵
غلظت کادمیم در بخش هوایی گیاه کاهو (mg kg ⁻¹)			وزن خشک ریشه گیاه کاهو (g pot ⁻¹)			
SB	GB	AB	SB	GB	AB	
۲۰/۴۷ ^{a,a}	۲۰/۴۷ ^{a,a}	۲۰/۴۷ ^{a,a}	۰/۵۴ ^{a,c}	۰/۵۴ ^{a,c}	۰/۵۴ ^{a,c}	۰
۱۲/۷۶ ^{b,b}	۱۵/۸۹ ^{a,b}	۱۲/۹۶ ^{b,b}	۰/۶۶ ^{a,b}	۰/۶۸ ^{a,b}	۰/۶۱ ^{b,b}	۲
۹/۷۷ ^{b,c}	۹/۴۷ ^{b,c}	۱۰/۲۳ ^{a,c}	۰/۹۸ ^{a,a}	۱/۰۳ ^{a,a}	۰/۷۹ ^{b,a}	۵
BCF بخش هوایی			غلظت کادمیم در ریشه گیاه کاهو (mg kg ⁻¹)			
SB	GB	AB	SB	GB	AB	
۱/۳۵ ^{a,a}	۱/۳۵ ^{a,a}	۱/۳۵ ^{a,a}	۱۴/۸۵ ^{a,a}	۱۴/۸۵ ^{a,a}	۱۴/۸۵ ^{a,a}	۰
۰/۷۹ ^{c,b}	۰/۹۹ ^{a,b}	۰/۸۴ ^{b,b}	۱۰/۷۰ ^{b,c}	۱۱/۹۵ ^{a,b}	۱۰/۶۹ ^{b,b}	۲
۰/۶۲ ^{a,c}	۰/۶۳ ^{a,c}	۰/۶۶ ^{a,c}	۶/۸۰ ^{c,c}	۷/۵۹ ^{b,c}	۸/۷۴ ^{a,c}	۵
فاکتور انتقال گیاهی (TF)			BCF ریشه			
SB	GB	AB	SB	GB	AB	
۱/۵۱ ^{a,a}	۱/۵۱ ^{a,a}	۱/۵۱ ^{a,a}	۱/۰۰ ^{a,a}	۱/۰۰ ^{a,a}	۱/۰۰ ^{a,a}	۰
۱/۱۹ ^{b,c}	۱/۴۱ ^{a,b}	۱/۴۳ ^{a,b}	۰/۷۲ ^{b,b}	۰/۸۰ ^{a,b}	۰/۷۱ ^{b,b}	۲

۱/۳۸^{a,b} ۱/۳۶^{a,c} ۱/۳۲^{b,c} ۰/۴۸^{b,c} ۰/۵۰^{b,c} ۰/۵۶^{a,c} ۵

- حروف بالانویس اول و دوم بر روی هر عدد به ترتیب نشان دهنده اختلاف آماری ($P \leq 0.05$) در هر ردیف و هر ستون می‌باشند.
- میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر ردیف، بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ دارای اختلاف معنادار نیستند.

* AB: بیوچار هرس درختان سیب، GB: بیوچار هرس انگور و SB: بیوچار کاه و کلش گندم

نتیجه‌گیری کلی

با افزایش سطح کادمیم غلظت کادمیم در بخش هوایی و ریشه کاهو افزایش یافت. نتایج این پژوهش نشان داد کاربرد بیوچار هرس درختان سیب و انگور و بیوچار کاه و کلش گندم موجب کاهش غلظت کادمیم در اندام هوایی و ریشه کاهو شد که نشان دهنده کارایی خوب بیوچار برای کاهش جذب کادمیم توسط کاهو بود. همچنین افزایش مقدار بیوچار موجب افزایش رشد گیاه کاهو شد. بیوچارهای مورد مطالعه دارای پتانسیل برای درمان درجا و غیرمتحرک کردن کادمیم در خاک آلوده با سطوح مختلف کادمیم بودند. ترکیبات آلی

موجود در بیوچار با فلزات سنگین کمپلکس تشکیل می‌دهند و از این طریق سبب عدم تحرک آنها در خاک می‌شود. اما بیوچار کاه و کلش گندم در مقدار ۵ درصد بیشترین تأثیر را در کاهش کادمیم زیست فراهم خاک داشت. بنابراین با توجه به کارایی بیوچار در کاهش مقدار جذب کادمیم توسط کاهو و تهیه آسان بیوچارهای مورد مطالعه و همچنین برتری‌های اقتصادی استفاده از این اصلاح کننده‌ها، کاربرد بیوچار در خاک‌های آلوده به کادمیم توصیه می‌شود. با این وجود استفاده از یافته‌های این مطالعه به بررسی دراز مدت در شرایط مزرعه‌ای نیاز دارد.

منابع مورد استفاده

- Allison LE and Moodie CD, 1965. Carbonates. Pp. 1379-1396. In: Black CA (ed). Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Soil Science Society of America Journal: Madison, WI.
- Alloway BJ, 1990. Soil processes and the Behavior of Metals. Pp. 7-28. In: Alloway BJ (ed). Heavy Metals in Soils. Blackie Academic and Professional, Glasgow.
- Alloway BJ, 1995. Heavy Metals in Soils. Blackie Academic and Professional. New York.
- Anonymous, 2013. ASTM D1762-84 Standard test method for chemical analysis of wood charcoal, <http://www.astm.org/Standards/D1762.htm> (accessed April 2014).
- Baker AJM and Proctor J, 1990. The influence of cadmium, copper, lead and zinc on the distribution and evolution of metallophytes in the British Isles. Plant Systematics and Evolution 173: 91-108.
- Beesley L, Moreno-Jiménez E and Gomez-Eyles JL, 2010. Effects of biochar and green waste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil. Environmental Pollution 158: 2282-2287.
- Beesley L, Moreno-Jiménez E, Gómez-Eyles JL, Harris E, Robinson B and Sizmur T, 2011. A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. Environmental Pollution 159: 3269-3282.
- Bradl HB, 2004. Adsorption of heavy metal ions on soils and soil constituents. Journal of Colloid and Interface Science 277: 1-18.
- Brewer CE, 2012. Biochar characterization and engineering. Graduate Theses and Dissertations. P 1284. Iowa State University.

- Chapman HD, 1965. Cation Exchange Capability. Pp. 891-901. In: Black CA (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Soil Science Society of America Journal: Madison, WI.
- Cheng W, Coleman DC, Carroll CR and Hoffman CA, 1993. In situ measurements of root respiration and soluble carbon concentrations in the rhizosphere. *Soil Biology and Biochemistry* 25: 1189-1196.
- Cheng CH, Lehmann J and Engelhard MH, 2008. Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface change along a climosequence. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72: 1598–1610.
- Gaskin JW, Steiner C, Harris K, Das KC and Bibens B, 2008. Effect of low temperature pyrolysis conditions on biochars for agricultural use. *Transactions of the ASABE* 51(6): 2061-2069.
- Ge GH and Bauder JW, 1986. Particle size analysis. Pp. 383-411. In: Klute A (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Gupta S, Nayek S, Saha RN and Satpati S, 2008. Assessment of heavy metal accumulation in macrophyte, agricultural soil and crop plants adjacent to discharge zone of sponge iron factory. *Environmental Geology* 55: 731-739.
- Hewitt EJ, 1966. *Sand and Water Culture Methods Used in the Study of Plant Nutrition*. 2nd ed. Common wealth Bureau of Horticulture and Plantation Crops, East Mailing, Technical Communication, No. 22, Farnham Royal, Common wealth Agricultural Bureau, East Malling, Maidstone, Kent.
- Hmid A, Al Chami Z, Sillen W, De Vocht A and Vangronsveld J, 2015. Olive mill waste biochar: a promising soil amendment for metal immobilization in contaminated soils. *Environmental Science and Pollution Research* 22: 1444–1456.
- Jiang J, Xu RK, Jiang TY and Li Z, 2012. Immobilization of Cu(II), Pb(II) and Cd(II) by the addition of rice straw derived biochar to a simulated polluted Ultisol. *Journal of Hazardous Materials*. 229–230: 145–150.
- Karami N, Clemente R, Moreno-Jiménez E, Lepp NW and Beesley L, 2011. Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass. *Journal of Hazardous Materials* 191: 41–48.
- Kim K R, Owens G and Kwon SI, 2010. Influence of Indian mustard (*Brassica juncea*) on rhizosphere soil solution chemistry in longterm contaminated soils: a rhizobox study. *Journal of Environmental Sciences* 22: 98–105.
- Kim KR, Kim JG, Park JS, Kim MS, Owens G, Youn GH and Lee JS, 2012. Immobilizer-assisted management of metal-contaminated agricultural soils for safer food production. *Journal of Environmental Management* 102: 88–95.
- Kim JW, Lee HW, Lee I, Jeon JK, Ryu C, Park SH, Jung SC and Park YK, 2014. Influence of reaction conditions on bio-oil production from pyrolysis of construction waste wood. *Renewable Energy* 65: 41-48.
- Lehmann J, Gaunt J and Rondon M, 2006. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: a review. *Mitig Adapt Strategy Global Change* 11: 403–27.
- Liang B, Lehmann J, Solomon D, Kinyangi J, Grossman J, O'Neill B, Skjemstad J, Thies J, Luizao F and Petersen J, 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal* 70: 1719–1730.
- Lua K, Yang X, Shen J, Robinson Brett, Huangd H, Liua D, Bolane N, Peib J and Wang H, 2014. Effect of bamboo and rice straw biochars on the bioavailability of Cd, Cu, Pb and Zn to *Sedum plumbizincicola*. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 191: 124–132
- Lu H, Zhang YY, Huang X, Wang S and Qiu R, 2012. Relative distribution of Pb²⁺ sorption mechanisms by sludge-derived biochar. *Water Research* 46: 854–862.

- Lu W, Ding W and Zhang J, 2014. Biochar suppressed the decomposition of organic carbon in a cultivated sandy loam soil: a negative priming effect. *Soil Biology & Biochemistry* 76: 12–21.
- Ma LQ, Komar KM, Tu C, Zhang W, Cai Y and Kennelley ED, 2001. A fern that hyperaccumulates arsenic. *Nature* 409(6820): 579.
- Mensah E, Allen HE, Shoji R, Odai SN and Keyi-Baffour N, 2008. Cadmium and lead concentrations effects on yields of some vegetables due to uptake from irrigation water in Ghana. *Journal of Agricultural Research* 3(4): 243-251.
- McGrath SP, 1982. The uptake and translocation of tri- and hexavalent chromium and effects on the growth of Oat in flowing nutrient solution and in soil. *New Phytologist* 92: 381–390.
- McGrath SP and Cunliffe CII, 1985. A simplifide method for the extraction of the metals Fe, Zn, Cu, Ni, Pb, Cr, Co and Mn from soils and sewage sluge. *Food and Agriculture* 36: 794-798.
- Nelson DW and Sommers LE, 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Pp. 961-1010. In: Page AL, Miller RH and Keeney DR (eds). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Inc. Madison, WI.
- Park JH, Choppala GK, Bolan NS, Chung JW and Chuasavathi T, 2011. Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. *Plant Soil* 348: 439–451.
- Rajkovich S, Enders A, Hanley K, Hyland C, Zimmerman AR and Lehmann J, 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.
- Robinson BH, Mills TM, Petit D, Fung LE, Green SR and Clothier BE, 2000. Natural and induced cadmium-accumulation in poplar and willow: Implications for phytoremediation. *Plant and Soil* 227: 301- 306.
- Robinson B, Russel C, Hedley M and Clothier B. 2001. Cadmium adsorbtion by rhizobacteria: implications for New Zealand pasture land. *Agriculture Ecosystems and Environment* 87: 315-321.
- Romkens PFAM, Guo HY, Chu CL, Liu TS, Chiang CF and Koopmans GF, 2009. Prediction of cadmium uptake by brown rice and derivation of soil–plant transfer models to improve soil protection guidelines. *Environmental Pollution* 157: 2435–2444.
- Song W and Guo M, 2012. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 94: 138-145.
- Tan KH, 2003. *Humic Matter in Soil and the Environment: Principles and Controversies*. Ebooks Corporation. CRC Press, Marcel Dekker, New York.
- Ure AM, 1996. Single extraction schemes for soil analysis and related applications. *Science of the Total Environment* 178: 3–10.
- Yu XY, Ying GG and Kookana RS, 2009. Reduced plant uptake of pesticides with biochar additions to soil. *Chemosphere* 76: 665–671.
- Zacchini M, Pietrini F, Mugnozza G and Lori V, 2008. Metal tolerance, accumulation and translocation in poplar and willow clones treated with cadmium in hydroponics. *Water Air and Soil Pollution* 197: 23-34.
- Zayed A, Gowthaman S and Terry N, 1998. Phytoaccumulation of toxic trace elements by wetland plants: I. Duckweed (*Lemna minor* L.). *Environment Quality* 27: 715-721.
- Zhang X, He L, Sarmah A, Lin K, Liu Y, Li J and Wang H, 2014. Retention and release of diethyl phthalate in biochar mended vegetable garden soils. *Journal of Soils and Sediments* 14: 1790–1799
- Zhang Z, Solaiman ZM, Meney K, Murphy DV and Rengel Z, 2013. Biochars immobilize soil cadmium, but do not improve growth of emergent wetland species *Juncus subsecundus* in cadmium-contaminated soil, *Journal of Soils and Sediments* 13: 140–151.
- Zheng H, Wang Z, Deng X, Herbert S and Xing B, 2013. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil. *Geoderma* 206: 32–39.