Iranian Journal of Field Crop Science
Vol 54, No 1, Spring 2023 (81-94)
DOI: 10.22059/ijfcs.2022.340948.654903

علوم گیاهان زراعی ایران
دورهٔ ۵۴، شمارهٔ ۱، بهار ۱۴۰۲ (ص ۸۱-۹۴)

The effect of biochar on phytoremediation capacity of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) in cadmium contaminated soils

Kazem Abedi[1], Faezeh Zaefarian[2*], Roghayeh Hassanpour[3], Fardin Sadeghzadeh[4]
1,2,3. Department of Agronomy, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
4. Department of Soil Science, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
(Received: April 3, 2022- Accepted: June 29, 2022)

ABSTRACT

In order to evaluation of phytoremediation capability of *Chenopodium quinoa* Willd along with application of three types of biochar in cadmium contaminated soil, a factorial experiment was conducted in a completely randomized design with four replications in 2021. The treatments of this experiment include five levels of Cd (0, 25, 50, 75, and 100 mg Cd / kg soil from the source of cadmium nitrate) and four types of biochar (pomegranate and plum wood, wheat straw, North forest wood, and control). In this experiment, root dry weight and shoot dry weight decreased by 88.7 and 126.8% in response to increasing cadmium concentration, respectively. Pomegranate and plum wood biochar and wheat straw biochar increased root dry weight (18.8% and 40%, respectively) and shoot dry weight (35.8% and 79.4%, respectively). While the North forest wood biochar reduced root dry weight by 18.8% and shoot dry weight by 31.8%, with increasing cadmium concentration in soil, roots and shoots of quinoa increased by 484883.3, 90634.7, and 115805.4%, respectively. Application of pomegranate and plum wood biochar and wheat straw biochar reduced the concentration of cadmium usable in soil, cadmium concentration in roots and shoots. While, the North forest wood biochar on all levels, except the control, increased the concentration of usable cadmium in the soil, the concentration of cadmium in the roots and shoots of quinoa. With increasing cadmium concentration, tolerance index decreased by 129.4% compared to control. Due to the high tolerance index, translocation factor and bioaccumulation factor, the use of this plant in remediation can be recommended. On the other hand, the use of pomegranate and plum wood biochar and wheat straw biochar can reduce the concentration of cadmium in soil, root and shoot, as well as can improve plant yield, therefore, can be used for phytostabilization and reduce heavy metals in plant organs. On the other hand, the use of North forest wood biochar with the ability of increasing the concentration of cadmium in the soil, root and shoot can be used as an aid to increase of plant extraction. According to the results of this study, farmers can be advised to use pomegranate and plum wood biochar and wheat straw biochar in fields containing heavy metals such as cadmium to reduce these heavy metals. On the other hand, the use of North forest wood biochar should be avoided due to increased mobility of heavy metals in the fields.
Keywords: Biochar, heavy metals, remediation, tolerance index, translocation factor.

تأثیر بیوچار بر قابلیت گیاه‌پالایی کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd) در خاک‌های آلوده به کادمیوم

کاظم عابدی[۱]، فائزه زعفریان[۲*]، رقیه حسن‌پور[۳]، فردین صادق‌زاده[۴]
۱و۲و۳- به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشیار و دانش‌آموخته دکتری گروه زراعت، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ٤- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۴- تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۸)

چکیده

به‌منظور بررسی اثر بیوچار (زغال زیستی) بر گیاه‌پالایی کینوا در شرایط تنش کادمیوم، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در سال ۱۳۹۹ اجرا شد. فاکتورهای این آزمایش شامل پنج سطح کادمیوم (صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک از منبع نیترات کادمیوم) و چهار نوع بیوچار (چوب انار و آلو، کاه گندم، چوب جنگل‌های شمال و شاهد) بودند. در این آزمایش وزن خشک ریشه و وزن خشک شاخساره به‌ترتیب ۸۸/۷ و ۱۲٦/۸ درصد در پاسخ به افزایش غلظت کادمیوم کاهش یافت. بیوچار چوب انار و آلو و بیوچار کاه گندم موجب افزایش وزن خشک ریشه (به‌ترتیب ۱۸/۸ و ٤۰ درصد) و وزن خشک شاخساره (۳۵/۸ و ۷۹/٤ درصد) شدند. درحالی‌که بیوچار چوب

* Corresponding author E-mail: fa.zaefarian@sanru.ac.ir

جنگل‌های شمال ۱۸/۸ درصد وزن خشک ریشه و ۳۱/۸ درصد وزن خشک شاخساره را کاهش داد، با افزایش غلظت کادمیوم در خاک، ریشه و شاخساره کینوا به‌ترتیب ۸٤۸۸۳/۳، ۹۰٦۳٤/۷ و ۱۱۵۸۰۵/٤ درصد افزایش یافت. کاربرد بیوچار چوب انار و آلو و بیوچار کاه گندم موجب کاهش غلظت کادمیوم قابل استفاده در خاک، غلظت کادمیوم در ریشه و شاخساره شدند. این درحالی بود که بیوچار چوب جنگل‌های شمال در همه سطوح بجز شاهد موجب افزایش غلظت کادمیوم قابل استفاده در خاک، غلظت کادمیوم در ریشه و شاخساره کینوا شد. با افزایش غلظت کادمیوم، شاخص تحمل ۱۲۹/٤ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت. باتوجه‌به بالا بودن شاخص تحمل، فاکتور انتقال و فاکتور تجمع زیستی شاخساره می‌توان استفاده از این گیاه را در پالایش خاک توصیه کرد. همچنین، استفاده از بیوچار چوب انار و آلو و بیوچار کاه گندم باتوجه‌به اینکه موجب کاهش غلظت کادمیوم در خاک، ریشه و شاخساره شدند و همین‌طور ازآنجایی‌که موجب بهبود عملکرد گیاه شدند می‌توانند به‌منظور تثبیت گیاهی و کاهش فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی مورد استفاده قرار گیرند. از سوی دیگر، کاربرد بیوچار چوب جنگل‌های شمال با توانایی افزایش غلظت کادمیوم در خاک، ریشه و شاخساره می‌تواند به‌عنوان کمک‌کننده‌ای برای افزایش قابلیت استخراج گیاهی مورد استفاده قرار گیرد. باتوجه‌به نتایج این پژوهش می‌توان توصیه نمود که از بیوچار چوب انار و آلو و بیوچار کاه گندم در مزارع حاوی فلزات سنگین از قبیل کادمیوم به‌منظور کاهش تاثیر این فلز سنگین استفاده شود. ازطرف دیگر، از کاربرد بیوچار چوب جنگل‌های شمال به‌واسطه افزایش تحرک فلزات سنگین در زمین‌های زراعی پرهیز شود.

واژه‌های کلیدی: **پالایش، زغال زیستی، شاخص تحمل، فاکتور انتقال، فلزات سنگین.**

مقدمه

در طی چند دهه گذشته، آلودگی خاک توسط فلزات سنگین به‌دلیل سمی‌بودن و تجزیه دشوار آن به یک مسئله زیست‌محیطی مهم تبدیل شده است (Yang *et al*., 2020). کادمیوم به‌عنوان هفتمین عنصر بسیار سمی طبقه‌بندی شده است. جذب کادمیوم توسط گیاهان می‌تواند منجر به تجمع سطوح بالای کادمیوم در زنجیره غذایی انسان شود (Adhikari *et al*., 2020). علاوه‌بر آلودگی ناشی از رسوب ذرات هوا، فعالیت‌های انسانی مانند استخراج معادن، آبیاری از طریق فاضلاب و کاربرد سموم دفع آفات و کود نیز می‌توانند به افزایش کادمیوم در خاک‌های کشاورزی کمک کنند (Bui *et al*., 2020). کادمیوم به‌طور غیر مستقیم باعث افزایش تولید گونه‌های اکسیژن فعال در گیاهان و ایجاد تنش اکسیداتیو می‌شود (Hendrix *et al*., 2020).

روش‌های مرسوم برای حذف فلزات سنگین از خاک‌های آلوده شامل روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است که ممکن است در ترکیب با یکدیگر برای اصلاح مکان‌های آلوده استفاده شوند. با وجود راندمان بالا، اکثر این روش‌ها پرهزینه بوده و با مصرف انرژی بالا و تخریب زیست‌محیطی همراه هستند (Shi *et al*., 2020).

فناوری گیاه‌پالایی شاخه‌ای از زیست‌پالایی است که از گیاهان برای تصفیه آب و خاک استفاده می‌کند (Mustafa & Hayder, 2021). فناوری گیاه‌پالایی سازگار با محیط زیست و مقرون‌به‌صرفه است (Ibrahim & Afandi, 2020). گیاهان ایده‌آل برای گیاه‌پالایی باید ویژگی‌های متعددی از قبیل توانایی رشد در محیط آلوده، رشد سریع، زیست‌توده با کیفیت بالا، برداشت آسان و قابلیت تجمع طیف وسیعی از آلاینده‌ها و فلزات سنگین را در خود داشته باشند. در حال حاضر، هیچ گیاه شناخته‌شده‌ای نیست که تمام این معیارها را برآورده کند (Abedi Koupai *et al*.,

2020). کینوا با نام علمی *Chenopodium quinoa* Willd، گیاهی یک‌ساله است که از آمریکای لاتین منشأ گرفته است (Amiryousefi *et al*., 2020). کینوا یک گیاه هالوفیت است. هالوفیت‌ها تحمل بالاتری نسبت به فلزات سنگین دارند و سرعت جذب بیشتری از خاک نشان داده‌اند. علاوه‌براین، با افزایش تحرک موجب بهبود انتقال و جابه‌جایی فلزات سنگین از خاک به ریشه و سایر اجزای گیاه می‌شود (Jaikishun *et al*., 2019).

امروزه برای کاهش اثرات منفی آلاینده‌ها در کنار گیاه‌پالایی، از دیگر فرآیندها نیز استفاده می‌شود. ازجمله این فرآیندها برای افزایش کارایی گیاه‌پالایی، استفاده از کودهای زیستی و آلی مانند بیوچار می‌باشد (Albo Ebadi *et al*., 2018). بیوچار نوعی ماده آلی جامد و غنی از کربن است که در اثر فرآیند پیرولیز زیست‌توده در شرایط کمبود و یا غیاب اکسیژن تهیه می‌شود (Kabiri *et al*., 2018). خواص بیوچار تا حد زیادی به ویژگی‌های ماده اولیه و شرایط پیرولیز مانند دما، شدت و زمان گرمایش بستگی دارد (Cardenas-Aguiar *et al*., 2020). بیوچار با بهبود ویژگی‌های شیمیایی نظیر نگهداری و فراهمی عناصر موجب افزایش رشد گیاه می‌شود. علاوه‌براین، بیوچار می‌تواند پویایی عناصر غذایی را با اثرگذاری بر چرخه نیتروژن و ارائه گزینه‌هایی در راستای به‌حداقل‌رساندن هدررفت و اتلاف نیتروژن از طریق تبادل یونی، جذب و غیر پویاسازی و همچنین افزایش عرضه مواد غذایی تغییر دهد (Zibaei *et al*., 2019).

باتوجه‌به افزایش شهرنشینی و صنعتی‌شدن و در پی آن افزایش ورود فلزات سنگین به اکوسیستم، هدف از اجرای این پژوهش بررسی قابلیت گیاه‌پالایی کینوا همراه با کاربرد سه نوع بیوچار در خاک آلوده به کادمیوم در شهرستان بندر ترکمن می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش گلدانی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در محوطه مدیریت جهاد کشاورزی شهرستان بندر ترکمن به مختصات جغرافیایی °۵۴ و ´۶ طول شرقی و °۳۶ و ´۵۲ عرض شمالی با شرایط آب و هوایی معتدل و خشک در سال ۱۳۹۹ اجرا شد. فاکتورهای این آزمایش شامل پنج سطح کادمیوم (صفر (شاهد)، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک از منبع نیترات کادمیوم)، چهار سطح بیوچار (عدم مصرف (شاهد)، مصرف بیوچار (۱۰۰ گرم بیوچار به ازای هر کیلوگرم خاک) چوب انار و آلو از منطقه شیراز، کاه گندم از مناطق دیم گلستان و چوب جنگل‌های شمال بود. بیوچار چوب جنگل‌های شمال از شرکت داخلی کربن اکتیو بشل، بیوچار چوب درخت انار و آلو از شرکت فصل پنجم فرح‌بخش و بیوچار کاه گندم با همکاری آزمایشگاه خاکشناسی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری تهیه شدند. به‌منظور اندازه‌گیری مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک به آزمایشگاه انتقال یافت که نتایج اندازه‌گیری در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- نتایج تجزیه برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد آزمایش

Table 1. Analysis results of some physical and chemical properties of soil in the tested area

Soil texture	pH	Ec (mmohs/cm)	N (%)	C (%)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Mg (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)
Loam	7.88	3.07	0.04	0.5	5.77	194	2.3	0.8	0.062

در مجموع ۸۰ گلدان درنظر گرفته شد که برای هر گلدان مقدار پنج کیلوگرم خاک اضافه شد. غلظت‌های کادمیوم به‌صورت نیترات کادمیوم ($Cd(NO_3)_2$) به خاک اضافه شدند.

خاک‌های آلوده در گلدان‌ها به‌مدت یک ماه چندین مرتبه مرطوب و خشک شدند تا به شرایط طبیعی نزدیک شوند (Shanbleh & Kharabsheh, 1996). مقدار هر عنصر براساس نمک مورد نظر برای استفاده در پنج کیلوگرم خاک محاسبه شد. تفاوت در نیترات تیمارهای آلوده و شاهد از طریق کود اوره محاسبه و اعمال شد. مقدار مورد نظر نیترات کادمیوم برای هر تیمار به‌صورت لایه‌ای با خاک مخلوط شد. بعد از خشک‌شدن خاک در هوای آزاد، هم‌زمان با آلوده‌سازی محیط کشت، مقدار بیوچار تعیین‌شده (۵۰۰ گرم در هر گلدان) نیز به تیمارهای مورد نظر اضافه شد. برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بیوچار چوب انار و آلو، بیوچار کاه گندم و بیوچار چوب جنگل‌های شمال به‌ترتیب در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- نتایج تجزیه برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بیوچار

Table 2. Analysis results of some physical and chemical properties of biochar

Biochar type	Conditions	Temperatures (°C)	Time (hour)	Particle diameter size (mm)	pH	Humidity (%)
Pomegranate and plum	Anaerobic	500	24	4	8	5
Wheat straw	Anaerobic	300	7	0.5	7	7
North forest wood	Anaerobic	390	14	1-3	8.5	6

در تاریخ ۱۳۹۹/۱۲/۰۳ عملیات کاشت انجام شد. به این صورت که در هر گلدان پنج عدد بذر کینوا کاشته شد که پس از جوانه‌زدن و استقرار گیاهان عمل تنک‌کردن صورت گرفت و درنهایت یک بوته در هر گلدان به‌عنوان تراکم گیاه درنظر گرفته شد. در طول دوره رشد، به‌منظور جلوگیری از هدررفت نیترات کادمیوم اعمال شده و تسریع کلاته‌شدن فلز سنگین، آبیاری از طریق زیرگلدانی صورت گرفت. علاوه‌براین، در طول دوره رشد مبارزه با علف‌های هرز به‌طور دستی صورت گرفت و در طول دوره رشد هیچ گونه آفاتی مشاهده نشد. عملیات برداشت گیاهان در تاریخ ۱۴۰۰/۰۳/۱۵ حدود دو ماه پس از کاشت در مرحله حداکثر رشد رویشی و قبل از گلدهی انجام شد. در زمان برداشت، گیاهان هر گلدان کف‌بر شدند و پس از برداشت اندام هوایی، ریشه‌ها از گلدان خارج شدند و درنهایت با آب شست‌وشو شدند، سپس نمونه‌های اندام‌های هوایی و ریشه‌های گیاه (اندام‌های زیرزمینی) به آزمایشگاه انتقال یافتند. پس از کف‌بر کردن بوته‌ها، نمونه‌ها به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده شدند؛ سپس با استفاده از ترازوی دیجیتال وزن خشک نمونه‌ها در گلدان تعیین شد.

اندازه‌گیری غلظت کادمیوم در اندام‌های گیاهی به‌روش هضم تر انجام شد. غلظت فلز کادمیوم قابل جذب در نمونه‌های خاک با استفاده از روش Lindsay & Norvell (1978) اندازه‌گیری شد. درنهایت، با استفاده از روابط ریاضی زیر توانایی گیاهان در انباشت عنصر آلاینده کادمیوم محاسبه شد (Lindsay & Norvell, 1978; Woodies *et al.*, 1977).

$$\text{شاخص تحمل}=۱۰۰\times\frac{\text{وزن خشک شاخساره در خاک آلوده (g)}}{\text{وزن خشک شاخساره در خاک غیرآلوده (g)}}$$

رابطه (۱) (Baker, 1987; Lasat, 2002)

$$\text{فاکتور انتقال} = \frac{\text{غلظت فلز کادمیوم در شاخساره } (\text{mg kg}^{-1})}{\text{غلظت فلز کادمیوم در ریشه } (\text{mg kg}^{-1})}$$

رابطه (۲)

(Baker & Brooks, 1989; Zhang *et al*., 2002)

$$\text{فاکتور تجمع زیستی شاخساره} = \frac{\text{غلظت فلز کادمیوم در شاخساره } (\text{mg kg}^{-1})}{\text{غلظت فلز کادمیوم قابل جذب خاک } (\text{mg kg}^{-1})}$$

رابطه (۳) (Ma *et al*., 2001; Cluis, 2004)

$$\text{مقدار جذب کادمیوم در شاخساره } (\text{mg pot}^{-1}) = \text{وزن خشک شاخساره در گلدان } (\text{g pot}^{-1}) \times \text{غلظت فلز کادمیوم در شاخساره } (\text{mg g}^{-1})$$

رابطه (۴) (Aravind & Prasad, 2005)

پس از اتمام محاسبات آزمایشگاهی، داده‌های حاصل از این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار SAS (Ver. 9.4) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین در صورت معنی‌داربودن اثرات متقابل دوگانه کادمیوم و بیوچار، برشی‌دهی اثر متقابل صورت گرفت و از آزمون LSD در سطح پنج درصد جهت مقایسه میانگین استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر تمامی صفات مرتبط با قابلیت گیاه‌پالایی در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر کادمیوم و بیوچار بر صفات مرتبط با قابلیت گیاه‌پالایی کینوا.

Table 3. Analysis of variance (mean squares) effect of cadmium and biochar on traits related to phytoremediation of quinoa.

Source	Df	RDW	SDW	Cd of soil	Cd of root	Cd of shoot	TF	Cd uptake in shoots	TI	BF
Cadmium	4	0.772**	20.108**	228.362**	907.617**	4344.173**	1.513**	0.0194**	1.109**	4.880**
Biochar	3	0.913**	41.378**	39.810**	134.992**	367.445**	1.969**	0.0033**	2.281**	7.585**
Cadmium× Biochar	12	0.005^{ns}	0.261^{ns}	3.134**	10.133**	26.061**	0.383*	0.0019**	0.014^{ns}	0.699^{ns}
Error	60	0.037	0.334	0.336	0.918	3.903	0.160	0.0001	0.018	0.696
Cv (%)		20.51	15.78	12.85	10.62	10.35	18.834	22.99	15.29	19.74

*، ** و ns: به‌ترتیب به‌مفهوم معنی‌داری در سطح پنج درصد، یک درصد و عدم معنی‌داری می‌باشند.

*, ** and ns are significant at the level of 5%, 1% and non-significant, respectively.

RDW: Root dry weight, SDW: Shoot dry weight, TF: Translocation Factor, TI: Tolerance index and BF: Bioaccumulation Factor

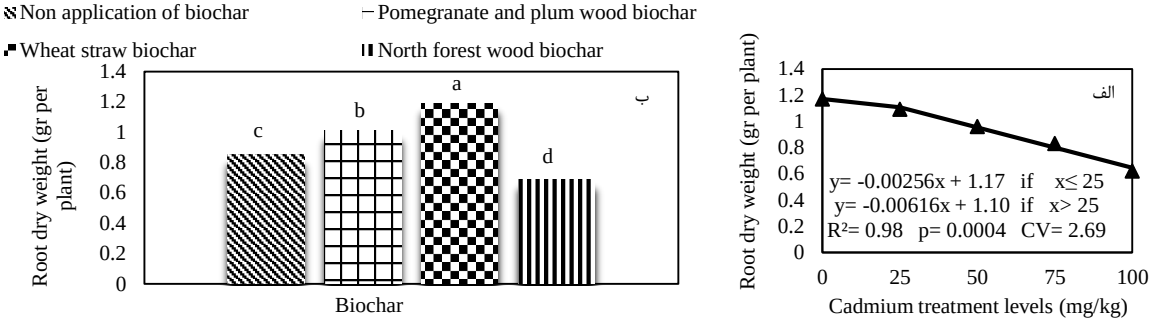
وزن خشک ریشه

اثر ساده کادمیوم و بیوچار بر وزن خشک ریشه در سطح یک درصد معنی‌دار شد. در حالی‌که اثر متقابل کادمیوم و بیوچار اثر معنی‌داری بر این صفت نداشت (جدول ۳). با افزایش غلظت کادمیوم، وزن خشک ریشه کاهش یافت (شکل ۱-الف). به‌طوری‌که بیشترین میانگین وزن خشک ریشه (۱/۱ گرم در بوته) در غلظت صفر کادمیوم به‌دست آمد و مصرف ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک باعث کاهش ۸۸/۷ درصدی وزن خشک ریشه نسبت به عدم مصرف کادمیوم شد (شکل ۱-الف). بیوچار چوب انار و آلو و بیوچار کاه گندم، وزن خشک ریشه کینوا را به‌ترتیب ۱۸/۸ و ۴۰ درصد نسبت به شاهد افزایش دادند. درحالی‌که، وزن خشک ریشه با کاربرد بیوچار تهیه‌شده از چوب جنگل‌های شمال ۱۸/۸ درصد کاهش یافت.

وزن خشک شاخساره

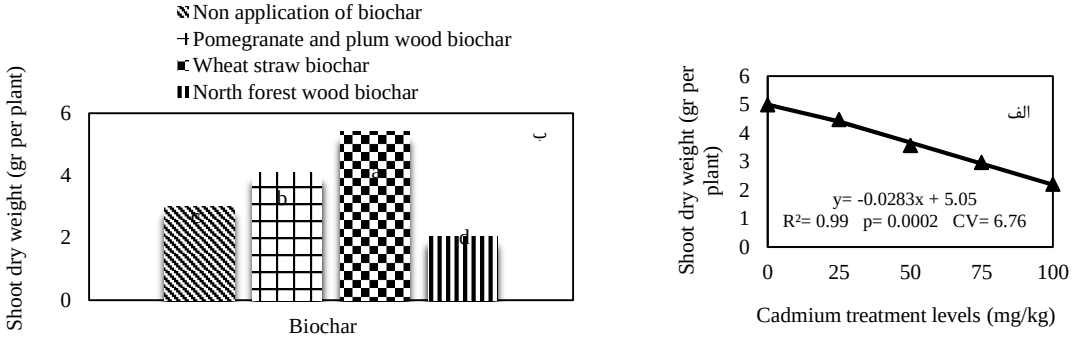
کادمیوم و بیوچار بر وزن خشک شاخساره اثر معنی‌داری در سطح یک درصد داشتند؛ اما اثر متقابل کادمیوم و بیوچار بر صفت ذکرشده اثر معنی‌داری نداشت (جدول ۳). باتوجه‌به شکل ۲-الف روند تغییرات وزن خشک شاخساره کینوا تحت افزایش غلظت کادمیوم از نوع خطی بود؛ به‌طوری‌که مصرف ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک باعث کاهش

۱۲۶/۸ درصدی وزن خشک شاخساره نسبت به عدم مصرف کادمیوم شد (شکل ۲-الف).



شکل ۱- روند تغییرات وزن خشک ریشه کینوا با افزایش سطوح کادمیوم (الف) و مقایسه میانگین اثر بیوچار بر وزن خشک ریشه کینوا (ب)

Figure 1. The trend of quinoa root dry weight changes with increasing cadmium levels (a) and the mean comparison of biochar effect on root dry weight of quinoa (b)



شکل ۲- روند تغییرات وزن خشک شاخساره کینوا با افزایش سطوح تیمار کادمیوم (الف) و مقایسه میانگین اثر بیوچار بر وزن خشک شاخساره گیاه کینوا (ب).

Figure 2. The trend of quinoa shoot dry weight changes with increasing cadmium levels (a) and the mean comparison of biochar effect on shoot dry weight of quinoa (b).

در مطالعه‌ای مشاهده شد که تحت تنش کادمیوم (یک میکرومول در لیتر)، رشد گیاه برنج به‌طور جدی مهار شد و وزن خشک ریشه و وزن خشک شاخساره در ۱۰ و ۲۰ روز پس از اعمال تیمارها به‌طور چشمگیری کاهش یافتند (Qina *et al*., 2021). افزایش اتصال عرضی پکتین‌ها در لاملاهای میانی باعث افزایش چسبندگی سلولی و اتصال به دیواره سلولی می‌شود و درنتیجه در برابر رشد مقاومت می‌کند. علاوه‌براین، افزایش فعالیت پراکسیداز دیواره سلولی ناشی از فلز منجر به افزایش اتصال عرضی فنلی می‌شود. درنتیجه می‌تواند از گسترش دیواره سلولی و رشد زیست‌توده جلوگیری کند (Sudhagar & Sassikumar, 2017).

وزن خشک شاخساره با کاربرد بیوچار چوب انار و آلو و بیوچار کاه گندم به‌ترتیب ۳۵/۸ و ۷۹/۴ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت؛ این درحالی بود که مصرف بیوچار تهیه‌شده از چوب جنگل‌های شمال موجب کاهش ۳۱/۸ درصدی وزن خشک شاخساره شد (شکل ۲-ب). بیوچارهای تولیدشده خواص متفاوتی را نشان می‌دهند که منجر به اثرات متفاوتی بر خاک و درنتیجه منجر به واکنش‌های متفاوتی از سوی گیاهان می‌شود

(Paneque *et al*., 2016). در آزمایشی با عنوان بررسی تأثیر سه نوع بیوچار حاصل از گندم، ذرت و نی در دماهای ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت تنش کادمیوم، نیکل و سرب نشان داد، بیشترین وزن خشک ریشه (۱/۹۳ گرم) و شاخساره (۷/۳۷ گرم) گیاه ذرت (*Zea mays* L.) در تیمار بیوچار ذرت تهیه‌شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. درحالی‌که، کمترین میزان وزن خشک ریشه (۱/۶۱ گرم) در تیمار بیوچار گندم تهیه‌شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد. علاوه‌براین، نتایج این مطالعه نشان داد که وزن خشک ریشه و شاخساره گیاه ذرت با افزایش میزان بیوچار به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند (Sayyadian *et al*., 2019). به‌نظر می‌رسد بیوچار به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک با افزایش حاصلخیزی خاک، شرایط مناسبی را برای رشد و عملکرد گیاه به‌وجود آورده و همچنین سطح ویژه و چگالی بار زیاد آن باعث افزایش سطح ویژه کل خاک و افزایش جمعیت میکروبی خاک شده (Zaefarian *et al*., 2020) و افزایش فعالیت ریزجانداران در حضور بیوچار، ترشحات گیاهی و تأثیر سینرژیک آن‌ها موجب افزایش وزن خشک ریشه و شاخساره می‌شود (Habibi *et al*., 2017). برخی از انواع بیوچار می‌توانند سدیم را در خاک افزایش دهند. افزایش سدیم بر رشد گیاهان اثر منفی می‌گذارد؛ به این صورت که پتانسیل اسمزی خاک را افزایش می‌دهد و جذب آب توسط گیاهان را کاهش می‌دهد. با این حال، اثر آهکی بیوچار خاصیت مثبتی برای خاک‌های اسیدی محسوب می‌شود، اما در خاک‌هایی با pH بالا، اثر آهکی می‌تواند اثرات نامطلوبی را به‌همراه داشته باشد (Rajkovich *et al*., 2011).

غلظت کادمیوم در خاک و اندام‌های گیاهی

اثرات ساده کادمیوم و بیوچار و همچنین اثر متقابل کادمیوم و بیوچار بر غلظت کادمیوم در خاک، ریشه و شاخساره در سطح یک درصد اثر معنی‌داری داشتند (جدول ۳). براساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین برهمکنش کادمیوم و بیوچار بر میزان غلظت کادمیوم قابل استفاده در خاک، غلظت کادمیوم در ریشه و شاخساره کینوا، با افزایش غلظت کادمیوم میزان غلظت کادمیوم در خاک، ریشه و شاخساره به‌ترتیب ۸۴۸۸۳/۳، ۹۰۶۳۴/۷ و ۱۱۵۸۰۵/۴ درصد افزایش یافتند (جدول ۴). در همه‌ی سطوح کادمیوم، کاربرد بیوچار چوب انار و آلو و بیوچار کاه گندم موجب کاهش غلظت کادمیوم قابل استفاده در خاک، غلظت کادمیوم در ریشه و شاخساره شدند. این درحالی بود که بیوچار چوب جنگل‌های شمال در همه‌ی سطوح بجز شاهد موجب افزایش غلظت کادمیوم قابل استفاده در خاک، غلظت کادمیوم در ریشه و شاخساره کینوا شد. در همه سطوح تیمار کادمیوم بجز شاهد، کاربرد بیوچار کاه گندم موجب کاهش بیشتری در غلظت کادمیوم قابل استفاده در خاک، غلظت کادمیوم ریشه و شاخساره نسبت به بیوچار چوب انار و آلو شده است. کمترین غلظت کادمیوم قابل استفاده در خاک، غلظت ریشه و شاخساره (به‌ترتیب ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۴ میلی‌گرم در کیلوگرم) در خاک غیر آلوده و در حضور بیوچار کاه گندم مشاهده شد. در مقابل، بیشترین غلظت کادمیوم قابل استفاده در خاک، غلظت کادمیوم در ریشه و شاخساره (به‌ترتیب ۱۲/۴۰۳، ۲۳/۶۹۸ و ۵۱/۰۹۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک و در حضور بیوچار تهیه‌شده از چوب جنگل‌های شمال به‌دست آمد که نسبت به شاهد (عدم مصرف بیوچار در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم) به‌ترتیب ۲۱/۶۲، ۱۳/۵۵ و ۱۹/۱۳ درصد افزایش یافتند (جدول ۴).

جدول ۴- مقایسه میانگین برهمکنش کادمیوم و بیوچار بر غلظت کادمیوم قابل استفاده در خاک، ریشه و شاخساره کینوا.

Table 4. Comparison of the mean interaction of cadmium and biochar on the concentration of cadmium in soil, roots and shoots of quinoa.

Cadmium (mg/kg)	Biochar	Concentration of Cd in soil	Concentration of Cd in roots	Concentration of Cd in shoots	Translocation Factor	Cd uptake in shoots
		(mg/kg)				
0	Non application	0.012[b]	0.023[b]	0.037[a]	1.66[b]	0.00014[a]
	Pomegranate and plum wood	0.002[c]	0.005[c]	0.010[b]	2.00[a]	0.00002[b]
	Wheat straw	0.001[c]	0.002[c]	0.004[b]	2.00[a]	0.00002[b]
	North forest wood	0.022[a]	0.051[a]	0.047[a]	0.92[c]	0.00015[a]
25	Non application	2.839[b]	5.337[b]	10.765[b]	2.04[b]	0.04390[a]
	Pomegranate and plum wood	1.686[c]	2.846[c]	8.355[c]	3.13[a]	0.04041[a]
	Wheat straw	0.678[d]	1.429[d]	4.169[d]	3.07[a]	0.02543[b]
	North forest wood	3.585[a]	7.820[a]	13.351[a]	1.71[b]	0.03881[a]
50	Non application	4.340[b]	8.744[b]	17.388[b]	2.00[a]	0.05362[a]
	Pomegranate and plum wood	3.231[c]	6.333[c]	13.427[c]	2.13[a]	0.05407[a]
	Wheat straw	2.178[d]	4.365[d]	9.632[d]	2.49[a]	0.04917[a]
	North forest wood	5.773[a]	11.666[a]	23.880[a]	2.06[a]	0.04872[a]
75	Non application	7.688[b]	15.095[b]	30.994[b]	2.06[a]	0.07264[c]
	Pomegranate and plum wood	6.199[c]	13.075[c]	27.155[c]	2.08[a]	0.08905[b]
	Wheat straw	4.750[d]	10.925[d]	23.565[d]	2.20[a]	0.11000[a]
	North forest wood	9.154[a]	17.231[a]	34.834[a]	2.02[a]	0.05541[d]
100	Non application	10.198[b]	20.869[b]	42.885[b]	2.05[b]	0.07138[b]
	Pomegranate and plum wood	8.581[c]	17.110[c]	37.816[c]	2.21[b]	0.10240[b]
	Wheat straw	6.916[d]	13.798[d]	34.824[d]	2.52[a]	0.13710[a]
	North forest wood	12.403[a]	23.698[a]	51.090[a]	2.15[b]	0.02760[c]

میانگین‌هایی که در هر ستون و هر سطح کادمیوم دارای حروف مشترک می‌باشند، براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

The means that have a common letter and each cadmium level are not significantly different together at the 5% level based on the LSD test.

Kacalkova *et al*. (2014) گزارش دادند که افزایش غلظت فلزات سنگینی مانند کروم، نیکل، سرب و کادمیوم در خاک موجب افزایش جذب آن‌ها توسط گیاهانی از قبیل ذرت (*Zea mays* L.)، آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.)، بید (*Salix* x *smithiana* (Willd.) و صنوبر (*Populus nigra* L. x *P. maximowiczii*) شدند. همچنین نشان داده شد که استفاده از مواد جاذبی مانند بیوچار در خاک باعث کاهش جذب فلزات سنگین توسط این گیاهان می‌شود. در آزمایش دیگری مشاهده شد که بـا افزایش سطح

سرب و کادمیوم، میزان جذب در اندام هوایی کاهو (*Lactuca sativa* L.) رقم "سیاهو" افزایش یافت. در این تحقیق تیمارهای مختلف بیوچار تهیه‌شده از پسماند گل رز شاخه‌بریده (۵ و ۱۰ گرم در کیلوگرم) موجب کاهش غلظت سرب و کادمیوم در ریشه و اندام هوایی کاهو شدند (Valizadeh Ghale Beig *et al*., 2020).

بیوچار متخلخل و دارای گروه‌های عاملی است که این ساختار خاص موجب شده تا بیوچار پتانسیل جذب فلزات سنگین در محیط آبی و خاکی را داشته باشد. گروه‌های عاملی سطحی در بیوچار (هیدروکسیل، کربوکسیل و کربونیل) می‌توانند ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را افزایش دهند و موجب افزایش تشکیل کمپلکس‌ها با فلزات سنگین شوند (Bashir *et al*., 2018). تبادل کاتیونی نقش مهمی را در کاهش زیست‌فراهمی فلزات سنگین در خاک ایفا می‌کند. علاوه‌براین، بیوچار با افزایش pH خاک اسیدی، منجر به افزایش بارهای منفی سطح می‌شود. بنابراین باعث افزایش جذب فلزات سنگین می‌شود. به‌طورکلی مکانیسم‌های جذب فلزات سنگین توسط بیوچار شامل برهمکنش‌های الکترواستاتیک، تبادل یونی، رسوب شیمیایی و ایجاد کمپلکس با گروه‌های عاملی در سطح بیوچار می‌باشد (Gholami & Rahimi, 2020).

pH محیط یکی از عوامل مؤثر بر فرآیند جذب محسوب می‌شود، زیرا از یک جهت یون‌های هیدروژن به‌شدت با یون‌های فلزی برای مکان‌های جذب رقابت می‌کنند و از سوی دیگر تعیین‌کننده شکل شیمیایی یونی فلز و درجه یونیزاسیون جاذب در طول واکنش است (Boostani, 2020). کم‌بودن جذب کادمیوم در pHهای پایین می‌تواند به این علت باشد که در pH پایین، گروه‌های عاملی سطحی بیوچار پروتونه شده و به‌صورت بار مثبت وجود دارند. در این حالت بیشتر تمایل جاذب به جذب آنیون است (Abdelhafez *et al*., 2014). بیوچار کاه گندم، چوب انار و آلو و چوب جنگل‌های شمال به‌ترتیب شامل کمترین و بیشترین مقدار pH می‌باشند. بنابر مطالب فوق، بیوچار کاه گندم با کمترین pH موجب کاهش جذب کادمیوم و بیوچار چوب جنگل‌های شمال با بیشترین pH موجب افزایش جذب کادمیوم در خاک، ریشه و شاخساره می‌شوند.

فاکتور انتقال

جدول تجزیه واریانس نشان می‌دهد اثر ساده کادمیوم و بیوچار بر فاکتور انتقال در سطح یک درصد و اثر متقابل کادمیوم و بیوچار در سطح پنج درصد معنی‌دار شدند (جدول ۳). نتایج حاصل از مقایسه میانگین برهمکنش کادمیوم و بیوچار بر فاکتور انتقال نشان داد، فاکتور انتقال از سطح صفر تا غلظت ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک افزایش یافته است، اما در ادامه روند یکسانی را طی کرده است. کمترین مقدار فاکتور انتقال (۰/۹۲) در خاک غیر آلوده و در حضور بیوچار تهیه شده از چوب جنگل‌های شمال به‌دست آمد که نسبت به شاهد (عدم مصرف بیوچار) ۴۴/۵۷ درصد کاهش یافت. بیشترین مقدار فاکتور انتقال (۳/۱۳) در سطح ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک و با کاربرد بیوچار چوب انار و آلو مشاهده شد که نسبت به شاهد آن (عدم مصرف بیوچار در سطح ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک) ۵۵/۳۹ درصد افزایش یافت (جدول ۴). فاکتور انتقال (نسبت کادمیوم شاخساره به ریشه) بالاتر فلزات سنگین در گیاه اهمیت زیادی برخوردار است؛ زیرا به کارآمدی گیاهان در گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مربوط می‌شود (Hussain *et al*., 2013). به‌طور معمول گیاهان هنگام تنش فلزات سنگین فاکتور انتقال کوچک‌تر از یک را نشان می‌دهند. فاکتور انتقال بزرگ‌تر از یک نشان می‌دهد که گیاهان آلودگی مورد مطالعه را تحمل

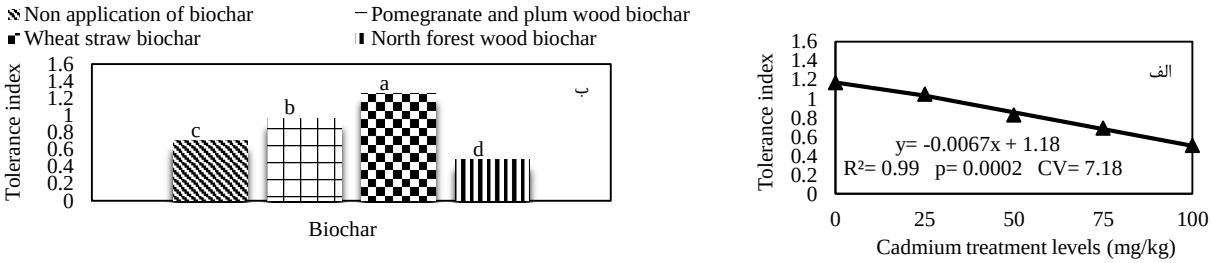
می‌کنند و این خصوصیت یکی از ویژگی‌های گیاهان بیش‌اندوز محسوب می‌شود. بنابراین، فاکتور انتقال بزرگ‌تر از یک عامل تعیین‌کننده‌ای برای دسته‌بندی گونه‌های گیاهی برای فرآیند گیاه‌پالایی است (Antoniadis *et al*., 2017). فاکتور انتقال کینوا در این مطالعه بالاتر از یک محاسبه شد (جدول ۴). این گیاه با مقادیر فاکتور انتقال بالاتر از یک به‌طور فعال باعث تجمع فلزات سنگین در قسمت‌های هوایی گیاه می‌شود.

جذب کادمیوم در شاخساره

تمامی اثرات ساده کادمیوم و بیوچار و همچنین اثر متقابل کادمیوم و بیوچار بر جذب کادمیوم در شاخساره در سطح یک درصد اثر معنی‌داری داشتند (جدول ۳). همچنین نتایج پژوهش حاضر نشان داد با افزایش سطوح کادمیوم، میزان جذب کادمیوم در شاخساره افزایش یافت. کمترین میزان جذب کادمیوم در شاخساره (۰/۰۰۰۰۲ میلی‌گرم در شاخساره) در تیمار خاک غیرآلوده و مصرف بیوچار چوب انار و آلو و بیوچار کاه گندم به‌دست آمد و این درحالی بود که بیشترین میزان جذب کادمیوم در شاخساره (۰/۱۳۷۱۰ میلی‌گرم در شاخساره) در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک و در حضور بیوچار کاه گندم به‌دست آمد که نسبت به شاهد آن (عدم مصرف بیوچار در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک) ۹۲ درصد افزایش یافت (جدول ۴). مقدار جذب هر فلز در شاخساره از حاصل‌ضرب مقدار وزن ماده خشک شاخساره در غلظت فلز در شاخساره به‌دست می‌آید. این صفت معیاری مناسب برای تعیین پالایش فلزات و در واقع قوی‌ترین معیار برای تعیین پتانسیل پالایش گیاه می‌باشد (Aravind & Prasad, 2005). در این آزمایش با افزایش سطوح کادمیوم، غلظت فلز در شاخساره نیز افزایش یافت (جدول ۴). از آنجایی که میزان جذب کادمیوم در شاخساره از حاصل‌ضرب مقدار وزن ماده خشک شاخساره در غلظت فلز در شاخساره به‌دست می‌آید؛ بنابراین با افزایش سطوح کادمیوم، میزان جذب کادمیوم در شاخساره نیز افزایش می‌یابد.

شاخص تحمل

اثر ساده کادمیوم و بیوچار بر شاخص تحمل در سطح یک درصد معنی‌دار شد. در حالی‌که اثر متقابل کادمیوم و بیوچار اثر معنی‌داری بر این صفت نداشت (جدول ۳). شاخص تحمل با افزایش غلظت کادمیوم کاهش یافت. میزان شاخص تحمل در بالاترین غلظت کادمیوم (۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک) نسبت به شاهد حدود ۱۲۹/۴ درصد کاهش یافت (شکل ۳-الف).



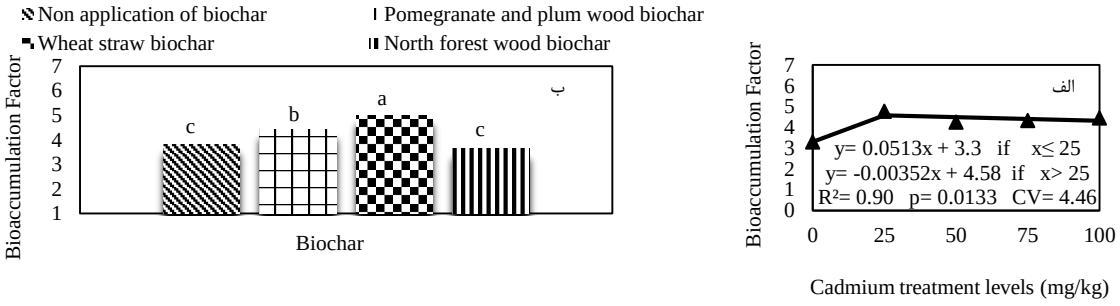
شکل ۳- روند تغییرات شاخص تحمل کینوا با افزایش سطوح کادمیوم (الف) و مقایسه میانگین اثر بیوچار بر شاخص تحمل کینوا (ب).
Figure 3. The trend of quinoa tolerance index changes with increasing cadmium levels (a) and the mean comparison of biochar effect on tolerance index of quinoa (b).

بیوچار چوب انار و آلو و بیوچار کاه گندم به‌ترتیب ۳۷/۱ و ۸۰ درصد نسبت به شاهد موجب افزایش میزان شاخص تحمل شدند. درحالی‌که، کاربرد بیوچار چوب جنگل‌های شمال میزان شاخص تحمل را ۳۰/۴ درصد

کاهش داد (شکل ۳-ب). Amirahmadi *et al.* (2020) گزارش دادند، افزایش غلظت کادمیوم (۱۰، ۳۰ و ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) موجب کاهش شاخص تحمل گیاه بلوط (*Quercus castaneifolia* C.A. Mey) شد. درحالی‌که افزودن سطوح مختلف بیوچار شلتوک برنج (۱، ۳ و ۵ درصد وزنی) موجب افزایش شاخص تحمل در تمام غلظت‌های کادمیوم شد. به‌طوری‌که بیشترین شاخص تحمل در تیمار بیوچار ۵ درصد و کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک مشاهده شد. شاخص تحمل که نشان‌دهنده رشد گیاه در حضور آلاینده است در حالت عادی دارای مقدار یک می‌باشد اما وقتی گیاه در معرض تنش آلاینده قرار گیرد این نسبت به‌شدت کاهش می‌یابد (Azizi *et al.*, 2016). درجه تحمل گیاه نسبت به شرایط تنش به سه دسته تحمل بالا (بزرگ‌تر از ۰/۶)، تحمل متوسط (۰/۶- ۰/۳۵) و حساس (کوچک‌تر از ۰/۳۵) تقسیم می‌شود (Lux *et al.*, 2004). برهمین‌اساس، ازآنجایی‌که شاخص تحمل کینوا در این آزمایش بالاتر از ۰/۶۰ است، این گیاه به‌عنوان گیاهی بسیار متحمل محسوب می‌شود.

فاکتور تجمع زیستی شاخساره

کادمیوم و بیوچار بر فاکتور تجمع زیستی شاخساره اثر معنی‌داری در سطح یک درصد داشتند، اما اثر متقابل کادمیوم و بیوچار بر صفت ذکرشده اثر معنی‌داری نداشت (جدول ۳). باتوجه‌به شکل ۴-الف، روند تغییرات فاکتور تجمع زیستی شاخساره کینوا در پاسخ به افزایش سطوح کادمیوم غیر خطی بود. به‌طوری‌که فاکتور تجمع زیستی شاخساره در ابتدا تا غلظت ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک با شیب ۰/۰۵۱۳ واحد افزایش یافت؛ اما در ادامه تا غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک با شیب ۰/۰۰۳۵۲- واحد روند نزولی طی کرده است.



شکل ۴- روند تغییرات فاکتور تجمع زیستی شاخساره کینوا با افزایش سطوح کادمیوم (الف) و مقایسه میانگین اثر بیوچار بر فاکتور تجمع زیستی شاخساره کینوا (ب).

Figure 4. The trend of quinoa bioaccumulation factor changes with increasing cadmium levels (a) and the mean comparison of biochar effect on bioaccumulation factor of quinoa (b).

در بالاترین غلظت کادمیوم، میزان فاکتور تجمع زیستی شاخساره نسبت به شاهد (سطح صفر کادمیوم) حدود ۳۴/۸ درصد افزایش یافت (شکل ۴-الف). بیوچار چوب انار و آلو و بیوچار کاه گندم موجب افزایش فاکتور تجمع زیستی شاخساره به‌ترتیب ۱۵/۷ و ۳۰/۸ درصد نسبت به شاهد شدند.

بیوچار تهیه‌شده از چوب جنگل‌های شمال اثر معنی‌داری بر فاکتور تجمع زیستی شاخساره نداشته است (شکل ۴-ب). فاکتور تجمع زیستی شاخصی است که برای ارزیابی پتانسیل انتقال فلز از خاک به گیاه

استفاده می‌شود (Liu *et al*., 2020). درصورتی‌که فاکتور تجمع زیستی شاخساره کمتر از یک باشد گیاه ذخیره‌کننده، اگر بین ۱۰-۱ باشد گیاه تجمع‌کننده و اگر بیشتر از ۱۰ باشد، به‌عنوان فوق انباشت‌کننده عناصر سنگین طبقه‌بندی می‌شود (Baker, 1981)؛ لذا براساس نتایج این پژوهش، فاکتور تجمع زیستی شاخساره که در محدوده ۱۰-۱ می‌باشد؛ می‌توان کینوا را به‌عنوان تجمع‌کننده کادمیوم معرفی کرد.

نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی، افزایش غلظت کادمیوم موجب کاهش صفاتی نظیر ارتفاع بوته، وزن خشک ریشه و وزن خشک شاخساره شد. افزایش غلظت کادمیوم موجب تجمع بیشتر آن در اندام‌های گیاهی کینوا شد و میزان تجمع کادمیوم در اندام‌های گیاهی بسته به سطوح کادمیوم متفاوت بود. اما باتوجه‌به بالابودن شاخص تحمل، فاکتور انتقال و فاکتور تجمع زیستی شاخساره می‌توان استفاده از این گیاه را در پالایش خاک توصیه کرد. ازطرفی، استفاده از بیوچار چوب انار و آلو و بیوچار کاه گندم باتوجه‌به اینکه موجب کاهش غلظت کادمیوم در خاک، ریشه و شاخساره شدند و همین‌طور ازآنجایی‌که موجب بهبود عملکرد گیاه شدند می‌توانند به‌منظور تثبیت گیاهی و کاهش فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی مورد استفاده قرار گیرند. از سوی دیگر، کاربرد بیوچار چوب جنگل‌های شمال با توانایی افزایش غلظت کادمیوم در خاک، ریشه و شاخساره می‌تواند به‌عنوان کمک‌کننده‌ای برای افزایش قابلیت استخراج گیاهی مورد استفاده قرار گیرد.

REFERENCES

1. Abdelhafez, A. A., Li, J. & Abbas, M. H. H. (2014). Feasibility of biochar manufactured from organic wastes on the stabilization of heavy metals in a metal smelter contaminated soil. *Chemosphere*, 117, 66-71.
2. Abedi Koupai, J., Jamalian, M. A. & Dorafshan, M. M. (2020). Improving Isfahan landfill leachate quality by phytoremediation using vetiver and phragmites plants in green space irrigation. *Journal of Water and Wastewater*, 31(3), 101-111. (In Persian)
3. Adhikari, A., Lee, K. E., Khan, M. A., Kang, S. M., Adhikari, B., Imran, M., Jan, R., Kim, K. M. & Lee, I. J. (2020). Effect of silicate and phosphate solubilizing rhizobacterium *Enterobacter ludwigii* GAK2 on *Oryza sativa* L. under cadmium stress. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 30(1), 118-126.
4. Albo Ebadi, H., Moradi, M. & Jahantab, E. (2018). Effect of biochar and municipal waste compost on *Ziziphus spina-christi* (L.) Willd heavy metals and total petroleum hydrocarbons phytoremediation. *Journal of Plant Ecosystem Conservation*, 6(12), 261-277. (In Persian)
5. Amirahmadi, E., Hojjati, S. M., Kammann, C., Ghorbani, M. & Biparva, P. (2020). The potential effectiveness of biochar application to reduce soil cd bioavailability and encourage oak seedling growth. *Applied Sciences*, 10, 3410-3422.
6. Amiryousefi, M., Tadayon, M. R. & Ebrahimi, R. (2020). Effect of biological and chemical fertilizers on some biochemical and yield traits of two quinoa cultivars. *Journal of Plant Process and Function*, 9(36), 299-314. (In Persian)
7. Antoniadis, V., Levizou, E., Shaheen, S. M., Ok, Y. S., Sebastian, A., Baum, C., Prasad, M. N. V., Wenzel, W. W. & Rinklebe, J. (2017). Trace elements in the soil-plant interface: Phytoavailability, translocation, and phytoremediation- A review. *Earth-Science Reviews*, 171, 621-645.
8. Aravind, P. & Prasad, M. N. V. (2005). Cadmium-zinc interaction in hydroponic system using *Ceratophyllum demersum* L.: Adaptive echophysiology, biochemistry and molecular toxicology. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17, 3-20.
9. Azizi, E., Rahbarian, R. & Mirbolook, A. (2016). Phytoremediation of Cr^{+6} in contaminated soil using *Portulaca oleracea*. *Iranian Journal of Soil Research*, 30(2), 161-172. (In Persian)
10. Baker, A. J. M. (1981). Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*, 3, 643-654.
11. Baker, A. J. M. (1987). Metal tolerance. *New Phytologist*, 106, 93-111.

12. Baker, A. J. M. & Brooks, R. R. (1989). Terrestrials higher plants which hyper accumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 1, 81-126.
13. Bashir, S., Zhu, J., Fu, Q. & Hu, H. (2018). Comparing the adsorption mechanism of Cd by rice straw pristine and KOH-modified biochar. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 11875-11883.
14. Boostani, H. R. (2020). Investigation of effects of bio chars derived from wheat and corn straw on zinc adsorption in aqueous solution. *Environmental Science and Technology*, 22(6), 129-146. (In Persian)
15. Bui, A. T. K., Duong, L. T. & Nguyen, M. N. (2020). Accumulation of copper and cadmium in soil–rice systems in terrace and lowland paddies of the Red River basin, Vietnam: The possible regulatory role of silicon. *Environmental Geochemistry and Health*, 42, 3753-3764.
16. Cardenas-Aguiar, E., Ruiz, B., Fuente, E., Gasco, G. & Mendez, A. (2020). Improving mining soil phytoremediation with *Sinapis alba* by addition of hydrochars and biochar from manure wastes. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 5197-5210.
17. Cluis, C. (2004). Junk-greedy greens: Phytoremediation as a new option for soil decontamination. *Journal of Biotechnology*, 2, 60-67.
18. Gholami, L. & Rahimi, GH. (2020). The effect of carrot pulp derived biochar on the adsorption of cadmium and lead in an acidic soil. *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(2), 1-23. (In Persian)
19. Habibi, H., Motesharezadeh, B. & Alikhani, H. A. (2017). Effect of biochar and biological treatments on nutrient elements content (P, K, Ca, Mg, Fe and Mn) of *Amaranthus* in oil polluted soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(2), 369-384. (In Persian)
20. Hendrix, S., Iven, V., Eekhout, T., Huybrechts, M., Pecqueur, I., Horemans, N., Keunen, E., De Veylder, L., Vangronsveld, J. & Cuypers, A. (2020). Suppressor of gamma response 1 modulates the DNA damage response and oxidative stress response in leaves of cadmium-exposed *Arabidopsis thaliana*. *Frontiers in Plant Science*, 11, 366-378.
21. Hussain, A., Abbas, N., Arshad, F., Akram, M., Khan, Z. I., Ahmad, K., Mansha, M. & Mirzaei, F. (2013). Effects of diverse doses of lead (Pb) on different growth attributes of *Zea mays* L. *Agricultural Sciences*, 4(5), 262-265.
22. Ibrahim, N. & El Afandi, G. (2020). Phytoremediation uptake model of heavy metals (Pb, Cd and Zn) in soil using *Nerium oleander*. *Heliyon*, 6(7), 4445-4452.
23. Jaikishun, S., Li, W., Yang, Z. & Song, S. (2019) Quinoa: In perspective of global challenges. *Agronomy*, 9(4): 176-190.
24. Kabiri, P., Motaghian, H. R. & Hosseinpur, A. R. (2018). Phytoremediation potential of maize (*Zea mays* L.) using biochars produced from walnut leaves in a contaminated soil. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(4), 133-152. (In Persian)
25. Kacalkova, L., Tlustos, P. & Szakova, J. (2014). Chromium, nickel, cadmium, and lead accumulation in maize, sunflower, willow, and poplar. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23(3), 753-761.
26. Lasat, M. M. (2002). Phytoextraction of toxic metals: A review of biological mechanism. *Journal of Environmental Quality*, 31, 109-120.
27. Lindsay, W. L. & Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42, 421-428.
28. Liu, S., Pu, S., Deng, D., Huang, H., Yan, C., Ma, H. & Razavi, B. S. (2020). Comparable effects of manure and its biochar on reducing soil Cr bioavailability and narrowing the rhizosphere extent of enzyme activities. *Environment International*, 134, 105277-105287.
29. Lux, A., Sottnikova, A., Opatrna, J. & Greger, M. (2004). Differences in structure of adventitious roots in *Salix* clones with contrasting characteristics of cadmium accumulation and sensitivity. *Physiologia Plantarum*, 120, 537-545.
30. Ma, L. Q., Komar, K. M., Tu, C., Zhang, W., Cai, Y. & Kenelly, E. D. (2001). A fern that hyperaccumulates arsenic. *Nature*, 409, 579-582.
31. Mustafa, H. M. & Hayder, G. (2021). Recent studies on applications of aquatic weed plants in phytoremediation of wastewater: A review article. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 355-365.
32. Paneque, M., De la Rosa, J. M., Franco-Navarro, J. D., Colmenero-Flores, J. M. & Knicher, H. (2016). Effect of biochar amendment on morphology, productivity and water relations of sunflower plants under non-irrigation conditions. *Catena*, 147, 280-287.
33. Qina, H., Yinliang, W. & Guosheng, S. (2021). Root aeration promotes cadmium accumulation in rice by regulating iron uptake-associated system. *Rice Science*, 28(5), 511-520.
34. Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A. R. & Lehmann, J. (2011). Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils*, 48, 271-284.

35. Sayyadian, K., Moezzi, A., Gholami, A., Panahpour, E. & Mohsenifar, K. (2019). Effect of biochar on cadmium, nickel and lead uptake and translocation in maize irrigated with heavy metal contaminated water. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(1), 969-982.
36. Shanbleh, A. & Kharabsheh, A. (1996). Stabilization of Cd, Ni and Pb in soil using natural zeolite. *Journal of Hazardous Material*, 45(11), 207-217.
37. Shi, G., Lu, H., Liu, H., Lou, L., Zhang, P., Song, G., Zhou, H. & Ma, H. (2020). Sulfate application decreases translocation of arsenic and cadmium within wheat (*Triticum aestivum* L.) plant. *Science of the Total Environment*, 713, 136665-136675.
38. Smiri, M. (2011). Effect of cadmium on germination, growth, redox and oxidative properties in *Pisum sativum* seeds. *Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 3(3), 52-59.
39. Sudhagar, R. & Sassikumar, D. (2017). Cadmium induced morphological and phytotoxic effects on different plant parts of maize (*Zea mays* L.) seedlings: Evidence for alterations in nutrient dynamics and enzyme activities. *Plant Archives*, 17(2), 1669-1676.
40. Valizadeh Ghale Beig, A., Nemati, S. H., Emami, H. & Aroie, H. (2020). The effect of cutflower-rose waste biochar on morphological traits and heavy metals in lettuce (*Lactuca sativa* l. cv. Syaho). *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 10(4), 21-35. (In Persian)
41. Woodies, T. C., Hunter, G. B. & Johnson, F. J. (1977). Statistical studies of matrix effects on the determination of cadmium and lead in fertilizer and material and plant tissue by flame atomic absorption spectrophotometry. *Analytical Chemistry Acta*, 90, 127-136.
42. Yang, Y., Yang, X., He, M. & Christakos G. (2020). Beyond mere pollution source identification: Determination of land covers emitting soil heavy metals by combining PCA/APCS, GeoDetector and GIS analysis. *Catena*, 185, 104297-104306.
43. Zaefarian, F., Akbarpour, V., Habibi, M. & Kaveh, M. (2020). Impact of biochar and biofertilizers on photosynthetic pigments, yield, and nutrient content of peppermint. *Journal of Crops Improvement*, 21(4), 407-422. (In Persian)
44. Zhang, W. H., Cai, Y., Tu, C. & Ma, Q. L. (2002). Arsenic speciation and distribution in an arsenic hyperaccumulating plant. *Environmental Science*, 300, 167-177.
45. Zibaei, Z., Ghasemi Fasaei, R. & Ostovar, P. (2019). Effects of crop residues, rice husk biochar, and urea application on growth, chemical composition, and nitrogen use efficiency of spinach in a calcareous soil. *Iranian Journal of Soil Research (Formerly Soil and Water Sciences)*, 33(1), 75-87. (In Persian)